



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN  
INGENIO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,  
GUATEMALA**

**M.A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel**

Asesorado por la Mtro. Ing. Edwin Manolo Tock Amézquita

Guatemala, octubre 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN  
INGENIO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,  
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**M.A. ING. AIRONS ALEJANDRO RETANA ESQUIVEL**  
ASESORADO POR EL MTRO. ING. EDWIN MANOLO TOCK AMÉZQUITA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS**

GUATEMALA, OCTUBRE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| DECANO     | Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.) |
| 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. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)    |
| EXAMINADORA | Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR  | Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque   |
| EXAMINADOR  | Mtro. Ing. Carlos Alfredo Boj de León       |
| SECRETARIO  | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez             |



## **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:

**PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN  
INGENIO GUATEMALTECO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 9 de noviembre de 2022.



**M.A. Ing. Aírons Alejandro Retana Esquivel**

LNG.DECANATO.OI.687.2023

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN INGENIO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, GUATEMALA**, presentado por: **M.A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.



Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaoc



**Guatemala, octubre de 2023**

LNG.EEP.OI.687.2023

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN INGENIO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, GUATEMALA”**

presentado por **M.A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
**Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada**  
**Directora**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 27 de julio de 2023

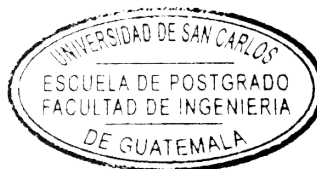
**M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada**  
**Directora**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Presente**

**Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada**

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN INGENIO PARA LA PRODUCCION DE VAPOR Y GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA, GUATEMALA** del estudiante **Airons Alejandro Retana Esquivel** quien se identifica con número de carné **200312710** del programa de Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



**Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
**Coordinador**  
**Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**

Oficina Virtual



Guatemala, 27 de julio de 2023

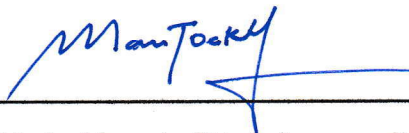
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrados  
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PROACTIVA EN UN INGENIO PARA LA PRODUCCION DE VAPOR Y GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA, GUATEMALA"** del estudiante **Airons Alejandro Retana Esquivel** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 200312710.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

*Edwin Manolo Tock Amézquita  
Ingeniero Mecánico Industrial  
Colegiado No. 9742*



---

Msc. Ing. Edwin Manolo Tock Amezquita  
Colegiado No. 9742  
Asesor de Tesis

## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                              |                                                                                                                                                                    |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mi esposa</b>             | Regina Valiente, por su comprensión y apoyo incondicional en el camino de la vida.                                                                                 |
| <b>Mis hijas</b>             | Andrea y Camila Retana Valiente por ser la luz de mis días y el motor de mi vida.                                                                                  |
| <b>Mi hermano</b>            | Víctor Alfonso Retana Esquivel, por su apoyo incondicional en todo momento.                                                                                        |
| <b>Amigos de la Maestría</b> | David Lagos, Derik Alvarado, Javier Blanco y Hugo Salic, por las noches de desvelo y el vínculo profesional y personal formado en el transcurso de estos dos años. |



## AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser mi *alma mater* que permitió nutrirme de conocimientos se debe de pelear por nuestra autonomía, nuestra academia no se debe claudicar en estos momentos difíciles para nuestra sociedad.

**Facultad de Ingeniería**

Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar mis anhelos profesionales.

**Ingenio Santa Ana**

Por brindarme la oportunidad y los recursos necesarios para realizar esta investigación.

**Mi asesor**

Mtro. Ing. Manolo Tock Amézquita, por guiarme durante el trabajo de graduación.



## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                                                      | V    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                                            | VII  |
| GLOSARIO.....                                                                      | IX   |
| RESUMEN .....                                                                      | XI   |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                   | XIII |
| OBJETIVOS .....                                                                    | XIX  |
| RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....                                               | XXI  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                 | XXV  |
| <br>                                                                               |      |
| 1. ANTECEDENTES.....                                                               | 1    |
| <br>                                                                               |      |
| 2. MARCO TEÓRICO .....                                                             | 5    |
| 2.1. Industria azucarera en Guatemala.....                                         | 5    |
| 2.1.1. Producción de azúcar y sus productos .....                                  | 7    |
| 2.1.2. Preparación de caña .....                                                   | 8    |
| 2.1.3. Molienda de caña .....                                                      | 8    |
| 2.1.4. Manejo y calentamiento de jugo .....                                        | 9    |
| 2.1.5. Clarificación.....                                                          | 9    |
| 2.1.6. Evaporación .....                                                           | 10   |
| 2.1.7. Pasos para el proceso de producción de azúcar.....                          | 10   |
| 2.2. Recursos utilizados en el proceso de fabricación de azúcar....                | 13   |
| 2.2.1. Recursos para producción de azúcar.....                                     | 13   |
| 2.2.2. La energía eléctrica como recurso del proceso<br>productivo de azúcar ..... | 14   |

|        |                                                                                             |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.3. | La cogeneración a partir de biomasa (bagazo de caña).....                                   | 15 |
| 2.2.4. | Los inicios de los ingenios en la generación y su aporte la matriz energética nacional..... | 17 |
| 2.3.   | La operación de las plantas de energía eléctrica de los ingenios azucareros .....           | 18 |
| 2.3.1. | Mantenimiento predictivo .....                                                              | 19 |
| 2.3.2. | Mantenimiento correctivo .....                                                              | 20 |
| 2.3.3. | Mantenimiento preventivo .....                                                              | 22 |
| 2.3.4. | Mantenimiento periódico .....                                                               | 23 |
| 2.4.   | Procedimientos de mantenimientos predictivos .....                                          | 24 |
| 2.4.1. | Análisis de vibraciones .....                                                               | 24 |
| 2.4.2. | Termografía.....                                                                            | 25 |
| 2.4.3. | Ultrasonido .....                                                                           | 26 |
| 2.5.   | Equipos para mantenimientos basados en la confiabilidad proactiva.....                      | 27 |
| 2.5.1. | Analizador de vibraciones .....                                                             | 27 |
| 2.5.2. | Cámara termográfica.....                                                                    | 28 |
| 2.5.3. | Medidor de ultrasonido .....                                                                | 30 |
| 2.6.   | Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).....                             | 32 |
| 2.6.1. | Pasos básicos para implantación de un plan de mantenimiento.....                            | 34 |
| 2.6.2. | Métodos para organizar el proceso de puesta en marcha de confiabilidad.....                 | 35 |
| 3.     | PRESENTACIÓN DE DATOS.....                                                                  | 39 |
| 3.1.   | Técnicas de mantenimiento basada en confiabilidad.....                                      | 39 |

|        |                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.   | Determinar los equipos críticos del departamento de generación de energía eléctrica .....                                                                                                              | 40 |
| 3.3.   | Gestión o recolección de la información .....                                                                                                                                                          | 46 |
| 3.3.1. | Análisis e interpretación de la información.....                                                                                                                                                       | 50 |
| 3.4.   | Datos recabados por medio de mantenimientos basados en confiabilidad.....                                                                                                                              | 52 |
| 4.     | DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                                                                                                                                                                           | 57 |
| 4.1.   | ¿Cuáles son las técnicas de mantenimiento basado en confiabilidad para prevenir fallas en equipos eléctricos de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero? .....                     | 57 |
| 4.2.   | ¿Cuál es la criticidad de los equipos que puedan provocar salidas de línea, perdidas de vapor y perdidas de generación eléctrica en una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero? ..... | 60 |
| 4.3.   | ¿Cómo evitar pérdidas de tiempo provocada por fallas e indisponibilidades de equipos principales y auxiliares de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero? .....                    | 61 |
| 4.4.   | Desarrollar una metodología o plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva en un ingenio guatemalteco para la producción de vapor y generación de energía eléctrica.....                 | 63 |
|        | CONCLUSIONES .....                                                                                                                                                                                     | 65 |
|        | RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                                                                  | 67 |
|        | REFERENCIAS.....                                                                                                                                                                                       | 69 |
|        | APÉNDICES.....                                                                                                                                                                                         | 73 |

ANEXOS..... 77

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|                   |                                                                                        |      |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Figura 1.</b>  | Árbol del problema.....                                                                | XVII |
| <b>Figura 2.</b>  | Proceso de producción de azúcar.....                                                   | 11   |
| <b>Figura 3.</b>  | Planta de generación con base en biomasa .....                                         | 17   |
| <b>Figura 4.</b>  | Generador y turbina generación con biomasa .....                                       | 19   |
| <b>Figura 5.</b>  | Cambio de cojinete de motor eléctrico, mantenimiento correctivo .                      | 21   |
| <b>Figura 6.</b>  | Mantenimiento preventivo, seguimiento a temperaturas.....                              | 22   |
| <b>Figura 7.</b>  | Mantenimientos periódicos a transformadores .....                                      | 23   |
| <b>Figura 8.</b>  | Medidor de vibraciones portátil .....                                                  | 28   |
| <b>Figura 9.</b>  | Cámara termográfica .....                                                              | 30   |
| <b>Figura 10.</b> | Medidor de ultrasonido .....                                                           | 31   |
| <b>Figura 11.</b> | Esquema mantenimiento basado en confiabilidad .....                                    | 36   |
| <b>Figura 12.</b> | Pasos para determinar los rangos de criticidad .....                                   | 42   |
| <b>Figura 13.</b> | Análisis de vibraciones motor inducido 1 .....                                         | 47   |
| <b>Figura 14.</b> | Vibraciones inducido 2.....                                                            | 48   |
| <b>Figura 15.</b> | Vibraciones forzado 1 .....                                                            | 49   |
| <b>Figura 16.</b> | Formato de lectura de valores y representación gráfica de<br>valores de vibración..... | 54   |
| <b>Figura 17.</b> | Evaluación motora, transmisión y ventilador inducido caldera.....                      | 55   |
| <b>Figura 18.</b> | Preguntas básicas para la elaboración de un plan de<br>mantenimiento RCM .....         | 58   |
| <b>Figura 19.</b> | Técnicas de mantenimiento, evaluadas .....                                             | 59   |

## TABLAS

|                 |                                                                                    |    |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> | Formato para que muestre cómo determinar la criticidad de forma cualitativa.....   | 43 |
| <b>Tabla 2.</b> | Interpretación de riesgo en tabla de colores .....                                 | 44 |
| <b>Tabla 3.</b> | Muestra de equipos evaluados .....                                                 | 45 |
| <b>Tabla 4.</b> | Tabla que representa una matriz de fallas recurrentes en equipos...                | 51 |
| <b>Tabla 5.</b> | Listado de equipos críticos analizados .....                                       | 53 |
| <b>Tabla 6.</b> | Tabla de equipos críticos.....                                                     | 60 |
| <b>Tabla 7.</b> | Formato de seguimiento de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad..... | 62 |
| <b>Tabla 8.</b> | Formato de actividades de mantenimiento.....                                       | 64 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado         |
|---------|---------------------|
| °C      | Grados Celsius      |
| Hz      | Hercio              |
| h       | Horas               |
| =       | Igual que           |
| KW      | Kilovatio           |
| Km      | Kilómetro           |
| KV      | Kilovoltio          |
| MW      | Megavatio           |
| MWh     | Megavatio hora      |
| m       | Metro               |
| mm      | Milímetro           |
| '       | Pies o minutos      |
| %       | Porcentaje          |
| P       | Potencia            |
| “       | Pulgadas o segundos |
| Q       | Quetzales           |



## GLOSARIO

|                        |                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMM</b>             | Administrador del Mercado Mayorista.                                                                                                                                                                   |
| <b>Axial</b>           | En dirección al eje                                                                                                                                                                                    |
| <b>Bagazo</b>          | Materia prima conocida como biomasa                                                                                                                                                                    |
| <b>Bloque</b>          | Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas y generadores.                                                                                                                                 |
| <b>Motor eléctrico</b> | El motor eléctrico es una máquina electromecánica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. En otras palabras, los aparatos que producen una fuerza de rotación se conocen como motores. |
| <b>RPM</b>             | Revoluciones por minuto                                                                                                                                                                                |
| <b>SNI</b>             | Sistema Nacional Interconectado                                                                                                                                                                        |
| <b>Transformador</b>   | Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.                                                                                                            |
| <b>Turbogenerador</b>  | Máquina eléctrica que genera energía impulsada por una turbina de vapor.                                                                                                                               |

|                    |                                                                                                                                                              |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ultrasonido</b> | Los ultrasonidos son una serie de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano. |
| <b>Vatio</b>       | Unidad de medida de potencia                                                                                                                                 |
| <b>Vibraciones</b> | Consiste en el movimiento de un cuerpo sólido alrededor de su posición de equilibrio sin que exista desplazamiento neto del objeto que vibra                 |
| <b>Voltaje</b>     | El voltaje se define como la magnitud encargada de establecer la diferenciación de potencial eléctrico que existe entre dos puntos.                          |
| <b>Spot</b>        | Costo del MWh en Guatemala, es el precio de un activo negociado en bolsa sujeto a pago y entrega inmediatos.                                                 |
| <b>Tensión</b>     | Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.                                                                                       |
| <b>Termografía</b> | La termografía permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético utilizando cámaras térmicas                                              |

## **RESUMEN**

El propósito de la investigación es proporcionar un plan de mantenimiento para disminuir las fallas en equipos eléctricos para optimizar su competitividad en la producción de energía eléctrica y mantener los equipos eléctricos disponibles. Por tal motivo, se busca la eficiencia en la operación de los equipos para bajar costos y que su excelencia operativa se mantenga en un rango aceptable de funcionamiento. Con esto se prolonga la vida útil de los equipos además disminuye el impacto ocasionado por fallas posibles. El problema principal del proceso son las fallas no predecibles y que ocasionan pérdidas de tiempo, salidas de línea o indisponibilidades de los equipos del proceso productivo e influyen directa e indirectamente en la generación de energía eléctrica o en la producción de azúcar y generación de energía eléctrica.

De ahí la iniciativa de proveer un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para corregir o amortiguar este problema. Por lo tanto, el objetivo general es la creación de un plan que se pueda programar y que sea medible numéricamente y pueda hacer por medio de técnicas que de recopilación de datos como vibraciones, ultrasonido y termografía. La metodología empleada para realizar un plan de mantenimientos a equipos es realizar una matriz de criticidad para evaluar la importancia de cada uno de los en la puesta en marcha como en la operación para documentar las fallas y evaluar las condiciones. Con ello, se tomarán mejores decisiones para corregir eventos no deseados para evitar pérdidas de tiempo y alargar la vida útil de los activos.

Para obtener los resultados de esta investigación se evalúa el funcionamiento, disponibilidad de cada equipo y el comportamiento del proceso

como un todo, además, se concluyó que la creación de dicho plan de mantenimiento con una retroalimentación basada en completamente viable y aceptable para la ejecución. Se recomienda evaluar periódicamente los activos con una para garantizar el funcionamiento y evitar fallas que puedan identificarse con los monitoreos programados a los equipos, puesto que la evaluación constante dará margen a cambios en los formatos con esto garantizar una la calidad de la vida útil de estos.

Se tiene en cuenta que los beneficios de la investigación vienen dados con el monitoreo de las condiciones diarias de operación de los equipos eléctricos. Esto ofrece un panorama y tendencia de su comportamiento los cuales pueden registrarse con equipos especiales de monitoreo de condición, como vibración, cámara termografía, ultrasonido. Se realizó el plan de mantenimiento para los mantenimientos de los equipos eléctricos de cogeneración para lo cual se necesitó del apoyo de los encargados del proceso, técnicos que ejecutan trabajo de campo y operadores. Como recomendación principal se propone la revisión periódica de las fallas recurrentes y esporádicas de los equipos que se tienen en la ruta crítica de la investigación para la aplicación correcta del plan de mantenimiento y determinar la causa raíz de las fallas.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Generar energía eléctrica y producción de vapor en la planta de generación de ingenio Santa Ana se ve afectada por las fallas de equipos auxiliares y principales, puesto que estos equipos mantienen la planta en funcionamiento y así poder generar la mayor cantidad de energía con el turbogenerador y la caldera de vapor por tal motivo es necesario incrementar la eficiencia del proceso.

### **Contexto general**

En relación con el departamento de generación eléctrica de un ingenio azucarero se dedica a la generación de energía eléctrica y producción de vapor utilizando como combustible carbón natural o la biomasa obtenida de la caña de azúcar, cuando se tiene una falla de los equipos principales o auxiliar que provocan una salida de línea se afecta la producción de energía eléctrica y la producción de vapor para el proceso de elaboración de azúcar, por tanto es necesario un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva para poder minimizar fallas o bien programar mantenimientos antes que ocurra o sean necesarios.

### **Descripción del problema**

Generar energía eléctrica en la planta de cogeneración, depende de la alimentación del combustible llamado biomasa, el cual es extraído de la caña de azúcar, este entra a las calderas para que sea quemado y con el poder calorífico

obtenido calentar las paredes de la caldera y hacer un intercambio de calor con el agua hasta convertirla en vapor; posteriormente, este vapor sirve para mover los turbos generadores para generar energía eléctrica y luego ser trasladado a fabrica para el proceso de evaporación en la fabricación de azúcar; si ocurre una falla la cual no se pueda reparar a tiempo puede parar el proceso de generación de energía y el de producción de azúcar.

Además, se tienen fallas que acontecen por mantenimientos preventivos con bajos estándares de calidad no monitoreados o por fallas fulminantes en los equipos por razones ajenas al mantenimiento que puede ser por haber llegado a fin de vida útil, malas prácticas en la operación.

Tomar en cuenta los costos económicos que provocan estas fallas se cuantifican con la pérdida de generación en el día 20 de diciembre 2022 de la página de amm.org.gt en el link [https://www.amm.org.gt/portal/?page\\_id=145](https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=145) la venta al sistema nacional interconectado donde el precio del MWh oscila en \$88.68 por cada MWh promedio que no se vendió y el vapor turbinado que se dejó de enviar a fabrica para la fabricación de azúcar, dependiendo de la severidad de la falla se puede estar fuera de 5 minutos en adelante se tiene registro de casos de 2 horas fuera de línea en un generador que eso significa una pérdida de generación de 4.66MWh hasta perdidas de generación de 112MWh lo cual económicamente representaría perdidas de \$ 410.00 a \$ 9,932.16 en un solo turbo generador; estos datos son tomados del precio spot del administrador del mercado de mayoristas.

