





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

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y  
ULTRASONIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA AL VACÍO PARA PIEZAS DE  
POLIETILENO Y ABS**

**Ing. Douglas Rafaél Martínez Montes**

Asesorado por el MSC. Ing. Sandra Ninett Ramírez Flores

Guatemala, noviembre de 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y  
ULTRASÓNIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA AL VACÍO PARA PIEZAS DE  
POLIETILENO Y ABS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
POR

**ING. DOUGLAS RAFAÉL MARTÍNEZ MONTES**

ASESORADO POR EL MSC. ING. SANDRA NINETT RAMÍREZ FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA     | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I    | Ing. José Francisco Gómez Rivera      |
| VOCAL II   | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez   |
| VOCAL III  | Ing. José Milton de León Bran         |
| VOCAL IV   | Br. Luis Diego Aguilar Ralón          |
| VOCAL V    | Br. Christian Daniel Estrada Santizo  |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez       |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|             |  |
|-------------|--|
| DECANA      | Mta. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR  | MSc. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí         |
| EXAMINADORA | MSc. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores    |
| EXAMINADORA | Dra. Aura Marina Rodríguez Pérez           |
| SECRETARIO  | Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez      |



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

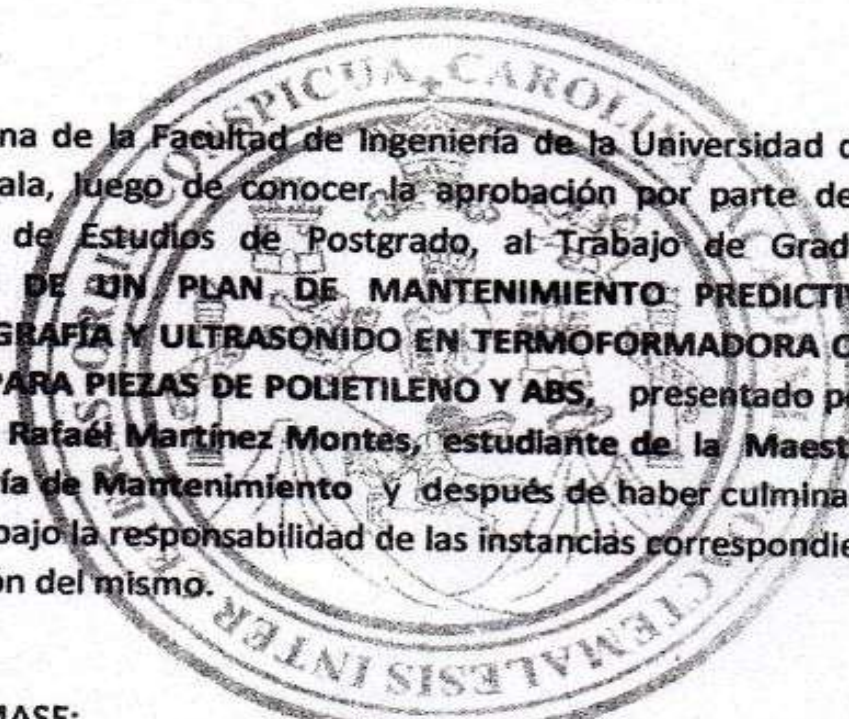
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y  
ULTRASÓNIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA AL