#### Formulación del problema

Además, el mantenimiento puede ser definido como el conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o

sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas. Se necesita comprender que cualquier función o actividad que un componente, equipo o sistema desempeña, desde el punto de vista operacional; el surgimiento y aplicación del mantenimiento preventivo, data de comienzos de la década del 50, y con diversos refinamientos su uso perdura hasta nuestros días. Como estrategia de mantenimiento, el MP.

Además, se basa en revisiones, inspecciones, cambios y ajustes, realizados a unas ciertas frecuencias, sobre los diferentes equipos de un proceso productivo, con el fin de asegurar su condición operativa adecuada, minimizando el riesgo de ocurrencia de correctivos emergentes; fruto de las tareas anteriores, se programan y ejecutan mantenimientos correctivos si la situación lo amerita. Cada una de las actividades anteriores generan una carga de trabajo de mantenimiento (CTM), cuya realización puede llegar a demandar recursos humanos, físicos y económicos en exceso; el mantenimiento centrado en confiabilidad es una metodología ampliamente reconocida y de uso extendido para elaborar planes de mantenimiento de equipos industriales.

Desarrollar la confiabilidad en los mantenimientos es una tarea que involucra a todos los interesados desde la gerencia o dirección de la empresa hasta los técnicos u operadores de campo, esto indica un compromiso el cual hay que cumplir para la mejora continua de los procesos productivos.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio:

¿Cómo es el desarrollo de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva en un ingenio guatemalteco para la producción de vapor y generación de energía eléctrica?

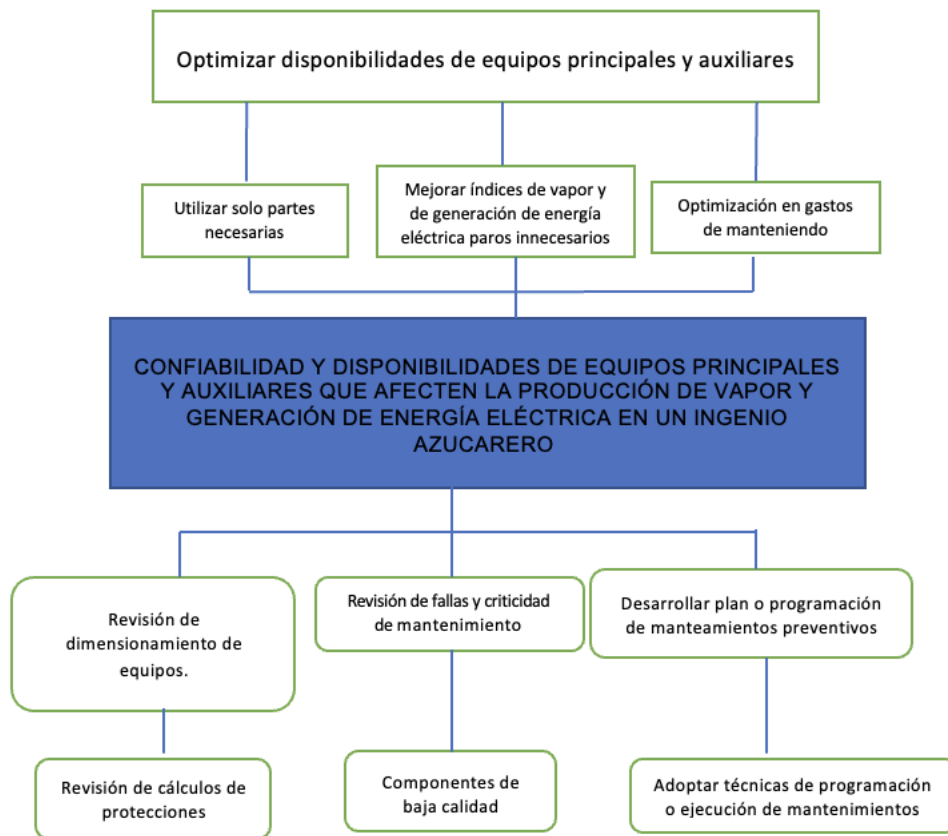
## Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son las técnicas de mantenimiento basado en confiabilidad para prevenir fallas en equipos eléctricos de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?
- ¿Cuál es la criticidad de los equipos que puedan provocar salidas de línea, perdidas de vapor y perdidas de generación eléctrica en una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?
- ¿Cómo evitar pérdidas de tiempo provocada por fallas e indisponibilidades de equipos principales y auxiliares de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?

**Figura 1.**

*Árbol del problema*



*Nota.* Esquemático del árbol del problema. Elaboración propia, usando Excel.

La figura 1 representa el árbol del problema es una técnica que se utiliza para identificar la naturaleza y contexto de la problemática que se pretende resolver mediante una estrategia, programa, proyecto y aquí se presenta el de la investigación, el esquemático fue desarrollado como guía a la resolución de la problemática planteada.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva en un ingenio guatemalteco para la producción de vapor y generación de energía eléctrica.

### **Específicos**

1. Identificar las técnicas de mantenimiento basado en la confiabilidad aplicados a equipos eléctricos de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero.
2. Determinar los equipos críticos que puedan provocar salidas de línea, pérdidas de vapor y pérdidas de generación eléctrica según su criticidad de la generadora de energía eléctrica.
3. Proponer mantenimientos programados basados en la confiabilidad dentro de un plan que disminuya fallas de equipo y pérdidas de tiempo para la generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero.



## **RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO**

La presente investigación se desarrolló buscando solución a los problemas de pérdida de tiempo debido a fallas en equipos eléctricos en el proceso de generación de energía eléctrica esta investigación es no experimental porque no se utilizarán ensayos de laboratorio para determinar información a ser utilizada en el proyecto planteado y tampoco manipulan variables en laboratorio, la metodología de la investigación tiene un enfoque mixto con un diseño no experimental teniendo un alcance y tipo descriptivo tomando una muestra de los equipos a evaluar por medio de una selección estadística de la muestra.

El alcance de la investigación es descriptivo, porque se tiene al alcance informes, documentos los cuales permiten evaluar el estado y el funcionamiento en la operación de los equipos a intervenir.

Desde la perspectiva del estudio de investigación se aportó al departamento de cogeneración del ingenio, una propuesta de mantenimientos basados en la confiabilidad proactiva en equipos críticos de la planta de generación eléctrica.

Para determinar la información necesaria tanto en la operación como en los mantenimientos predictivos, preventivos y correctivos, se usó el método científico en tres fases:

- Indagadora: se utilizó a través de todos los colaboradores involucrados en la operación y mantenimiento, ya que ellos son la fuente primaria de información la cual permita diagnosticar la situación actual de los equipos

y procesos. Como fuente secundaria se cuenta con libros de texto, manuales y documentación recabada a cada equipo.

- Demostrativa: con esta fase se demostró la validez de los planteamientos establecidos en esta investigación y si los datos corresponden a la realidad, mediante una comparación entre los elementos teóricos y prácticos por medio de la investigación.
- Expositiva: se utilizó esta fase por medio de la presentación del informe final detallando los hallazgos, conclusiones y recomendaciones.

Por medio de las fases se explica la metodología involucrada en el proceso de investigación:

- Primera fase. Investigación bibliografía y recolección de información teórica. Se realizó entrevistas a cada colaborador que tenga que ver con el funcionamiento de los equipos, tales como operador, técnico en mantenimiento, técnico supervisor para tomar la línea acerca de la investigación del problema planteado. Se recabaron documentos para efectuar análisis acorde a los objetivos planteados, se realizó investigación en bibliografías de manuales del equipo, así como los datos tomados en las últimas 3 zafras que se tienen registro con parámetros medibles para observar las variaciones con respecto al funcionamiento de los equipos.
- Segunda fase. Se realizó la recolección de registros acerca de mantenimientos elaboradores a cada equipo. En esta fase se evaluó los tipos de mantenimientos basados en la confiabilidad, preventivos que se les ha dado a los equipos en el transcurso de los últimos dos años, se analizó la periodicidad de estos y se evaluaron las fallas de diferente índole ocurridas en los equipos eléctricos tomados en la muestra. Para esto se tomó una muestra de equipos a evaluar según el estadístico maestro.

- En la tercera fase. Responde a la elaboración de mantenimientos basados en la confiabilidad proactiva y sus revisiones en cada equipo a evaluar. Se utilizaron resultados de cada análisis de vibraciones, imágenes termografías y ultrasonido donde aplique, elaborando indicadores para medir la eficiencia.
- Cuarta fase. Se analizó el sistema de mantenimiento basados en la confiabilidad arrojados en los primeros dos meses de haber iniciado la investigación, con cada indicador planteado.
- Quitan fase. Se realizó una corrección a los mantenimientos basados en la confiabilidad proactiva y la evaluación de los indicadores planteados. Para la realización de la investigación se tomará 12 de 27 de equipo críticos que afecten la eficiencia del área de cogeneración, estos fueron tomados por medio del estadístico maestro con N mayor a 30 de la población.

Indicador para evaluar el funcionamiento de los equipos va enlazado con el tiempo perdido de la operación de los equipos y del sistema productivo en general.



## INTRODUCCIÓN

El trabajo consiste en la presentación de un plan práctico y teórico para la elaboración de un mantenimiento basado en la confiabilidad a equipos eléctricos de una planta generadora de energía eléctrica con el cual se pretende minimizar o eliminar las fallas provocadas a los activos por falta de mantenimiento o por mantenimientos que no se registran en las curvas de seguimiento a los mismos se debe de verificar que estos se estén cumpliendo con normalidad y frecuencia según lo determinado para cada equipo o área según su criticidad en el sistema operativo o importancias del correcto funcionamiento de la planta, se puede implementar y ejecutarlas llevando un registro para implementarlas en todos los equipos que sean parecidos, esto para evitar pérdidas de tiempo en el proceso de generación eléctrica y de vapor que se pudieron haber detectado y corregido a tiempo por medio de un sistema plan de mantenimientos por condición del equipo eléctrico debidamente programado.

La investigación es realizada por medio técnicas mantenimientos predictivos basados en la confiabilidad o sea técnicas que revisan la condición de los activos uno de los objetivos es mejorar los indicadores de la operación de los equipos eléctricos y proporcionar ahorros económicos y energéticos a través del mejoramiento del indicador de pérdidas de tiempo ocasionado por las fallas eléctricas ocasionadas por un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, si esto no se cumple puede estos repercuten con disparos, bajar carga o perder carga en los turbogeneradores, además hacer que el uso del plan de mantenimiento puede alargar la vida útil, el funcionamiento de los equipos que están involucrados en sistema productivo y que son catalogados como críticos en su funcionamiento por tal motivo se realizan chequeos constantes a las

condiciones de operación de los equipos, además se obtuvo una operación segura para resguardar la vida de las personas por posibles fallas.

En la toma de datos fue necesario la utilización de equipo especializado para la toma de vibraciones, ultrasonido, cámara termográfica y hubo necesidad en casos de usar un medidor de aislamiento para poder llevar registro desde el arranque de los equipos crear una línea base y así poder ir comparando en el tiempo los cambios que por condiciones se presentan, estos cambios son indicación que algo está ocurriendo y es donde se tiene que tomar acciones para corregir los mismos, por ejemplo en una vibración alta en un motor pueda ser que el cojinete este ya presentando fallas o bien un desbalance estos cambios tienen que ser analizados por personal calificado para la interpretación gráfica de las tendencias.

Para crear un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad se utilizaron datos como la criticidad de cada equipo y técnicas de intervención sin con esta técnica se analizó la causa raíz de los problemas que ocasionaban las salidas de línea y las pérdidas de tiempo en el proceso, con esto se logró hacer una matriz de identificación de fallas y verificar la severidad y repetividad con la que ocurrían, teniendo en cuenta lo anterior se diseñó un cronograma de actividades en el cual se controlan las variables que afectan el funcionamiento de los equipos como lo son: vibraciones, termografía, variables eléctricas, ultrasonido y limpieza de los mismos, con la gestión del control de calidad en los mantenimientos se ofrece a la empresa disminuir las pérdidas de tiempo por fallas que se puedan corregir a tiempo basado en las condiciones de operación.

## **1. ANTECEDENTES**

Relacionar la investigación con el tema referente al desarrollo de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva según Herrera (2016) menciona que la metodología e implementación de un programa de gestión de mantenimiento es un de análisis sistemático, objetivo y además documentable que se puede aplicar a cualquier tipo de instalación industrial, la teoría y la documentación para realizar la base de la investigación es sustentada en técnicas aplicables en la industria y que se lleve control de los cambios de condiciones de los equipos.

Salguero (2007) menciona “La adopción de un sistema de mantenimiento debe de ser decisión estratégica de la organización. Para que los procesos y personas involucradas estén alineadas en el objetivo de la empresa” (p.16). Para adoptar un equipo que trabaje para lograr dichos objetivos en la elaboración de los planes de mantenimiento, el diseño e implementación del sistema de mantenimiento basado en la confiabilidad de una organización está influenciado por diferentes necesidades y objetivos, que la empresa sea la punta de lanza en la implementación.

Así mismo el mantenimiento basado en la confiabilidad operacional de las plantas de generación eléctrica según García (2004) en su investigación dice:

Se evoluciona de mantenimiento de primera generación en donde solo se hacía correctivo hasta nuestros días donde el mantenimiento está basado en la confiabilidad la cual se puede catalogar como un mantenimiento de

cuarta generación, para el análisis de la información de falla utiliza métodos estadísticos para evaluar los riesgos. (p. 211)

En esta investigación podemos concluir que es necesario llegar al nivel cuatro del mantenimiento llegando a la confiabilidad.

Con el sistema de mantenimientos basados en la confiabilidad según Torres-Arcique (2010) menciona en su investigación que los datos recopilados serán aplicables con una base estadística de repetición de fallas en los equipos en los cuales se va a hacer el análisis de la periodicidad de ocurrencia con fórmulas e indicadores para interpretar los datos como MTTF, MTBF, curva PF” con los datos de análisis se puede gestionar un cuadro de indicadores para mostrar los avances y con esto poder mostrar avances y tendencias.

Por otra parte, Reyes (2009) en su investigación de plan de mejoramiento de la gestión de mantenimiento define “la gestión de mantenimiento como: Proponer un plan de mejoramiento de la gestión de mantenimiento mediante los parámetros fundamentales y críticos de los procesos involucrados en el proceso productivo del sistema integral del mantenimiento” (p. 233).

Así mismo, Peña (2016) en su investigación menciona la importancia de los modelos de gestión de mantenimiento:

El modelo de gestión de mantenimiento en las plantas generadoras nace debido a la necesidad de mantener disponibles y confiables a los equipos de generación de energía eléctrica, entendiendo el proceso de producción

se identifican los equipos principales utilizando métodos disponibles para evaluar la criticidad de cada equipo seleccionando. (p. 58)

Como tendencia esta investigación muestra la necesidad de un modelo de gestión de mantenimiento basado en la confiabilidad es la clave para la optimización y eficiencia de la energía eléctrica un análisis de datos de falla define El análisis de datos de falla permite encontrar los índices de confiabilidad de un sistema ya que es posible: Conocer que tan confiable o seguro será un sistema durante su futura vida operativa es posible en parte mediante la evaluación de la confiabilidad.

Con el teorema estadístico de fallas de Weibull se puede encontrar la criticidad de cada una de las fallas que cuenten con datos estadísticos y así determinar la periodicidad de falla y recomendar mantenimientos anticipados o bien el reemplazo por una unidad nueva tomando en cuenta el costo beneficio que esto puede ocasionar.

Aguilar-Otero (2010) concluye e indica que la metodología de Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA o AMFEC), es el cuello de botella en el todos los procesos de planeación de la gestión de mantenimiento, por lo que se debe entender claramente y aplicar por personal capacitado o con suficiente experiencia, es la metodología más simple, que de forma clara y concisa permite entender la forma en la que opera un sistema, pero sobre todo la forma en la que falla, se identifican las mejores oportunidades para el mantenimiento, tener claro estos conceptos se hace el análisis de riesgo para cada uno y se termina la criticidad de cada equipo y el impacto que tiene en la realización del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad.

Se tiene en cuenta que el análisis modal de fallos y efectos, conocido por sus siglas AMFE, es una metodología analítica estructurada que sirve para adelantarse e identificar los fallos que pueden surgir en el proceso de creación de un producto o sistema y de este modo, al igual que la ingeniería forense, evitarlos.

## **2. MARCO TEÓRICO**

Proporcionar teoría del marco teórico para fundamentar la investigación y proporcionar al maestrando una idea clara y concisa acerca del tema de centrales de generación de energía eléctrica en ingenios azucareros y la necesidad de desarrollar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad es el objetivo del marco teórico; a continuación, se encontrará teoría apegada a las necesidades planteadas.

### **2.1. Industria azucarera en Guatemala**

Según datos histórico la industria azucarera en Guatemala tiene sus inicios en el siglo XVII, se comenzó a plantar caña en la región de la costa sur y centro de Guatemala en el año de 1536, los trapiches que son la forma artesanal que inicialmente se construyeron en Guatemala, fueron construidos en el valle central de esta ciudad y a la vez en el departamento de Baja Verapaz, en el valle de Salamá durante el siglo XVI.

Además, “En el siglo XVII se inició la producción azúcar con trapiches tradicionales, pero a mediados del siglo XIX, Guatemala inició a exportar una pequeña cantidad de azúcar” (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, 2012, p. VIII).

En 1957 fue fundada la Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA), con el fin de solucionar problemas en la producción de azúcar y desarrollar programas para animar la mejora, tecnificar y hacer

eficiente la industria azucarera del país, en 1960, Guatemala recibe su primera cuota para exportar azúcar hacia Estados Unidos, fue de esa manera como la industria del azúcar de Guatemala cambió de ser una industria de comercialización local, convirtiéndose en una industria de exportación y pasó a formar parte de las actividades agrícolas industrializadas más importantes para el país. (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, 2012, p. VIII)

Según se tiene conocimiento en los ingenios de Guatemala el sistema, productivo en fábrica, campo y generación se parte en dos temporadas que caracterizan al plan azucarero, la temporada de zafra y la temporada de no zafra, cada temporada tiene una duración de 180 días aproximadamente, la temporada de zafra se caracteriza por ser el periodo productivo de un ingenio y corresponde del mes de noviembre al mes de abril de cada año.

Tomar como referencia las fechas calendario donde se cosecha el cultivo de caña de azúcar proveniente de los campos y es procesada por los diferentes equipos hasta su salida como productos finales para comercialización, dichos productos son el azúcar, melaza y energía, pero también en la época de no zafra la producción de energía se puede llevar a cabo con otros materiales que se utilizan como combustible como por ejemplo el carbón mineral o bien el chip de leña, esto para poder siempre estar disponibles en la venta de energía eléctrica como lo dice el reglamento del mercado de mayoristas AMM.

Por temas de planeación climática la temporada de no zafra corresponde del mes de mayo a octubre de cada año, sembrando la caña que se procesara en la temporada de zafra y tiene como principal finalidad dar el mantenimiento a

todos los equipos involucrados en los procesos de la fabricación de azúcar con el desmontaje, reparación y mejoras a equipos para la siguiente temporada productiva, en esta temporada se aprovecha para realizar mantenimientos exhaustivos y velar por mejoras en todos los componentes.

Además, es oportuno describir que la industria azucarera en Guatemala es una de las más productivas en la región, en los inicios de la ampliación del subsector eléctrico y apertura de sus puertas a la inversión privada, estos fueron parte de los pioneros a participar y aportar en el crecimiento y abastecimiento de energía eléctrica al SNI, debido a que estos contaban con infraestructura y recursos para su explotación como parte de su proceso productivo". "La agroindustria Azucarera de Guatemala se ha ubicado como el tercer exportador más importante de Latinoamérica después de Brasil y Cuba y dentro de los ocho exportadores mayores del mundo. (Pérez y Lawrence, 1997, p. 2)

#### **2.1.1. Producción de azúcar y sus productos**

Cuando la producción de azúcar da inicio en los trabajos para la preparación del suelo, se realiza la siembra y posteriormente la cosecha de la caña, en esta etapa bajo las condiciones climatológicas como la lluvia y las estaciones solares, cantidad y tipo de nutrientes en el suelo y las atenciones o cuidados que se den al cultivo se verán reflejados en la calidad de la caña teniendo en cuenta mecanismos para corte de caña y las diferentes fechas de maduración de la caña y la cantidad de azúcar contenida en la caña.

Guatemala en el período de cosecha de la caña (período de zafra) comprende del mes de noviembre de cada año, hasta el mes de mayo del siguiente año aproximadamente, durante el período de zafra se realiza la extracción y transformación de la sacarosa o comúnmente llamada azúcar de la caña.

### **2.1.2. Preparación de caña**

Según Rein (2012), uno de los objetivos principales de preparar la caña antes de su entrada a los molinos son reducir el tamaño de las células portadoras de azúcar para facilitar la extracción de azúcar, con un tamaño que permita su adecuada manipulación en el proceso de extracción y cumplir también con los requerimientos de molienda, además entre mejor preparada esté la caña desfibrada mejor es el proceso de extracción se puede extraer más azúcar.

### **2.1.3. Molienda de caña**

En este proceso se separa el jugo de las fibras de la caña después de la preparación de esta. Rein (2012) define el término extracción como el utilizado para expresar el porcentaje de sacarosa que ha sido extraído de la caña en los molinos y es igual a la sacarosa en el jugo crudo y diluido, expresada como porcentaje de la sacarosa en caña.

Para iniciar el proceso en los molinos la caña es exprimida utilizando elevadas presiones entre pares de mazas consecutivas. Su diseño contempla la extracción de tanto jugo como sea posible de las fibras de caña que salen de la desfibradora. El residuo de la caña a su salida de los molinos después de la extracción de jugo es denominado bagazo, y es aprovechado como combustible en las calderas, este bagazo o biomasa se quema en las calderas de vapor para

la generación de vapor que mueven a los turbogeneradoras y luego de este trabajo para la generación de energía eléctrica pasan a hacer trabajo a baja presión al proceso productivo de la fábrica.

Se tiene en cuenta que el proceso de extracción y recuperación del azúcar dentro de las instalaciones del ingenio, inicia con la recepción de la caña en grandes contenedores metálicos acondicionados para su transporte, seguro y eficiente, conocidos como jaulas, haciéndola pasar por básculas donde se pesa para poder cuantificar la cantidad de caña recibida en un período determinado y así medir el ritmo de molienda diaria, que es uno de los indicadores principales que se manejan dentro de la industria azucarera nacional, con esto se determina la capacidad del proceso de cada ingenio y a su vez determinar el tamaño o capacidad de producción.

#### **2.1.4. Manejo y calentamiento de jugo**

Por lo anterior descrito el jugo resultante del proceso de molienda está constituido principalmente por agua, sacarosa y no azúcares. Este jugo es captado a la salida de cada molino y por medio de un sistema de bombas es enviado hacia la fábrica. Este jugo pasa por una serie de filtros y calentadores para hacer más eficiente la transferencia de calor al evaporar el agua contenida en el jugo y crear las reacciones necesarias para la separación de sólidos disueltos en el jugo y los colores necesarios para cada presentación de azúcar.

#### **2.1.5. Clarificación**

En el proceso de clarificación se lleva el jugo que previamente ha sido filtrado, calentado y aplicado químicos para modificar la alcalinidad del jugo proveniente de los molinos a un clarificador de bajo tiempo de retención en donde

las impurezas se precipitan por gravedad. En este proceso se refuerza con la adición de floculante que al entrar en contacto con impurezas en el jugo las aglomera y las precipita al fondo del clarificador para su extracción (Hugot ,1986).

A continuación, los sedimentos contenidos en el fondo del clarificador son conducidos a una estación de filtros donde con agua caliente se les extrae jugo que aun contiene azúcar, jugo que es reprocesado en los clarificadores. De este proceso es extraída la cachaza la cual es usada para compostaje y abonos orgánicos, estos compostajes y abonos son aprovechados en la fertilización de los campos para agregar nutrientes

#### **2.1.6. Evaporación**

Por su parte la evaporación es una operación esencial en las fábricas de azúcar, esta determina la eficiencia energética de la fábrica. En esta operación se incrementa la concentración

Poder describir el proceso de fabricación de azúcar como comúnmente se conoce, al proceso industrial de elaboración de azúcar en 8 grandes etapas principales, como se ilustra en la figura 1.

#### **2.1.7. Pasos para el proceso de producción de azúcar**

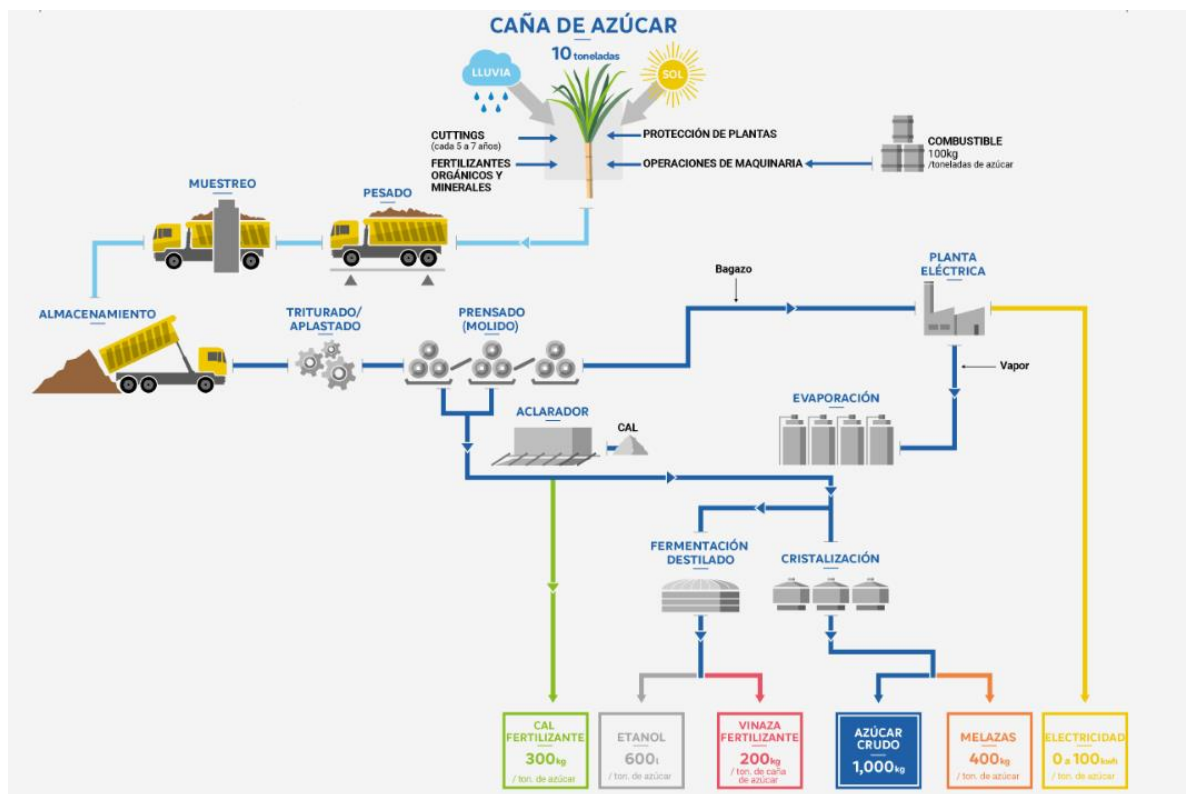
- Recepción de caña
- Lavado de caña (limpieza de materiales extraños)
- Preparación de caña (picado o desfibrado)
- Extracción (molinos)
- Clarificación de jugo
- Evaporación

- Cristalización (concentración de sacarosa y formación de cristal de azúcar).
- Centrifugado (separación del cristal de azúcar de las mieles)

Cada una de las etapas listada anteriormente lleva una serie de procedimientos complejos, los cuales implican, cálculos y diseños de ingeniería.

**Figura 2.**

*Proceso de producción de azúcar*



Nota. Fabricación del azúcar SUCDEN S&D S.A. (2021). *Diagramas de flujo del proceso.*

(<https://www.sucden.com/es/products-and-services/sugar/process-flowcharts/>) consultado el 18 de agosto 2022. De dominio público.

En otros términos, los subproductos obtenidos de la fabricación de azúcar son diversos, estos subproductos debido a los avances tecnológicos y estudios realizados por el sector azucarero a nivel mundial se han sabido aprovechar, optimizando de esta manera los recursos y disminuyendo efectos adversos al ambiente.

Desde la utilización y aprovechamiento del bagazo de la caña, producto del proceso de molienda y la extracción, este subproducto tiene una cantidad de energía calorífica que es usada como combustible en calderas para la generación de vapor, donde este vapor es aprovechado para la producción de electricidad, evaporadores y cristalizadores. (Chen, 1991, p. 18)

En efecto el producto conocido como cachaza para producir llamado compost, para la fertilización del suelo y la cogeneración para el abastecimiento de los procesos de la fábrica.

Como subproductos se pueden listar los siguientes:

Subproductos de la elaboración de azúcar

- Bagazo de caña (biomasa)
- Cachaza
- Miel final
- Vapor de agua
- Energía eléctrica
- Alcohol
- Gas metano

- Biomasa
- Vhp
- Azúcar refino
- Azúcar moreno
- Azúcar estandar

## **2.2. Recursos utilizados en el proceso de fabricación de azúcar**

Cuando se discute de recursos, podemos decir que es una serie de elementos disponibles que pretenden cubrir las necesidades de una persona o grupo de personas. Los recursos utilizados para producir azúcar son diversos, como todo proceso de producción para poder producir un bien o servicio se tienen insumos.

Fabricar azúcar tiene como recurso importante el uso de la energía eléctrica y agua. Estos recursos son tangibles y se les da seguimiento a diario para poder hacer eficiente el uso de cada uno de ellos, es la razón por la cual se ha pensado en la elaboración de esta investigación hacer que los equipos sean confiables y evitar salidas de línea y con ello pérdidas energéticas en los procesos productivos (Peter Raim 2012).

### **2.2.1. Recursos para producción de azúcar**

A partir de los recursos para la producción de azúcar pueden ser naturales y de producción interna y externa tal es el caso de la energía eléctrica la cual el ingenio puede ser auto productor, el agua es un bien intangible el cual se cuida y se recircula, el aire comprimido se produce con compresores, los productos químicos se adquieren para la producción del azúcar y el vapor es un ciclo del agua.

- Energía eléctrica
- Agua
- Materia prima caña de azúcar
- Aire comprimido
- Productos químicos
- lubricantes
- Vapor

### **2.2.2. La energía eléctrica como recurso del proceso productivo de azúcar**

Como toda industria, la agroindustria en especial los ingenios utilizan energía eléctrica en grandes proporciones.

En la historia de la humanidad y más para el año 2022 la energía eléctrica se ha convertido en los países desarrollados una forma imprescindible debido a su gran versatilidad, controlabilidad e inmediatez en su utilización y a la limpieza en el punto de consumo. En el ámbito residencial se emplea para proporcionar toda clase de servicios, desde los básicos hasta a los asociados al ocio y a un sinfín de comodidades, el uso de la electricidad está extendido en los ámbitos comercial a industrial; alumbrado, climatización, motores eléctricos con multitud de aplicaciones en industrias con una utilización específica e intensiva de la energía eléctrica. (Pérez y Rivier, 2002, p. 198)

Para los ingenios azucareros en Guatemala, la electrificación ha sido uno de los avances tecnológicos más importantes que ha tenido, debido al uso en grandes cantidades de energía que se necesita para su proceso, en su aplicación como fuerza motriz, para los movimientos y transmisión de potencia a los equipos con que se procesa la caña.

### **2.2.3. La cogeneración a partir de biomasa (bagazo de caña)**

Además, la cogeneración es la producción de electricidad a partir de una fuente energética (combustible) o energía térmica (vapor de agua), que es resultado de un proceso, entiéndase la fuente energética como un subproducto de la fabricación de determinado producto.

En el artículo 1 del reglamento de la ley general de electricidad, definiciones del reglamento de la ley general de electricidad, se define a un cogenerador como; propietario de instalaciones de producción de energía que la utiliza para uso propio y tiene excedente para la venta a terceros. (Congreso de la República de Guatemala, 1996, p. 21)

Existen diferentes industrias y agroindustrias que cuentan con este tipo de fuente de energía, como subproducto de sus procesos productivos. Dentro de la agroindustria pueden nombrarse: los beneficios de café, las plantas procesadoras de palma africana para producir aceites vegetales y la industria azucarera que procesa la caña de azúcar. Para los ingenios azucareros esta fuente energética se obtiene de la biomasa, conocida como bagazo, esta es una fuente energética considerada como biomasa

y se clasifica como fuente de energía primaria renovable dentro de la legislación nacional. (Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía, 2018, p. 5)

Como se ha detallado en los ingenios azucareros de Guatemala, la cogeneración ha tenido un desarrollo y una evolución sostenida; este impulso se ha dado por la generación secundaria de un subproducto, que pasó de ser un desecho a ser biomasa en cantidades abundantes, con un poder calorífico aprovechable que lo convierte en una fuente primaria de energía como combustible para las calderas de los ingenios. (Muñoz, 2014, p. 362)

La cogeneración de alta eficiencia engloba un conjunto de tecnologías de transformación energética que permiten la producción simultánea de energía eléctrica y de calor útil de una forma eficiente, ahorrando costes.

**Figura 3.**

*Planta de generación con base en biomasa*



*Nota.* Planta de generación eléctrica. Elaboración propia 2022.

En la imagen que se presenta es la planta de generación donde se realizó el trabajo de implementación de un plan de mantenimiento apegado a la confiabilidad proactiva.

#### **2.2.4. Los inicios de los ingenios en la generación y su aporte la matriz energética nacional**

Como se ha expuesto la generación con biomasa de la industria azucarera en Guatemala se dio en la década de los ochenta. En el año de 1986 los ingenios iniciaron la generación de energía a base de biomasa para su suministro y la comercialización de energía al sistema nacional interconectado del país. Luego entre 1991 y 1995 se suscribieron 33 contratos por 15 años, de energía eléctrica entre el INDE y la EEGSA con empresas privadas, entre estas las del sector azucarero.

En su inicio la generación con biomasa en los ingenios con modificaciones a sus calderas, el primer ingenio en generar electricidad para el sector eléctrico fue Pantaleón. Estas primeras inversiones fueron un gran paso para el cambio del modelo eléctrico, adicional a esto las inversiones implicaron un riesgo alto para los cogeneradores, debido a la incertidumbre sobre el futuro del sector eléctrico entre 1993 y 1996, además la generación a base de biomasa permitió que hubiera oferta energética todo el año, pues las calderas de los ingenios podían suministrar electricidad durante la temporada seca y, además, podían aportar en cualquier momento tomando en cuenta las curvas de arranque de las mismas.

### **2.3. La operación de las plantas de energía eléctrica de los ingenios azucareros**

Como se ha citado en las páginas anteriores el ciclo de producción de energía en los ingenios obedece a dos estaciones la de zafra y no zafra, en la estación de operación de zafra se produce energía a base de biomasa en los turbogeneradores de escape que también los ingenios azucareros tienen turbogeneradoras de ciclo *condensing* y ciclo combinado en el cual aporta escape para el proceso productivo del azúcar como también se mantiene con condensado para la circulación de agua y un mejor aprovechamiento de esta.

En la etapa de no zafra se tiene programas de mantenimiento para los equipos principales y auxiliares de todo el proceso, estos equipos se mantienen monitoreados en la etapa de zafra con varias técnicas de mantenimiento las cuales son las que se necesitan hacer un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad y riesgo.

**Figura 4.**

*Generador y turbina generación con biomasa*



*Nota.* Generador eléctrico. Elaboración propia.

Generador de planta eléctrica un generador SIEMENS de 62.4 MW, el cual concentra equipos críticos los cuales se les hace un plan de mantenimiento, los equipos críticos de este activo son sensibles a los cambios de parámetros eléctricos, los generadores constan de dos puntos fijos depende de la marca que se tiene chumacera, o cojinete en los cuales se puede tomar temperatura y vibraciones para monitoreo.

### **2.3.1. Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que

falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza. (López, 2016, p.16)

Según la teoría anterior esta indica la importancia el mantenimiento predictivo para la gestión de la planta se puede mantener equipos en línea y sacarlos dependiendo de las necesidades requeridas de las condiciones de falla o mantenimientos programados todas las intervenciones de estos se debe a una programación adecuada para cada equipo.

### **2.3.2. Mantenimiento correctivo**

“Conjunto de actividades que son propios a la corrección de fallas y anomalías en los equipos tanto de medida como de fuerza a medida que se van presentando y con la maquinaria fuera de servicio” (García, 2006, p. 9). Este mantenimiento es más común realizarlo de emergencia, debido a que ya se produjo la falla y el equipo se paró de trabajar, la idea principal de este trabajo investigación es evitar o minimizar este tipo de mantenimiento puesto que es de considerable costo económico tanto para la producción como para el manteniendo como tal.

Además, el mantenimiento correctivo en instalaciones eléctricas consiste en realizar intervenciones periódicas programadas con el fin de evitar y disminuir la cantidad de fallos que puedan sufrir las instalaciones eléctricas y asegurando la protección de las instalaciones y de los trabajadores.

Se toma en cuenta que el mantenimiento correctivo es una actividad que se lleva a cabo para reparar el daño encontrado durante el mantenimiento preventivo. En general, no se trata de un conjunto de acciones planificadas, ya

que se realiza cuando un componente ha sido dañado. Su objetivo es restaurar la confiabilidad del sistema y devolverlo a su estado original.

El mantenimiento correctivo también se conoce como mantenimiento de descomposturas y solo tiene lugar cuando alguna máquina no funciona. Si esta estrategia es empleada como la principal habrá un alto impacto de las actividades de mantenimiento no planificadas y de reposición de partes del inventario.

**Figura 5.**

*Cambio de cojinete de motor eléctrico, mantenimiento correctivo*



*Nota.* Mantenimiento a motor eléctrico se le hace un cambio de cojinetes. Elaboración propia.

En la imagen 5 se muestra un motor desarmado, este mantenimiento se está realizando cambio de cojinetes, antes de tomar esta decisión de intervenir

se le hizo pruebas de monitoreo de condición para determinar lo que se necesita hacer cambio y, además se revisaron los cojinetes y embobinados para tomar y una idea de cómo se ha estado trabajo y si es necesaria la intervención.

### 2.3.3. Mantenimiento preventivo

López (2016) “Este tipo de mantenimiento surge de la necesidad de rebajar el correctivo y todo lo que representa. Pretende reducir la reparación mediante una rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos dañados” (p.18).

Como bien indica López en la cita anterior la importancia del mantenimiento preventivo se da con la necesidad de minimizar los paros debido a fallas ocasionadas y que recurren al mantenimiento correctivo, la necesidad de mejorar cada vez más los indicadores es necesario de mejorar los procesos de reparación y monitoreo de los equipos.

**Figura 6.**

*Mantenimiento preventivo, seguimiento a temperaturas*



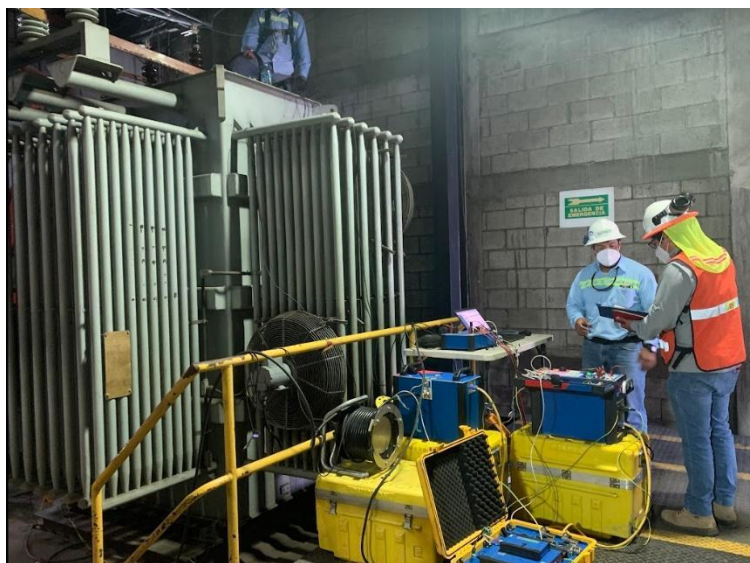
*Nota.* Cámara termográfica. En esta imagen se muestra una Cámara termográfica evaluando una tubería de agua., Elaboración propia, usando programa Fluke.

#### 2.3.4. Mantenimiento periódico

“Consiste en dar el mantenimiento o revisión al equipo en forma integral a todo el conjunto simultáneamente, después de un lapso de trabajo de tiempo determinado” (García, 2006, p. 9). El mantenimiento periódico considera que la probabilidad de cambios en las características físicas de los componentes se incrementa a partir de cierto número de horas de trabajo y deberán ser cambiados sin importar su estado, así como estos mantenimientos también se puede realizar inspecciones de estado la cuales son programadas periódicamente, así como se puede observar en la figura siguiente donde se muestra la realización de pruebas eléctricas a transformador de potencias de 2MW.

**Figura 7.**

*Mantenimientos periódicos a transformadores*



*Nota.* Pruebas eléctricas. Elaboración propia.

Pruebas eléctricas a transformadores de potencia son equipos eléctricos crítico que sirven para la operación, estos equipos además de ser críticos son estacionarios lo cual se puede verificar temperatura, ultrasonido y técnicas de

monitoreo a condiciones de aceite como análisis fisicoquímico y análisis cromatográfico de aceite, en el cual se puede ver tendencias de comportamiento de partícula y gases.

## **2.4. Procedimientos de mantenimientos predictivos**

Según se identifica el mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento que relaciona una variable física con el desgaste o estado de una máquina. El mantenimiento predictivo se basa en la medición, seguimiento y monitoreo de parámetros y condiciones operativas de un equipo o instalación. A tal efecto, se definen y gestionan valores de pre-alarma y de actuación de todos aquellos parámetros que se considera necesario medir y gestionar. (Moreno, 2018, p.10)

Además, las técnicas predictivas son las siguientes: análisis de vibraciones, baroscopio, termografía, análisis de aceites, control de espesores en equipos estáticos, inspección por ultrasonido, estas técnicas son herramientas que se utilizan para monitoreo y registro de las condiciones de los equipos, se tienen que hacer un registro de las mediciones para poder obtener un seguimiento al y una tendencia y con esto poder predecir las fallas.

### **2.4.1. Análisis de vibraciones**

“Esta técnica de mantenimiento predictivo se basa en el estudio del funcionamiento de las máquinas rotativas a través del comportamiento de sus vibraciones. Todas las máquinas presentan ciertos niveles de vibración, aunque se encuentren operando correctamente, sin embargo, cuando se presenta alguna

anomalía, estos niveles normales de vibración se ven alterados indicando la necesidad de una revisión del equipo” (Olarte et al. 2010, p. 224). Con lo anterior es muy importante determinar los puntos de las máquinas en donde se tomarán las mediciones y el equipo analizador más adecuado para la realización del estudio.

En planta se cuenta con técnicos especializados en técnicas de vibraciones estos cuentan con certificación para con nivel II según norma ANSI, además se cuenta con técnicos de campo los cuales son los encargados de recopilar los datos para el análisis, como medida de seguimiento en línea se puede contar con sensores colocados en puntos estratégicos de los equipos, por ejemplo en la cola y punta del motor tanto en el eje horizontal como vertical, estos sensores puedes enviar señales a una HMI la cual registra cada segundo o depende de cuanto se haya programado para hacer graficas de tendencia.

#### **2.4.2. Termografía**

Como técnica principal que estudia el comportamiento de la temperatura de las máquinas con el fin de determinar si se encuentran funcionando de manera correcta. La energía que las máquinas emiten desde su superficie viaja en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz; esta energía es directamente proporcional a su temperatura, lo cual implica que, a mayor calor, mayor cantidad de energía emitida. Debido a que estas ondas poseen una longitud superior a la que puede captar el ojo humano, es necesario utilizar un instrumento que transforme esta energía en un

espectro visible, para poder observar y analizar la distribución de esta energía. (Olarte *et al.*, 2010, p.224)

Una cámara termográfica es una herramienta importante para el monitoreo de condición de los equipos con ello se puede dar seguimiento los cambios que sufren con respecto a la temperatura que emana de los equipos observados, con ellos se crea rutinas de chequeo para poder observar los cambios térmicos que dependen de carga y en puntos específicos de rozamiento, para hacer una toma con el equipo se debe de tener cierta capacitación en ello para poder graduar la cámara a la temperatura de trabajo y así estar en parámetro legibles del lente, con esto se crea registro y reporte para hacer informes de seguimiento.

#### **2.4.3. Ultrasonido**

El análisis por ultrasonido está basado en el estudio de las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por las máquinas cuando presentan algún tipo de problema. El oído humano puede percibir el sonido cuando su frecuencia se encuentra entre 20 Hz y 20 kHz, por tal razón el sonido que se produce cuando alguno de los componentes de una máquina se encuentra afectado, no puede ser captado por el hombre porque su frecuencia es superior a los 20 kHz. Las ondas de ultrasonido tienen la capacidad de atenuarse muy rápido debido a su corta longitud, esto facilita la detección de la fuente que las produce a pesar de que el ambiente sea muy ruidoso. (Olarte *et al.*, p.225)

Cuando se realiza una rutina analizando ultrasonido se pueden detectar fricción en válvulas rotativas, fugas en válvulas, fugas de vapor o algún fluido, etc., es importante hacer un corrido en la puesta en marcha o luego de hacer mantenimiento a los equipos para tener una línea base en la cual se puede trabajar y con esta hacer comparativos para tener las tendencias de esta.

## **2.5. Equipos para mantenimientos basados en la confiabilidad proactiva**

Para poder realizar un mantenimiento predictivo no se debe interrumpir el proceso productivo de las máquinas, es por eso se utilizan equipos para la toma de datos de cada uno, a continuación, se detallan estos equipos:

### **2.5.1. Analizador de vibraciones**

Equipos como los analizadores de vibraciones son equipo especializado que muestra en su pantalla el espectro de la vibración y la medida de algunos de sus parámetros, estos parámetros son tomados por sensores de medición de velocidad, desplazamiento y aceleración los cuales se pueden hacer seguimiento con sensores instalados en los equipos o con equipos portátiles manipulados por técnicos especializados y certificados.

Para la utilización de los medidores de vibraciones en campo se debe de proporcionar con anticipación puntos donde se hace la medición con esto se asegura que siempre se esté midiendo en el mismo punto para poder obtener tendencias de referencia y tendencia de poder así determinar las condiciones de los equipos.

**Figura 8.**

*Medidor de vibraciones portátil*



*Nota.* Imagen de equipo portátil para monitoreo de vibraciones. Elaboración propia.

Equipo de monitoreo de vibraciones portátil para inspecciones rápidas. Equipo para mediciones puntuales de vibraciones en equipos activos, este equipo se utiliza para hacer medición de rutina horaria para controlar las condiciones de operación en el preciso momento que se hace la visita.

### **2.5.2. Cámara termográfica**

Innovación en la detección de anomalías es una cámara termográfica puesto que es una herramienta que se encarga de evaluar y comparar la temperatura de los equipos, para determinar su correcto funcionamiento a temperatura ambiente o de trabajo. Permite conocer el estado del equipo según el historial de las rutinas de toma de imágenes termográficas y predecir la falla sin interrumpir el proceso de producción de una manera no invasiva.

También se define como “un equipo que mide la radiación térmica de los cuerpos y la convierte en una imagen visible de varios colores los cuales están establecidos por su temperatura” (Olarte et al., p. 254).

Además, la termografía permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético utilizando cámaras térmicas. Con estas cámaras se convierte la energía que irradia un objeto, invisible al ojo humano, en una imagen visible formada a partir de la temperatura superficial de los objetos captados por la cámara. Además, El análisis termográfico permite encontrar áreas de exceso de calor, de modo que los problemas puedan corregirse antes de que provoquen un uso excesivo de energía, un aumento de los costes de mantenimiento, interrupciones del servicio, fallos importantes de los equipos.

Teóricamente la termografía infrarroja dice que: la termografía Infrarroja es una técnica, no destructiva, que permite medir temperaturas y tomar imágenes de alta resolución a distancia, sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, mediante la captación de la intensidad de radiación infrarroja que emiten los cuerpos.

**Figura 9.**

*Cámara termográfica*



*Nota.* Imagen termográfica. Elaboración propia, usando Paint.

Monitoreo de condición termográfica en paneles eléctricos, las inspecciones termográficas se pueden hacer cada 2 meses o bien cada vez que lo solicite el usuario, para la realización de las termografías se necesita mantener siempre los mismos patrones con los que se calibra la cámara para que no varíe la medida.

### **2.5.3. Medidor de ultrasonido**

Está basado en el estudio de las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por las máquinas cuando presentan algún tipo de problema. El oído humano puede percibir el sonido cuando su frecuencia se encuentra

entre 20 Hz y 20 kHz, por tal razón el sonido que se produce cuando alguno de los componentes de una máquina se encuentra afectado, no puede ser captado por el hombre porque su frecuencia es superior a los 20 kHz. (Olarte et al., p. 225)

Con estos medidores se puede oír el funcionamiento de los equipos a altas frecuencias sin estos equipos es imposible poder dar seguimiento a estos puesto que esos sonidos no son audibles para el oído humano, con estos equipos se puede hacer una línea base de su funcionamiento y así poder comparar las mediciones.

**Figura 10.**

*Medidor de ultrasonido*



*Nota.* Imagen de equipo toma de ultrasonido. Elaboración propia.

Equipo para monitoreo de vibraciones los cuales se pueden cargar en programa para revisar monitoreo en el tiempo y poder revisar el registro en caso de encontrar una falla.

## **2.6. Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)**

Se conocen las siglas RCM o bien llamado mantenimiento centrado en la confiabilidad, como lo indica su nombre, es una metodología muy eficaz que se utiliza para identificar todas las posibles causas que puede provocar un fallo en el sistema utilizando relaciones de causa y efecto.

Después de identificar todas las causas posibles, se puede determinar el mejor método de estrategia de mantenimiento para eliminar los fallos. La estrategia elegida debe garantizar el funcionamiento de los equipos y procesos asegurando la seguridad y la fiabilidad en la práctica, se identifican todos los modos de fallo, es decir, todas las formas posibles en que puede fallar el equipo, la maquinaria o el sistema y las distintas formas posibles en que puede producirse un fallo en un equipo determinado.

Según Zapata (2011) los fallos pueden tener más de una manera de presentarse, es decir, más de una forma que puede provocar efectos adversos similares en el sistema. para el sistema global, estos modos de fallo pueden identificarse dividiendo el sistema en subpartes o subsistemas. Estas subpartes se siguen desglosando hasta que se identifica un modo de fallo, esto lo podemos hacer con un análisis de causa raíz.

Otro concepto de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM hace hincapié en la adecuación de los activos individuales a las técnicas de mantenimiento que tienen más probabilidades de ofrecer resultados rentables,

en definitiva, es un marco completo que siempre intenta prolongar la vida útil de los equipos y reducir el tiempo de inactividad, de la forma más rentable posible el objetivo principal del RCM se entiende mejor analizando sus palabras raíz:

Confiabilidad: la cualidad de funcionar siempre bien. mantenimiento: Garantizar que los activos sigan funcionando como se desea. en esencia, proporciona una hoja de ruta para analizar y actuar sobre las causas fundamentales de los fallos de los equipos en busca de una mayor fiabilidad de los activos.

Por supuesto, el tiempo de inactividad es inevitable cuando se trabaja con multitud de piezas en la maquinaria con soluciones en muchas ocasiones difíciles. Sin embargo, las empresas de primer nivel utilizan el RCM para evitar averías imprevistas que requieren un mantenimiento complicado, una costosa subcontratación y la pérdida de tiempo de producción, cómo realizar un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Esta estrategia de mantenimiento fue desarrollada a principios de la década de 1970 por la industria de las aerolíneas comerciales con el fin de reducir el tiempo de inactividad por mantenimiento, los costes de mantenimiento y mejorar la seguridad de los vuelos.

También se ha empleado con éxito en la industria del cereal, la minera del carbón, las refinerías de petróleo, las plantas de gas y la industria del papel, aunque existe una gran variación y métodos diversos en la aplicación del RCM, la mayoría de los programas o procedimientos incluyen estos seis pasos básicos como punto de partida para realizar la implantación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad en tu empresa:

### **2.6.1. Pasos básicos para implantación de un plan de mantenimiento**

Paso 1: seleccionar un análisis RCM de activos, se elige un activo sobre el que realizar el análisis RCM. ¿Qué criterios debes utilizar para seleccionar el activo? Algunos factores a tener en cuenta son el grado de criticidad del activo para las operaciones, sus costes de reparación en el pasado y sus costes de mantenimiento preventivo anteriores.

Paso 2: describir las funciones del sistema para el activo seleccionado.

Como se describe es importante conocer las funciones del sistema, incluidas sus entradas y salidas, por pequeñas que sean. Por ejemplo, las entradas de una cinta transportadora son las mercancías y la energía mecánica que impulsa la cinta.

Paso 3: definir los modos de fallo.

Comprender las diferentes formas en que puede fallar el sistema. Por ejemplo, la cinta transportadora puede transportar la mercancía con la suficiente rapidez o no transportarla por completo de un extremo a otro.

Paso 4: evaluar las consecuencias del fallo.

¿Qué ocurrirá en caso de fallo? El fallo de un activo puede dar lugar a problemas de seguridad y a un mal rendimiento de la empresa.

También puede afectar a otros equipos. Los operarios de la planta, los expertos en equipos y los técnicos de mantenimiento deben trabajar juntos para identificar las causas fundamentales de los fallos de cada activo. Este proceso ayuda a determinar cómo priorizar las tareas.

### **2.6.2. Métodos para organizar el proceso de puesta en marcha de confiabilidad**

Análisis de Modos de Fallo y Efectos (AMFE): se trata de un método para evaluar el impacto de un fallo identificando dónde y cómo podría fallar un proceso. Por ejemplo, ¿qué haría que la cinta transportadora se ralentizara o dejara de funcionar?, Análisis de Modo de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC): es lo mismo que el AMFE. Pero va un paso más allá y crea vínculos entre los modos de fallo, los efectos y las causas de estos.

Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOPS): es un análisis sistemático de los procesos para identificar los problemas que pueden suponer un riesgo para el personal y los activos. En la mayoría de los casos, guía la revisión de los procedimientos operativos estándar.

Análisis del Árbol de Fallas (FTA): es una herramienta gráfica utilizada para examinar la causa raíz de una falla a nivel de sistema. Se utiliza para realizar una evaluación probabilística del riesgo.

Inspección Basada en Riesgo (RBI): es un proceso de toma de decisiones utilizado para optimizar los planes de inspección. Se utiliza sobre todo para examinar equipos industriales, como tuberías, recipientes a presión e intercambiadores de calor. siempre hay que dar prioridad a los modos de fallo más críticos para un análisis adicional. En realidad, se deben conservar los modos de fallo que pueden producirse en un entorno operativo real.

Paso 5: determinar una estrategia de mantenimiento para cada modo de fallo. en este punto, se selecciona una estrategia de mantenimiento para cada modo de fallo crítico. Debe ser factible tanto económica como técnicamente.

Puedes utilizar el mantenimiento basado en la condición (CBM), el mantenimiento preventivo o el mantenimiento predictivo. Si no puedes aplicar una estrategia determinada para un modo de fallo concreto, considera la posibilidad de rediseñar el sistema para modificar o eliminar el modo de fallo.

Paso 6: aplicar la estrategia y realizar revisiones periódicas. Para que tu programa de RCM sea eficaz, tienes que poner en práctica las recomendaciones de mantenimiento identificadas en el paso 5. Tras la aplicación, las revisiones periódicas ayudarán a mejorar los sistemas y el rendimiento. Sea cual sea la estrategia de mantenimiento que se decida utilizar para cada activo, se podrán generar datos adicionales que mejoren los sistemas.

**Figura 11.**

*Esquema mantenimiento basado en confiabilidad*



*Nota.* Estructura del mantenimiento basado en confiabilidad. Obtenido de Centro de Información Técnica para la Industria (2022) *Qué es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)* (<https://www.cursosaula21.com/que-es-el-mantenimiento-centrado-en-la-confiabilidad-rcm/>) consultado el 20 de agosto 2022. De dominio público.

En la figura anterior se presenta como ha evolucionado los mantenimientos en el tiempo hasta llegar al análisis de mantenimiento proactivo el cual tiene como base los análisis de causa raíz, los análisis de causa y efecto y sobre todo de las actividades de mantenimiento proactivo que son las técnicas que a lo largo de la investigación se ha estado mencionando y poniendo en marcha.



### **3. PRESENTACIÓN DE DATOS**

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en el transcurso de la investigación, estos fueron desarrollados y puestos en marcha como se indica en el capítulo, además fueron demostrados los objetivos trazados con base a datos recopilados en campo y puestos en marcha en la investigación.

Para tener en cuenta que la obtención de datos se basó en el uso de equipos especiales para evaluar las variables eléctricas y mecánicas las cuales se guardan en una base de datos, la cual se ingresan en un base de datos de los mantenimientos realizados con técnicas de mantenimientos basados en la confiabilidad, estos mantenimientos son realizados por técnicos capacitados o bien por el operador que tiene en su responsabilidad mantenimiento, con los resultados se da un seguimiento y atención a alguna a fallas en equipos involucrados en el proceso de producción y generación eléctrica, estos datos generan una base la cual se puede analizar con estadística descriptiva para su respectivo análisis.

#### **3.1. Técnicas de mantenimiento basada en confiabilidad**

Para realizar el objetivo de la investigación que es una realización de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva en un ingenio para la producción de vapor y generación de energía eléctrica, Guatemala en la puesta en marcha de los equipos intervenidos y darle seguimiento en el funcionamiento en el periodo de zafra con rutinas basadas en la confiabilidad y con controles de calidad para cada equipo eléctrico intervenido.

Se tiene entendido que los equipos eléctricos y mecánicos corren en el riesgo de sufrir daños, por una cualquier falla ya sea crítica o leve en la presente investigación se tiene contemplado evaluar solamente equipos críticos los cuales al presentarse una falla se puede problematizar el proceso de producción de energía eléctrica para el propio suministro o para la venta, se usaron técnicas análisis como las vibraciones, ultrasonidos y termografía 2 y si en un caso la sucede una falla se analiza con el método de causa raíz para encontrar la solución al problema el trabajo está basado en la elaboración de un plan o programa de mantenimiento para evitar fallas o bien minimizarlas.

### **3.2. Determinar los equipos críticos del departamento de generación de energía eléctrica**

Para determinar los equipos críticos de las áreas de cogeneración del ingenio se necesitó tomar en cuenta las pérdidas de tiempo que afectaron a en las últimas zafras el indicador de dicha área, se determinaron una lista de equipos que por sus fallas impactaron en tiempo la eficiencia, estos se muestran en la tabla siguiente.

Así como también, el análisis de criticidad por medio de uno de los tres métodos que se conocen y estudiaron en la investigación se pretende evaluar la categoría de los equipos o aparatos del ingenio en analogía con su tamaño e importancia en la operación y cumplir con los objetivos. Este análisis se utiliza para identificar los activos críticos, es decir, aquellos que son esenciales para el funcionamiento productivo del ingenio y cuyo fallo podría tener consecuencias significativas, como pérdidas económicas, daños a la operación o incluso peligro para la seguridad o medio ambiente.

Un análisis de criticidad es fundamental en la valoración de diversos factores como el ciclo de uso, la jerarquía del activo para el trabajo de la empresa, la huella del fallo, el problema para resarcir o sustituir el equipo. A partir de esta valoración se “establece un nivel de criticidad para cada activo y se crean planes de mantenimiento y monitoreo para aquellos que son más críticos. Este estudio logra ser próspero con otras sistemáticas.

La criticidad desde un punto matemático o bien la ruta crítica se puede describir de la siguiente forma:

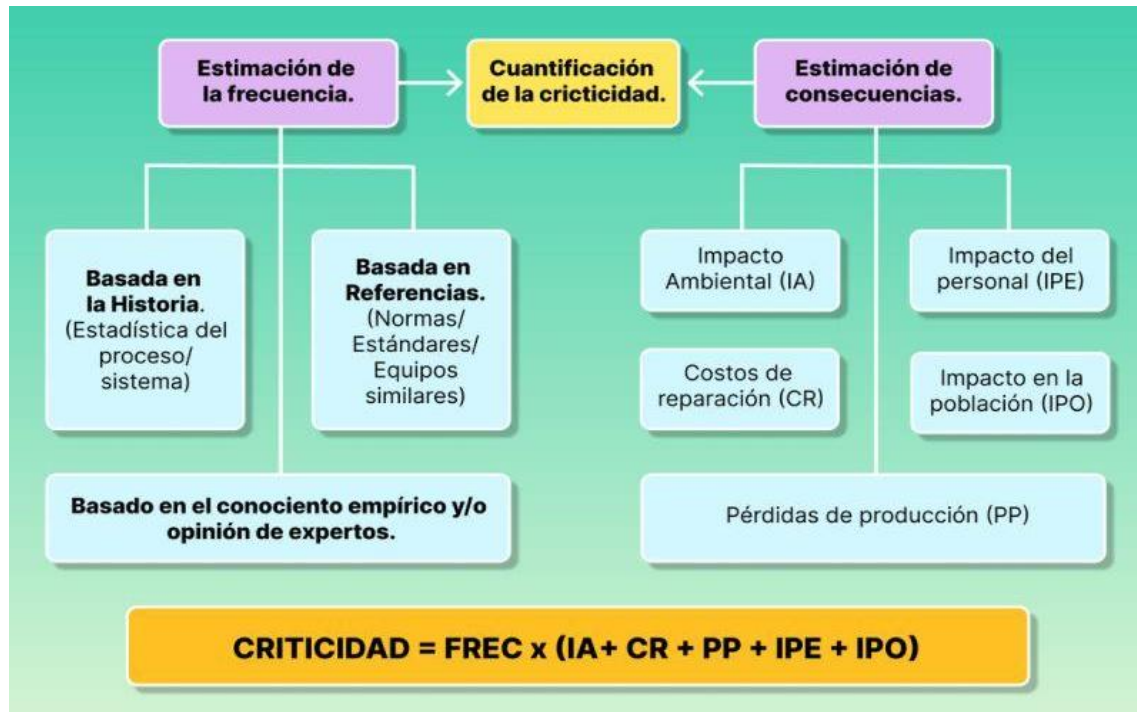
Ruta crítica = “Frecuencia x Consecuencia”

Además, el análisis de criticidad nos da un inicio o una idea de que equipos son los más sensible y poder realizar un plan de mantenimiento preventivo” en ellos este análisis de criticidad es y debe de ser la base de punto de partida en la el primer borrador de un mantenimiento preventivo que contiene inspecciones frecuentes las cuales pueden estar calendarizadas o como suele suceder son solicitadas por el usuario, reparaciones de equipos y sustituciones de piezas antes de que ocurra un fallo esto es lo que se busca no llegar que una falla potencial pare el equipo, además ayuda a reducir o eliminar el “tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento de los activos. Esta investigación es de gran grado para la gestión de repuestos y para determinar que repuestos se asocian a los aparatos críticos y optimizar la gestión y mantener un adecuado número de existencias.

Es de suma importancia que los activos pueden cambiar por ello es necesario hacer un análisis de criticidad en el tiempo cada cierto tiempo programado o bien cuando se a necesario para poder analizar que no haya cambiado la importancia del equipo en mención puesto que puede sufrir un cambio de ubicación o un cambio de rol en el proceso productivo.

**Figura 12.**

*Pasos para determinar los rangos de criticidad*



*Nota.* Se presenta cada uno de los pasos para determinar los pasos de criticidad. Adaptado de Díaz y González (2023). Rangos de criticidad. *revista PREDYC* 2023. 21 (40) p. 14. <https://predictiva21.com/predictiva21-llega-a-su-edicion-numero-40-por-lo-que-hemos-preparado-una-entrevista-con-dos-versiones-complementarias-de-la-trayectoria-de-la-revista-el-origen-y-el-futuro/>

La gráfica anterior enseña la ruta del “análisis de criticidad” y nos encamina a una metodología para establecer jerarquías o prioridades de instalaciones, sistemas, activos o bien dispositivos, de acuerdo con el riesgo total asociado a un proceso, facilitando la toma de decisiones y el direccionamiento del esfuerzo y los recursos en las áreas más críticas.

Se toma en cuenta que el análisis de Criticidad: Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto

global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis de criticidad se debe: definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis.

**Tabla 1.**

*Formato para que muestre cómo determinar la criticidad de forma cualitativa*

| P<br>C<br>R | HCR |     |     |     |     |     |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             |     | 4   | 3   | 2   | 1   | 0   |
|             | 4   | A44 | A34 | A24 | A14 | A04 |
|             | 3   | A43 | B33 | B23 | B13 | B03 |
|             | 2   | A42 | B32 | C22 | C12 | C02 |
|             | 1   | A41 | B31 | C21 | D11 | D01 |
|             | 0   | A40 | B30 | C20 | D10 | D00 |

*Nota.* Formato para determinar una forma cualitativa de criticidad. Adaptado de Díaz y González (2023). Rangos de criticidad. revista *PREDYC* 2023. 21 (40) p. 14.  
<https://predictiva21.com/predictiva21-llega-a-su-edicion-numero-40-por-lo-que-hemos-preparado-una-entrevista-con-dos-versiones-complementarias-de-la-trayectoria-de-la-revista-el-origen-y-el-futuro/>

Para determinar la criticidad de equipos se puede hacer de tres formas una de ellas es puramente cualitativa que es la que se tomó para el estudio, por qué se tomó esta base es por la versatilidad para poder elegir por características de los equipos, para este análisis se necesita tener un equipo de profesionales con experiencia en la operación, mantenimiento y monitoreo de los equipos, puesto que para emitir opinión es con base a experiencia.

**Tabla 2.**

*Interpretación de riesgo en tabla de colores*

|              |          | SEVERIDAD |      |       |      |          |
|--------------|----------|-----------|------|-------|------|----------|
|              |          | Muy bajo  | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
| PROBABILIDAD | Muy alta | 5         | 10   | 15    | 20   | 25       |
|              | Alta     | 4         | 8    | 12    | 16   | 20       |
|              | Media    | 3         | 4    | 9     | 12   | 15       |
|              | Baja     | 2         | 4    | 6     | 8    | 12       |
|              | Muy baja | 1         | 2    | 3     | 4    | 5        |

*Nota.* Lo anterior descrito obedece a la realización de fase 1. Adaptado de Díaz y González (2023). Rangos de criticidad. revista *PREDYC* 2023. 21 (40) p. 14.  
<https://predictiva21.com/predictiva21-llega-a-su-edicion-numero-40-por-lo-que-hemos-preparado-una-entrevista-con-dos-versiones-complementarias-de-la-trayectoria-de-la-revista-el-origen-y-el-futuro/>

Se realizó de la siguiente manera realización de marco teórico entrevistas a cada colaborador que tenga que ver con el funcionamiento de los equipos, tales como operador, técnico en mantenimiento, técnico supervisor para tomar la línea acerca de la investigación del problema planteado. La recabar documentos para

efectuar análisis acorde con los objetivos planteados, se realizará investigación en bibliografías de manuales del equipo, así como los datos tomados en las últimas 3 zafras que se tiene registro con parámetros medibles para observar las variaciones con respecto al funcionamiento de los equipos.

**Tabla 3.**

*Muestra de equipos evaluados*

| DESCRIPCION DEL ACTIVO       | Cojinete   | Cojinete   | MARCA DEL MOTOR   |
|------------------------------|------------|------------|-------------------|
|                              | LNA        | LA         |                   |
| Detroit (AIRE ALIMENTADORES) | 6311       | 6312       | BALDOR            |
| Ventilador Inducido 1        | 6326 M     | 6326/C3    | SIEMENS           |
| Ventilador Inducido 2        | 6326 M     | 6326/C3    | SIEMENS           |
| Ventilador Forzado 1         | 6319 M/C3  | 6319/C3    | SIEMENS           |
| Ventilador Forzado 2         | 6319 M/C3  | 6319/C3    | SIEMENS           |
| Ventilador Secundario 1      | 6322 M     | 6322/C3    | SIEMENS           |
| Ventilador Secundario 2      | 6322 M     | 6322/C3    | SIEMENS           |
| Bomba de Alimentacion 1      | 6319 M/C3  | 6319 M/C3  | ABB               |
| Bomba de Alimentacion 2      | 6319 M/C3  | 6319 M/C3  | ABB               |
| Bomba de Alimentacion 3      | 6319 M/C3  | 6319 M/C3  | ABB               |
| Gusano (TolVita 1)           | 6205 2Z/C3 | 6206 2Z/C3 | ABB               |
| Gusano (TolVita 2)           | 6205 2Z/C3 | 6206 2Z/C3 | ABB               |
| Gusano (TolVita 3)           | 6205 2Z/C3 | 6206 2Z/C3 | ABB               |
| Soplador ESP #1              | 6204-2Z/C3 | 6205-2Z/C3 |                   |
| Soplador ESP #2              | 6204-2Z/C3 | 6205-2Z/C3 |                   |
| Bomba de Pozo                | 7322 BEM   | 6215-J     | NIDEC MOTOR       |
| Ventilador Torre de Enf. 1   | 6318       | 6316       | WESTINHOUSE       |
| Ventilador Torre de Enf. 2   | 6318       | 6316       | WESTINHOUSE       |
| Ventilador Torre de Enf. 3   | 6318       | 6316       | WESTINHOUSE       |
| Bomba Circulación 1          | 6319/C3    | 6322-C3    | WEG               |
| Bomba Circulación 2          | 6319/C3    | 6322-C3    | WEG               |
| Bomba Circulación 3          | 6319/C3    | 6322-C3    | WEG               |
| Bomba de Enfriamiento 1      | 6212-C3    | 6312-C3    | WEG               |
| Bomba de Enfriamiento 2      | 6312       | 6309       | WEG               |
|                              |            |            |                   |
| Bomba de Vacío 1             | 6212       | 6312       | MARATHON ELECTRIC |

### Continuación Tabla 3.

|                       |                 |                 |                   |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Bomba de Vacío 2      | <b>6212</b>     | <b>6312</b>     | MARATHON ELECTRIC |
| Bomba de Levante      | <b>6212-ZC3</b> | <b>6212-ZC3</b> | SIEMENS           |
| Bomba de Condensado 1 | <b>6316/C3</b>  | <b>6316/C3</b>  | ABB               |
| Bomba de Condensado 2 | <b>6316/C3</b>  | <b>6316/C3</b>  | ABB               |

*Nota.* Activos evaluados. Elaboración propia usando Excel.

La muestra que se evalúa se presenta en el protocolo de la investigación puesto que se define por medio de la estadística descriptiva, además como se puede mostrar en la Tabla 3 se presentan los activos con los cuales se trabaja la investigación así se puede determinar las características principales de cada uno de los equipos.

### 3.3. Gestión o recolección de la información

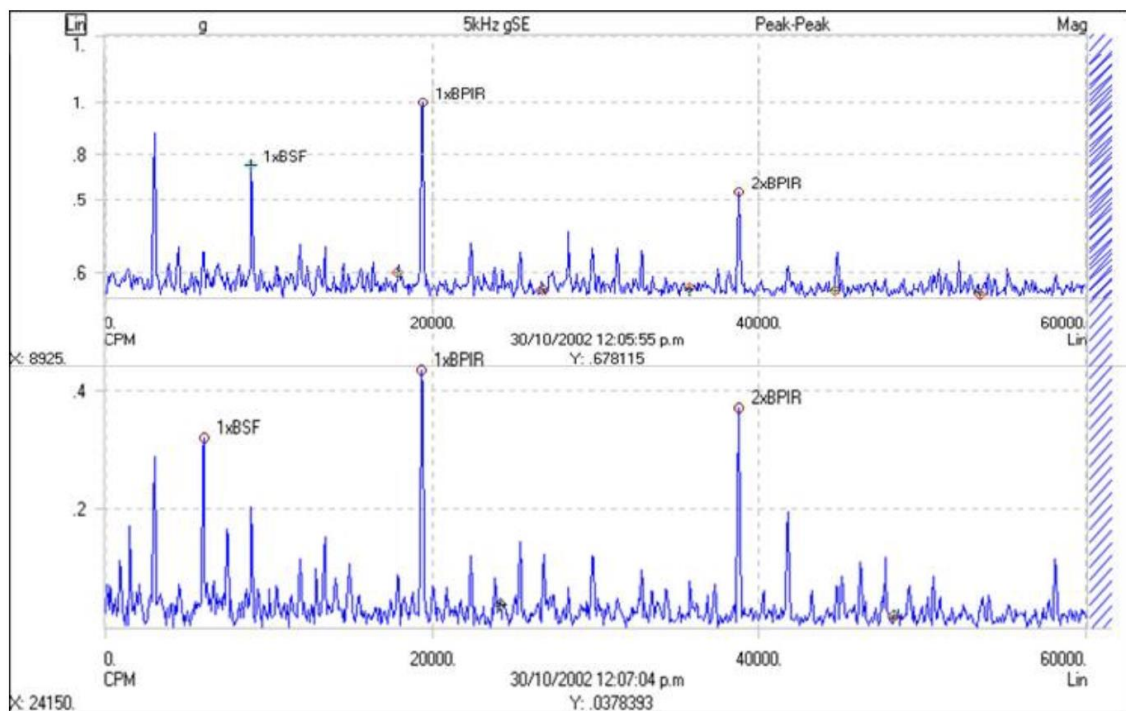
La recolección de datos que se hace en los equipos intervenidos sirve de retroalimentación del estado de operación de dicho equipo los cuales está basada en mediciones calendarizadas y con el cual se puede sacar conclusiones de lo que se necesita a través de una línea base de condiciones de operación según fabricante de equipos y componentes, estos datos de la línea base de cada equipo se hace con base en características de fabricación de equipos y de repuestos según marca, el uso de los equipos aportan predicción de probabilidad de falla y, las condiciones de reparación de los mantenimientos que tienen que cumplir especificaciones técnicas del fabricante y en ese punto es donde se le va a tocar para que no presente falla, si se presenta algún problema se muestra un análisis de causa raíz para determinar qué tan severa puede llegar a hacer la falla o bien corregirla antes que pueda ocasionar problemas en el proceso.

Se toma en cuenta en la recolección de datos lo necesario de mantener unas visitas constantes o sea una toma de datos constantes para poder mantener un análisis preciso y poder llevar a cabo el historial del mantenimiento al equipo.

La recolección de datos se hace con equipo especial y que este calibrado constantemente para que las lecturas que se están sacando sean lo más certeras posibles, los equipos de vibraciones se tienen que mandar a recalibrar o comprobar la calibración por lo menos una vez cada año, para ello es necesario mantener por lo menos dos equipos y poder rotar cada uno mientras el otro no se encuentra.

**Figura 13.**

*Análisis de vibraciones motor inducido 1*



*Nota.* Espectro de evaluación de vibraciones. Elaboración propia usando Hyart para análisis de vibraciones.

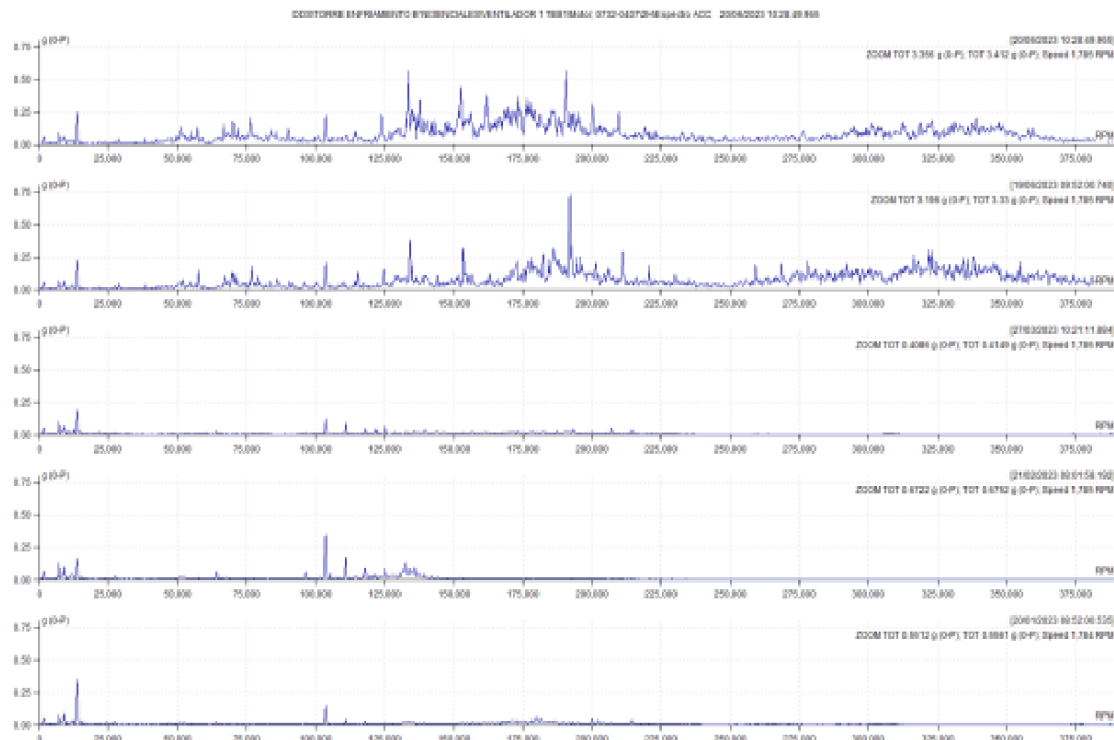
Como se ha recolectado datos de motores eléctricos en funcionamiento como el motor forzado 1 caldera 8, esta grafica se puede determinar que ha habido un cambio en las condiciones de funcionamiento en el equipo, los cuales

pueden ser por varios factores que influyen en el funcionamiento, se analiza por medio de Ishikawa para este motor.

Se puede observar que la gráfica de tendencia del funcionamiento del equipo se dispara y por tanto se necesita una verificación de los mantenimientos que intervinieron, por tanto, se realiza un análisis de vibraciones para determinar qué es lo que está ocurriendo para que dicha lectura se haya incrementado. Pueda ser que los valores de vibraciones se dispararon por alguna condición externa o bien por fallas internas del equipo, es por eso es necesaria la correcta interpretación de estos.

**Figura 14.**

*Vibraciones inducido 2*



*Nota.* Evaluación vibraciones en diferentes puntos de un motor. Elaboración propia usando Hyart.

En el caso de la gráfica anterior se puede observar que las vibraciones en el punto horizontal del motor evaluado han mantenido su variable y en estos casos se somete análisis de vibraciones, ultrasonidos y termografía, pero se determina que el problema es en la manera de puesta en marcha del motor no se llevó a cabo con un estándar de puesta en marcha adecuado.

Para la interpretación de las gráficas se necesita de una guía, esta guía se encuentra descrita como la carta de Charlotte esta es una referencia patrón del comportamiento de las vibraciones, como ejemplo se deja una carta en el anexo para su futura consulta.

**Figura 15.**

*Vibraciones forzado 1*



*Nota.* Espectro de armónicos de vibraciones de un motor eléctrico. Elaboración propia, usando Hyatt de vibraciones.

En el caso de la gráfica anterior se puede observar que la vibración en el punto horizontal del motor ha mantenido variable y en estos casos se someten análisis de vibraciones, “ultrasonidos y termografía”, pero se comprueba que el

problema es en la manera de puesta en marcha del motor no se llevó a cabo con un estándar de puesta en marcha adecuado.

### **3.3.1. Análisis e interpretación de la información**

Durante la recolección de datos, se detectaron anomalías en la forma de cómo se colocaron los motores y en la disposición de componentes la conmutación de los métodos de alineación en es diferente en cada mecánico y la instalación de los componentes y partes móviles y fijas también es diferente en cada electricista por tal motivo se realizan estándares en cada uno de los mantenimientos para poder realizar un correcto plan de mantenimiento para no entorpecer los procesos en que se pone disponible los equipos intervenidos.

**Tabla 4.**

*Tabla que representa una matriz de fallas recurrentes en equipos*

| TIPOS DE FALLOS                            | Inspec. visual | Descargas parciales | Vibraciones | Rigidez Dieléctrica | Tangente & Aislamiento | Temperatura | Resistencia aislamiento | Espectro corriente estator | Corriente de Sec. Negativa | Pérdidas Magnéticas | Resistencia del devanado | Corriente de vacío | Corriente | Imp. De Sec. Negativa | Corriente de Sec. Cero | RD. Impulsos | Delta T Aire de enfriamiento |
|--------------------------------------------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|------------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-----------|-----------------------|------------------------|--------------|------------------------------|
| Eléctrica, aislamiento de estator a tierra | ✕              |                     |             | ➡                   | ➡                      |             | ➡                       |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       | ➡                      |              |                              |
| Eléctrica, aislamiento del estator espiras |                |                     |             |                     |                        | ➡           |                         | ↔                          | ➡                          |                     |                          |                    |           | ➡                     |                        | ➡            |                              |
| Eléctrica, aislamiento entre fases         | ✕              | ➡                   |             | ➡                   | ➡                      |             | ➡                       |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Cubierta semiconductora                    | ✕              | ➡                   |             | ➡                   | ➡                      |             |                         |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Aflojamiento de cuñas                      | ✕              | ➡                   | ➡           |                     |                        |             |                         |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Aflojamiento de bobinas en ranura          | ✕              | ➡                   | ➡           | ➡                   | ➡                      |             |                         |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Aflojamiento de bobinas en cabezas         | ✕              |                     | ➡           | ➡                   |                        |             |                         |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Contaminación y humedad                    | ✕              | ➡                   |             | ➡                   | ➡                      |             | ➡                       |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Aislamiento bushings                       | ✕              | ➡                   |             | ➡                   | ➡                      |             | ➡                       |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Círculo magnético                          | ✕              |                     | ➡           |                     |                        | ➡           |                         |                            | ➡                          | ➡                   |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Asimetría del devanado                     |                |                     | ➡           |                     |                        | ➡           |                         | ↔                          | ➡                          | ➡                   | ↔                        | ↔                  | ↔         | ➡                     |                        |              |                              |
| Barras rotas en el rotor                   | ✕              |                     | ↔           |                     |                        |             |                         |                            |                            |                     |                          |                    |           |                       |                        |              |                              |
| Desbalance tensiones                       |                |                     | ➡           |                     |                        | ➡           |                         | ↔                          | ➡                          | ➡                   |                          | ↔                  | ↔         |                       |                        |              |                              |
| Fallo de enfriamiento                      |                | ➡                   |             |                     |                        | ➡           |                         |                            |                            |                     | ➡                        |                    |           |                       |                        |              | ➡                            |
| Total de fallas descubiertas               | 10             | 7                   | 7           | 7                   | 6                      | 5           | 4                       | 4                          | 4                          | 3                   | 2                        | 2                  | 2         | 2                     | 1                      | 1            | 1                            |
| pareto de fallas                           | 71%            | 50%                 | 50%         | 50%                 | 43%                    | 36%         | 29%                     | 29%                        | 29%                        | 21%                 | 14%                      | 14%                | 14%       | 14%                   | 7%                     | 7%           | 7.1%                         |

*Nota.* La teoría de las causas repetitivas se muestra a continuación, hay seis causas principales de fallos de los motores eléctricos fuente. Elaboración propia, usando Excel.

En la Tabla 4 se puede ver el análisis de fallas según se ha podido experimentar tanto por la experiencia como por la teoría revisada en la investigación, las fallas en motores vienen asociadas a ciertas condiciones que se pueden anticipar o bien reparar antes que provoque pérdida de tiempo o daño en un activo y estas condiciones son las siguientes.

- Sobre corriente (sobrecarga eléctrica)
- Baja resistencia
- Sobrecalentamiento
- Suciedad
- Humedad
- Vibraciones

Estas causas se pueden determinar con mantenimientos basados en la confiabilidad para poder corregir y así alargar la vida útil del equipo.

### **3.4. Datos recabados por medio de mantenimientos basados en confiabilidad**

Para la recolección de dato se emplearon equipos de vibraciones estos equipos son utilizados por personal que a según necesidad del caso hace visitas para recopilar, se tienen dos tipos de mediciones una con un equipo puntual que no hace registro sino solo medida puntual y otro que se puede registrar la medida luego se descarga y se analiza espectros para determinar cuál es la causa por la cual está vibrando, además se tiene la termografía esta técnica se es necesarios utilizar equipos especiales tales como las cámaras termográficas y los pirómetros con estos últimos la inspecciones son puntuales y no se puede apreciar una imagen solo un punto donde se está dirigiendo el láser en cambio con la Cámara termográfica se puede apreciar una imagen completa de temperatura para poder evaluar las condiciones.

Además, se usa el ultrasonido con esta técnica se puede determinar si hay algún roce entre parte solidas o bien un ruido anormal en tres contactos eléctricos, a continuación, se presenta una tabla en la cual se muestra cómo se presentan los resultados de los activos evaluados y más adelante se muestra las gráficas y datos recabados con los equipos especiales.

**Tabla 5.**

*Listado de equipos críticos analizados*

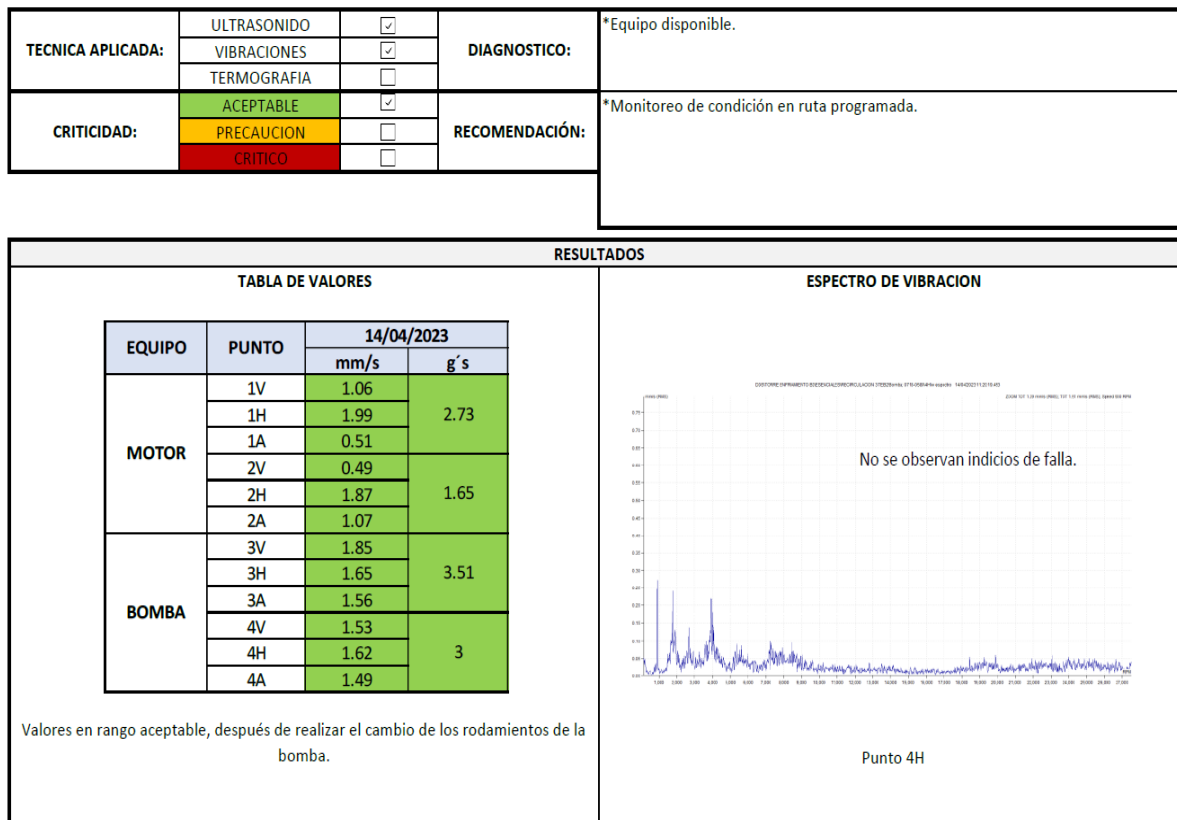
| <b>Ingenio Santa Ana Departamento de Generación Eléctrica<br/>Diagnostico equipos inspeccionados Zafra 22-23</b> |               |               |                    |                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|------------------------------------------|
| <b>Caldera 8</b>                                                                                                 |               |               |                    |                                          |
| <b>Tren</b>                                                                                                      | <b>Equipo</b> | <b>Activo</b> | <b>Diagnóstico</b> | <b>Comentarios</b>                       |
| Inducido 1 C8                                                                                                    | Motor         | 0732-1906     | Buen estado        |                                          |
| Inducido 2 C8                                                                                                    | Motor         | 0732-1905     | Buen estado        |                                          |
| Forzado 1 C8                                                                                                     | Motor         | 0732-1908     | Buen estado        |                                          |
| Forzado 2 C8                                                                                                     | Motor         | 0732-1907     | Buen estado        |                                          |
| Secundario 2 C8                                                                                                  | Motor         | 0732-1904     | Buen estado        |                                          |
| Bomba alimentad                                                                                                  | Motor         | 0732-2024     | Buen estado        |                                          |
| Bomba alimentad                                                                                                  | Motor         | 0732-2024     | Valores aceptables | Etapainicial falla de rodamiento punto 1 |
| Bomba alimentad                                                                                                  | Motor         | 0732-1855     | Buen estado        |                                          |
| Ventilador de troi                                                                                               | Motor         | 0732-1843     | Valores aceptables | Indicios de falla de rodamientos         |
| Ventilador 1<br>TEB2                                                                                             | Motor         | 0732-1852     | Buen estado        |                                          |
| Ventilador 2<br>TEB2                                                                                             | Motor         | 0732-1851     | Buen estado        |                                          |
| Ventilador 3<br>TEB2                                                                                             | Motor         | 0732-1853     | Buen estado        |                                          |
| Bomba<br>recirculación 1<br>TEB2                                                                                 | Motor         | 0732-1953     | Buen estado        |                                          |
| Bomba<br>recirculación 2<br>TEB2                                                                                 | Motor         | 0732-1952     | Buen estado        |                                          |
| Bomba<br>recirculación 3<br>TEB2                                                                                 | Motor         | 0732-1951     | Buen estado        |                                          |

*Nota.* Lista con equipos críticos de generación. Elaboración propia, usando Excel.

Como se muestra en la Tabla 5 se presenta un ejemplo de cómo se presentan los resultados de los análisis recabados, tales análisis se someten a discusión y se prepara un informe para el usuario final estos reportes llevan la información necesaria para intervenciones o bien revisar el estado de equipos intervenidos.

**Figura 16.**

*Formato de lectura de valores y representación gráfica de valores de vibración*



*Nota.* Corresponde a formato de entrega de reporte donde se adjunta puntos de vibraciones y espectros para el análisis correspondiente. Elaboración propia, usando Excel.

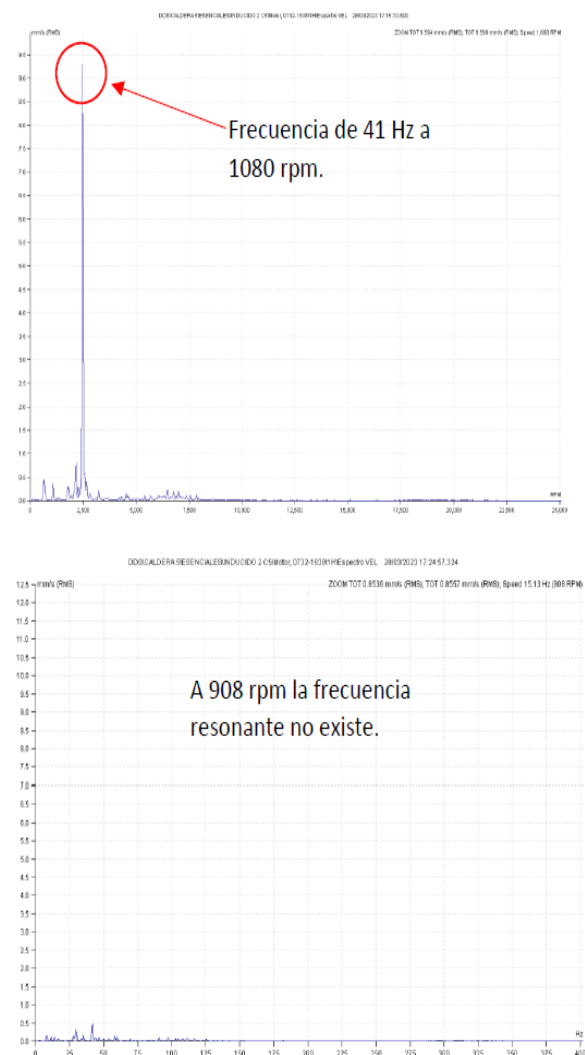
Para la figura se muestra un formato para observar los valores de vibraciones tanto de bomba como de motor, se hace referencia a las criticidades de los equipos, así como también se presentan recomendaciones y el respectivo

diagnóstico, este formato fue elaborado para que el propietario del equipo pueda dar seguimiento a las condiciones del mismo, además pueda comparar el valor puntual con la imagen de armónicos, cuando hay un valor alto podemos cambiar de color para poder ubicarlo y ver la severidad de los valores.

**Figura 17.**

*Evaluación motora, transmisión y ventilador inducido caldera*

| Equipo               | Punto | En vacío | Con carga |      |     |
|----------------------|-------|----------|-----------|------|-----|
|                      |       |          | rpm       |      |     |
|                      |       |          | 1783      | 1080 | 908 |
| Motor<br>(0732-1638) | 1V    | 1.6      | 2.1       | 0.9  |     |
|                      | 1H    | 3.6      | 9.6       | 0.9  |     |
|                      | 1A    | 0.8      | 1.5       | 0.8  |     |
|                      | 2V    | 1.5      | 1.7       | 1.0  |     |
|                      | 2H    | 2.9      | 6.4       | 0.7  |     |
|                      | 2A    | 0.9      | 1.8       | 1.0  |     |
| Transmisión          | 3V    |          | 0.8       | 0.7  |     |
|                      | 3H    |          | 2.4       | 1.1  |     |
|                      | 3A    |          | 2.3       | 2    |     |
|                      | 4V    |          | 1.2       | 0.8  |     |
|                      | 4H    |          | 4.7       | 1.6  |     |
|                      | 4A    |          | 0.6       | 3.5  |     |
|                      | 5V    |          | 1.6       | 0.4  |     |
|                      | 5H    |          | 0.5       | 0.5  |     |
|                      | 5A    |          | 0.8       | 0.5  |     |
|                      | 6V    |          | 1.6       | 0.3  |     |
| Ventilador           | 6H    |          | 0.7       | 0.4  |     |
|                      | 6A    |          | 0.7       | 0.3  |     |
|                      | 7V    |          | 1         | 0.4  |     |
|                      | 7H    |          | 2.1       | 0.5  |     |
|                      | 7A    |          | 0.9       | 0.3  |     |
|                      | 8V    |          | 0.9       | 0.2  |     |
|                      | 8H    |          | 1.5       | 0.3  |     |
|                      | 8A    |          | 0.5       | 0.2  |     |



*Nota.* Formato para entrega de reporte de monitoreo de condición. Elaboración propia, usando Excel.

En la figura anterior se muestra la condición de vibraciones en activos con esta operación se les da seguimiento a los equipos para evaluar sus condiciones donde se puede apreciar que es un formato el cual se llena con valores numéricos y gráficas que representan los espectros, se coloca en un formato para poder tomar en cuenta la variación numérica como la de gráfica.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las variaciones de los parámetros eléctricos de los activos cambian conforme a su ubicación y tipo de actividad en la operación, cada uno tiene su importancia en el proceso y su condición de criticidad influye en la elaboración de un programa de mantenimiento, además en el desempeño de la vida útil de los mismos, la fallas viene evaluadas por los resultados de la operación, mantenimientos y provocadas por la degradación de las partes móviles o por equipos que ya han terminado su vida útil y su operación es inestable y que siguen en funcionamiento provocando una falla e haciendo ineficiente la operación, pero esto se puede mejora con un análisis de criticidad y con planes de mantenimiento programados.

Si no se controlan las fallas y la eficiencia de los equipos, estos ocasionan pérdidas de tiempo y, los equipos obsoletos son propensos a fallar y su eficiencia es baja la cual provoca una alta probabilidad de no estar disponible e interrupciones del proceso productivo como también un mayor consumo de energía eléctrica y mayor uso de repuestos en las fallas de ahí la importancia de crear una matriz de criticidad para la elaboración de un plan de mantenimiento adecuado con técnicas que nos puedan anticipar las falla en los equipos.

### **4.1. ¿Cuáles son las técnicas de mantenimiento basado en confiabilidad para prevenir fallas en equipos eléctricos de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?**

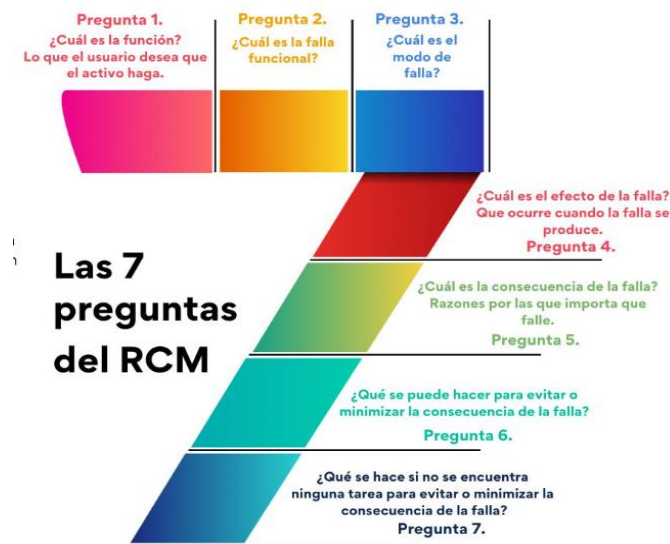
En los registro de información de mantenimiento con equipos especiales es posible con técnicas de mantenimiento apegadas a la confiabilidad tales como

la vibraciones las cuales pueden generar un banco de datos evaluar los cambio que se están dando, la línea base de un ultrasonido se va evaluando en cada vez que se realice el mantenimiento, las termografías es una técnica la cual se puede ir evaluando cada vez que se realiza puesto que esta por el costo solo se valuó cada vez que se realiza y en forma puntual.

Gráfico de cómo debe de representarse las condiciones de los equipos y un plan de mantenimiento el cual se presenta en el anexo se una planeación de evaluada y que nos fue funcione en la echa del proyecto. Para obtener un método de mantenimiento se RCM o mantenimiento fundado en la confiabilidad obedece realizar 7 preguntas como las que se presentan continuación.

**Figura 18.**

*Preguntas básicas para la elaboración de un plan de mantenimiento RCM*



*Nota.* Imagen de las preguntas básicas para un plan RCM. Obtenido LinkedIn (s.f.) *Las preguntas RCM.*  
[https://www.linkedin.com/search/results/content/?keywords=confiabilidad&origin=SWITCH\\_SEARCH\\_VERTICAL&sid=%40A%3A](https://www.linkedin.com/search/results/content/?keywords=confiabilidad&origin=SWITCH_SEARCH_VERTICAL&sid=%40A%3A)

Con estos pasados luego de tener una matriz de criticidad se determinaron las 2 técnicas adecuadas para la elaboración de un plan de mantenimiento las cuales se resumen en la siguiente figura.

**Figura 19.**

*Técnicas de mantenimiento, evaluadas*



*Nota.* Adaptado de Aula21 (2022) *Mantenimiento basado en la condición (CBM): Qué es y cómo se aplica.* (<https://www.cursosaula21.com/que-es-mantenimiento-basado-en-la-condicion/>)

Luego de tener claro los mantenimientos a practicar en los activos y así asegurar su funcionalidad se procede a revisar la criticidad de cada uno, cada técnica de las presentadas en la Figura 18 son sacadas por personal con experiencia para la recolección de datos, la imagen es como de referencia para recordarnos cuales son las practicas que se hacen para los mantenimientos.

#### 4.2. ¿Cuál es la criticidad de los equipos que puedan provocar salidas de línea, perdidas de vapor y perdidas de generación eléctrica en una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?

El análisis de una criticidad nos encamina a una metodología para establecer jerarquías como también prioridades de instalaciones, sistemas o equipos y dispositivos, de acuerdo con el riesgo total asociado a un proceso, facilitando la toma de decisiones y el direccionamiento del esfuerzo y los recursos en las áreas más críticas, se presenta una muestra de los equipos críticos.

**Tabla 6.**

*Tabla de equipos críticos*

| DESCRIPCION                                            | UBICACION         | Seguridad Operativa | Siniestralidad |
|--------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------|
| MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)  | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta 2         |
| MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #3 CALDERA #8 (BLOQUE #2)  | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #2(BLOQUE #2)              | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR INDUCIDO #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)               | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR INDUCIDO #2 CALDERA #8 (BLOQUE #2 )              | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR FORZADO #1 CALDERA # 8 (BLOQUE #2)               | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR FORZADO #2 CALDERA # 8 (BLOQUE #2)               | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR SECUNDARIO #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)             | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR SECUNDARIO #2 CALDERA#8 (BLOQUE #2)              | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR VENTILADOR DETROIT STOKER CALDERA #8 (BLOQUE #2) | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |
| MOTOR STROKER DRIVE/PARRILLA CALDERA #8(BLOQUE #2)     | CALDERAS BLOQUE 2 | Alta                | Alta           |

*Nota.* Tabla de equipos críticos con evaluación tanto de criticidad como de severidad. Elaboración propia, usando Excel.

Para establecer la criticidad de equipos es necesario obtener un estudio adecuado y un análisis en conjunto con los usuarios para que no haya discrepancias entre los mismos, en la Tabla 6 se muestra una lista de equipos evaluados para la investigación, para estos equipos se toma la severidad y la criticidad y como afecta en la operación.

#### **4.3. ¿Cómo evitar pérdidas de tiempo provocada por fallas e indisponibilidades de equipos principales y auxiliares de una generadora de energía eléctrica de un ingenio azucarero?**

Obedecer una guía práctica para la revisión de condiciones de operación con varias técnicas de inspección es necesario no solo saber que se puede hacer sino también poder hacerlo y más allá de saber poder interpretar, ya que ninguna, técnica o método por sí solo, es suficiente o único para alcanzar con puntualidad los inconvenientes de los equipos más críticos y no crítico, pero siempre con la importancia debida para la confiabilidad de la operación, sin embargo, en combinación, las distintas tecnologías que se pueden emplear para poder analizar los equipos para su funcionalidad en un conjunto y así pueda operar la planta y poder disminuir la pérdida de tiempo.

Los controles internos en la gestión de mantenimiento deben de ser importante para que se cumpla lo planificado, la realización de cada uno de los mantenimientos programados debe de estar correctamente especificados para el técnico encargado del mantenimiento no pueda equivocarse y los pueda realizar de apegados a los estándares de la organización, los objetivos de cada uno de ellos deben de ser muy bien analizado por los ingenieros encargados de la operación y mantenimiento.

**Tabla 7.**

*Formato de seguimiento de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad*

| PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD GENERACIÓN DE ENERGÍA 2023 |                                            |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             | No.      |   |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|--------|---|---|---|------------------|---|---|---------------|---|--------|-------------|----------|---|
| Activo:                                                                  |                                            |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   | Fecha: |             | Realizó: |   |
| EQUIPO:                                                                  |                                            |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| ITEM                                                                     | TAREA A REALIZAR                           | FRA C.       | RES P. | E | F | M | A                | M | J | J             | A | S      | O           | N        | D |
| 1                                                                        | Medición de aislamiento del motor          |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 2                                                                        | Verificación de alineación motor-bomba     |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 3                                                                        | análisis de vibraciones                    |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 4                                                                        | análisis de ultrasonido                    |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 5                                                                        | termografía                                |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 6                                                                        | Chequeo diario de monitoreo de temperatura |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| 7                                                                        |                                            |              |        |   |   |   |                  |   |   |               |   |        |             |          |   |
| NOVEDADES ENCONTRADAS:                                                   |                                            | ESTADO TAREA |        |   |   |   | FRECUENCIA TAREA |   |   |               |   |        |             |          |   |
|                                                                          |                                            | PROGRAMADO   |        |   |   |   | D - DIARIA       |   |   | S - SEMANAL   |   |        | M - MENSUAL |          |   |
|                                                                          |                                            | 0            |        |   |   |   | T - TRIMESTRAL   |   |   | C - SEMESTRAL |   |        |             |          |   |
|                                                                          |                                            | CUMPLIDO X   |        |   |   |   | L                |   |   | L             |   |        | A - ANUAL   |          |   |

*Nota.* Formato para toma de datos a motores eléctricos. Elaboración propia, usando Excel.

En la Tabla 7 se muestra un plan básico de evaluación de condiciones y de prácticas de trabajo que deben ser documentadas para que la organización y evaluación de procedimientos que no repita o permita las malas prácticas y

cometa faltas continuas y por ello se hace un plan de mantenimiento el cual tomo en cuenta varias técnicas y que es basado en la confiabilidad proactiva el cual se programa como se va a demostrar en el siguiente apartado.

La forma y saber cómo utilizar las técnicas de mantenimientos centradas en la confiabilidad brinda la oportunidad de anticiparse a los fallos y poder determinar una falla altamente potencial o funcional, para desarrollar una herramienta demostrativa y precisa para un programa de progreso del mantenimiento preventivo o de confiabilidad.

#### **4.4. Desarrollar una metodología o plan de mantenimiento basado en la confiabilidad proactiva en un ingenio guatemalteco para la producción de vapor y generación de energía eléctrica**

Las habilidades o estrategias desarrolladas de un mantenimiento existentes, los conceptos de confiabilidad (termografía, vibraciones, pata coja, ultrasonido, y análisis de materiales), su disponibilidad en el estudio de las principales técnicas de determinar el nivel de criticidad de activos y herramientas analíticas para mejorar la gestión del mantenimiento. Se estudian en detalle las técnicas de jerarquización de activos para conocer las alternativas de determinación de los equipos críticos. Se estudia el proceso productivo de la planta para poder entender y documentar que tan necesario es cada equipo en el funcionamiento de esta, con el fin de conocer el nivel de importancia de cada equipo con esto se llega a un plan base como se muestra a continuación, este plan base es para referencia y para poder hacer que crezca y mejorarlo cada día más.

### Formato de actividades de mantenimiento

Vo. Bo.

*Nota.* Formato para seguimiento de mantenimientos a equipos. Elaboración propia usando Excel.

64

## CONCLUSIONES

1. El desarrollo de la criticidad de los equipos y la importancia en la planta encamina a un método para establecer equipos prioritarios o principales que son la base del proceso productivo, sistemas eléctricos, mecánicos, equipos o dispositivos electrónicos que, de acuerdo con el riesgo total asociado a un proceso, facilitando la toma de decisiones y la prioridad del esfuerzo y los recursos en las áreas que según criterio cuantitativo analizado son las más críticas o importantes. La metodología se fundamenta en las experiencias prácticas en la aplicación de estudios de criticidad en activos de la planta.
2. Para evitar pérdidas de tiempo en el arranque de equipos al entrar a línea o bien por alguna falla en algún equipo cuando ya se esté en línea es necesario tener confiabilidad en su disponibilidad y en el funcionamiento constate, por tal motivo es la necesidad de abordar el plan de mantenimiento para poder garantizar la disponibilidad y la operación del activo, este plan debe de ser rutinario según planificación.
3. El desarrollo para el plan de mantenimiento es necesario el involucramiento del equipo de ingeniería de mantenimiento como también la disponibilidad de equipos para realizar los mantenimientos, es necesario definir una programación para realizarlos esta programación se decide tomando en cuenta la criticidad de los equipos a evaluar como también sus condiciones en las cuales opera.

4. La base de datos obtenida a lo largo del tiempo es muy importante para la evaluación y análisis de las necesidades de mantenimiento e intervención en los equipos, se debe de mantener una ruta crítica de equipos, la base de datos debe de estar a disposición de los profesionales encargados del mantenimiento.

## RECOMENDACIONES

1. Se deben mantener identificadas y a la vanguardia las técnicas de monitoreo como por ejemplo vibraciones, termografía, análisis de ultrasonido y de partículas magnéticas es conveniente certificar a los ingenieros y técnicos encargados del departamento de operación y mantenimiento de la planta de generación o bien del ingenio para poder crear un equipo capacitado.
2. Mantener un análisis de criticidad es necesario poder actualizarlo cada 2 o 3 años según sea necesario dependiendo de los objetivos de la empresa, puesto que las condiciones de los equipos por el uso y migraciones a otras tecnologías van cambiando según se renueva el parque instalado tomar en cuenta la ISO 31000, y por ello luego el análisis de criticidad debe de ser cuantitativo para tener una referencia numérica y no solo por cualidades, este análisis se debe de hacer con ingenieros del departamento de operación y mantenimiento del ingenio.
3. El plan de mantenimiento debe de estar estrictamente a la mano de los técnicos capacitados y de los ingenieros de mantenimiento del ingenio, con estos datos se puede realizar tendencias en el tiempo para poder analizar cambios y anticipar la oportuna intervención en mantenimiento de estos.
4. Los planes de mantenimiento deben de archivarse y poder crear una tendencia por cada equipo y así analizarlos a lo largo del tiempo, es necesario crear curvas de comportamiento y evaluar las condiciones de operación de cada equipo.



## REFERENCIAS

- Aguilar-Otero, J. R. y Magaña-Jiménez, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*. 25 (1), 15-26.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>
- Acosta-Palmer, H. R., & Troncoso-Fleitas, M. de la C. (2011). El mantenimiento en la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de generación de vapor. *Ingeniería Mecánica*. 14(2),140-150.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117950006>
- Alva, R. (2011). *Diseño de notas de laboratorio*. HYPERLINK  
<http://www.galeon.com/scienceducation/bitacora.html>
- Álvarez Paniagua, J. E. (2019). Mantenimiento predictivo a través de un sistema de monitoreo de vibraciones a turbinas tipo francis (8mw) acorde a la norma ISO 10816, en la central hidroeléctrica Santa Teresa. Escuela de Postgrado, Facultad de Ingeniería. USAC.
- Centro Guatemalteco de Investigación de la Caña de Azúcar. (2019). Informe estadístico Generación de Energía. CENGICAÑA.
- Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. (2012). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. CENGICAÑA.

Colindres Velasquez, W. G. (2019). *Diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17 en la planta de pastas de una mina extractora de plata en Guatemala*. Escuela de Postgrado, Facultad de Ingeniería de la USAC.

Chocoy Cachin, J. R. (2019). *Gestión de mantenimiento preventivo empleando ultrasonido para cañón y husillo de empuje de máquina extrusora de polímeros, según iso17359*. Escuela de Postgrado, Facultad de ingeniería de la USAC.

Duffuaa, Raouf. (2009). *Sistemas de Mantenimiento, Planeación y Control*. (1ª edición). Editorial Limusa.

García, O. (2006). *El mantenimiento General*. [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].  
<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1297/1/RED-70.pdf>

Guzmán, D. L., López, G. & Rodríguez, R. (2004). Determinación de la capacidad requerida para la prestación del servicio de 16 mantenimiento en plantas de generación de energía hidroeléctrica. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (31),124-138.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003111>

Kohan, A. (2000) *Manual de calderas cuarta edición*. McGraw-Hill.

Laos, F. (2015) *Mantenimiento agroindustrial*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. <https://pdfcoffee.com/mantenimiento-agroindustrial-2-pdf-free.html>

- López, G. (2016) *Implementación de un programa de mantenimiento preventivo al área de calderas*. HYPERLINK.  
<http://reini.utcv.edu.mx/bitstream/123456789/719/1/2982.pdf>
- Moreno, J. (2018) *Plan Maestro de Mantenimiento Basado en el TPM*. Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz.  
<http://reini.utcv.edu.mx:80/handle/123456789/789>
- Montilla M., Carlos A., & Silva M. & Arroyave, J. F. (2007). Caso de aplicación centrado en la confiabilidad RCM, previa existencia de mantenimiento preventivo. *Scientia Et Technica*, XIII (37), 273-278.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903746>
- Olarte, W., Botero, M. y Cañón, B. (2010) *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4546591>
- Peña, J. & Mercado, V. (2016). Modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la eficiencia y optimización de la energía eléctrica. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 28 (1), 99-105.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427746276011>
- Pérez, J. y Lawrence, P. (1997). *Industria azucarera en Guatemala: Análisis de sostenibilidad*. INCAE.
- Pinzón, M. & Mesa Grajales, D. & Ortiz Sánchez, Y. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al

mantenimiento. *Scientia Et Technica*, XII (30),155- 160.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920491036>

Quiroga Méndez, J. y Oviedo Castillo, S. (2011). Implementación de un mantenimiento basado en la condición usando modelado y simulación: caso de estudio de un motor sincrónico de imanes permanentes. *Ingeniería e Investigación*, 31 (2),18-28.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64322334003>

Salinas, Gonzalo E. & Espinosa, Fernando F. & Dias, A. (2012). Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 20 (2),242- 254.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77225001011>

Torres-Arcique, R. & Magaña-Jiménez, D. & Aguilar-Otero, J. R. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento utilizando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*. 25 (1),15-26  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>

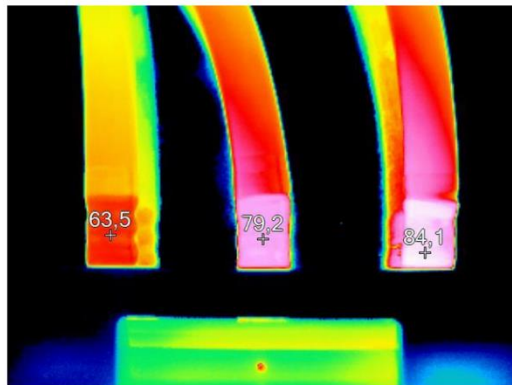
Troncoso-Fleitas, M. de la C., & Acosta-Palmer, H. (2011). El mantenimiento en la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de generación de vapor. *Ingeniería Mecánica*, 14 (2),140-150.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117950006>

## APÉNDICES

Para la sección que se muestra a continuación es información que se utilizó para la realizar la investigación y que no se sita en el trabajo

### Apéndice 1

*Ejemplo de informe termográfico*



ENTRADA FUSIBLES FASE B Y C,  
B.CIRCULACION 2.IS2



IMAGEN DE LUZ VISIBLE

#### Información de la imagen

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| Temperatura de fondo  | 22,9°C          |
| Emisividad            | 0,95            |
| Temperatura promedio  | 41,1°C          |
| Rango de la imagen    | 25,4°C a 86,8°C |
| Tamaño de sensor IR   | 320 x 240       |
| Distancia al objetivo | 0,66m           |

|                          |                                                     |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|
| Hallazgo                 | Fase B y C más caliente que la fase A               |
| Acción recomendada       | Revisión de apriete con torque adecuado.            |
| Prioridad de reparación: | Precaución, programar revisión lo más antes posible |

#### Marcadores de la imagen principal

| Nombre | Temperatura | Emisividad |
|--------|-------------|------------|
| A      | 63,5°C      | 0,95       |
| B      | 79,2°C      | 0,95       |
| C      | 84,1°C      | 0,95       |

*Nota.* Ejemplo de informe termográfico. Elaboración propia.

Un estudio termográfico es un método que permite medir la temperatura de un cuerpo u objeto que está a cierta distancia gracias a la radiación infrarroja. Esta permite transformar la radiación térmica de un cuerpo en una imagen visible para el ojo humano.

## Apéndice 2.

### Estudio termográfico

| DESCRIPCIÓN                                                  | Segurida<br>d<br>Operativa | Siniestralida<br>d | Afecta<br>Generació<br>n |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)</b> | <b>Alta</b>                | <b>Alta 2</b>      | <b>No</b>                |
| MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #3 CALDERA #8 (BLOQUE #2)        | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR BOMBA DE ALIMENTACION #2(BLOQUE #2)                    | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR INDUCIDO #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)                     | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR INDUCIDO #2 CALDERA #8 (BLOQUE #2 )                    | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR FORZADO #1 CALDERA # 8 (BLOQUE #2)                     | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR FORZADO #2 CALDERA # 8 (BLOQUE #2)                     | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR SECUNDARIO #1 CALDERA #8 (BLOQUE #2)                   | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR SECUNDARIO #2 CALDERA#8 (BLOQUE #2)                    | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR VENTILADOR DETROIT STOKER CALDERA #8 (BLOQUE #2)       | Alta                       | Alta               | Si                       |
| MOTOR STOKER DRIVE/PARRILLA CALDERA #8(BLOQUE #2)            | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR STOKER DRIVE/PARRILLA CALDERA #8 (BLOQUE #2)           | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR CONDUCTOR DE CENIZA HUMEDA (BLOQUE #2)                 | Alta                       | Baja               | No                       |
| MOTOR BASCULA DE CARBON #2 (BLOQUE #2)                       | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR BASCULA DE CARBON #1 (BLOQUE #2)                       | Alta                       | Alta               | No                       |
| MOTOR CONDUCTOR RECLAMO #1 DE BAGAZO (BLOQUE #2)             | Media                      | Media              | No                       |
| MOTOR CONDUCTOR DE TABLILLAS (BLOQUE #2)                     | Media                      | Media              | No                       |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)                   | Media                      | Media              | No                       |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)                   | Media                      | Media              | No                       |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)                   | Media                      | Media              | No                       |

Continuación del Apéndice 2.

|                                                       |       |       |    |
|-------------------------------------------------------|-------|-------|----|
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #3 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOR ALIMENTADOR DE BAGAZO #2 (BLOQUE #2)            | Media | Media | No |
| MOTOREDUCTOR DE COMPUERTA DE BAGAZO #8<br>(BLOQUE #2) | Media | Media | No |

*Nota.* Descripción de activos evaluados. Elaboración propia, usando Excel.

Activos críticos que se evaluaron en planta, estos activos críticos es una muestra del universo que se tiene instalado hay diversidad de equipos tanto de tamaño como la potencia y también por la ubicación en la operación, todos son importantes, pero los que se muestran acá son los críticos.

### Apéndice 3.

#### Ejemplo de actividades programadas

| SEMANA | FECHA      | HORA          | ENSAYO                                 | EQUIPO                                 | ACTIVO    | AVISO     |
|--------|------------|---------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|-----------|
| 2      | 10/05/2023 | 07:00 - 10:00 | ULTRASONIDO ACÚSTICO (UTA)             | CALDERA 8                              |           |           |
|        | 11/05/2023 | 07:00 - 10:00 | ANÁLISIS DE VIBRACIONES                | INDUCIDO 2 CALDERA 5                   |           |           |
|        | 15/05/2023 | 13:00 - 15:00 | ANÁLISIS DE VIBRACIONES                | BOMBA DE POZO C8                       | 732-2022  | 720671    |
| 3      | 16/05/2023 | 07:00 - 10:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        |            | 10:00 - 12:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        | 17/05/2023 | 07:00 - 10:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        |            | 10:00 - 12:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        |            | 13:00 - 15:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        |            | 15:00 - 17:00 | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5                              | 0704-0005 | 720672    |
|        |            | 18/05/2023    | 07:00 - 10:00                          | ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESPESORES | CALDERA 5 | 0704-0005 |
| 4      | 23/05/2023 | 15:00 - 17:00 | ANÁLISIS DE VIBRACIONES                | VENTILADORES DE CALDERA 5              | 0704-0005 |           |
|        | 24/05/2023 | 07:00 - 10:00 | ANÁLISIS DE VIBRACIONES                | VENTILADORES DE CALDERA 5              |           |           |
|        |            | 10:00 - 12:00 | ANÁLISIS DE VIBRACIONES                | VENTILADORES DE CALDERA 5              |           |           |

Nota. Programa de actividades. Elaboración propia, usando Excel.

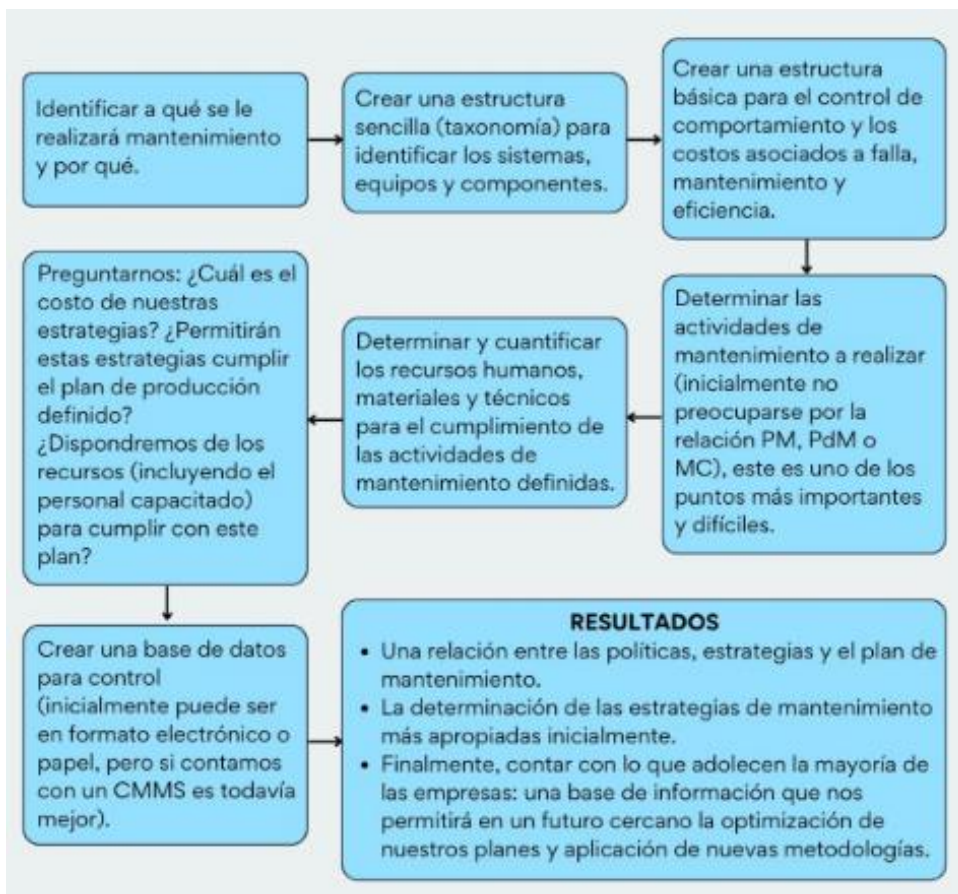
En la tabla se presentan los algunos fallos comunes que se presentan en motores eléctricos, estos fallos pueden ser determinados con las inspecciones o en algunas ocasiones ya cuando se presenta la falla.

## ANEXOS

En la sección siguiente se encuentra una imagen la cual se utilizó como guía para la realización de unos procedimientos de la realización de la investigación.

### Anexo 1

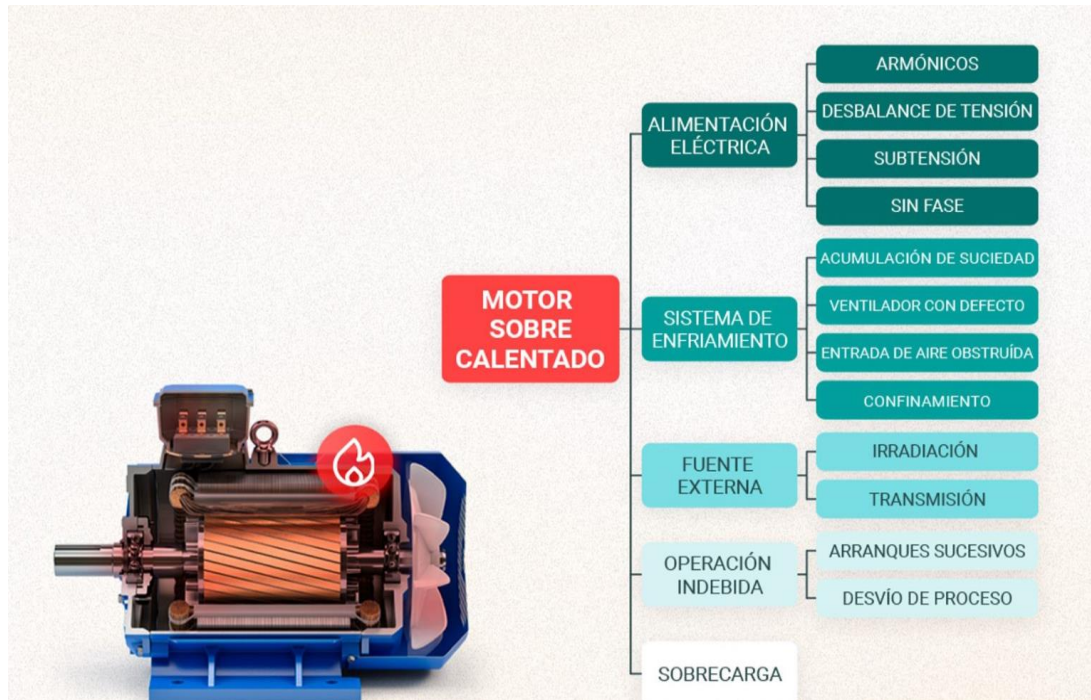
#### *Fases requeridas para la evaluación de activos*



*Nota.* Diagrama de impacto de la vida útil de los activos. Obtenido de Redalyc (s.f.) *Fallos de motores eléctricos*. <https://www.redalyc.org>

## Anexo 2.

### Matriz de fallos de motores eléctricos



Nota. Falla de motores por sobre calentamiento Obtenido de Redalyc (s.f.) *Fallos de motores eléctricos.* <https://www.redalyc.org>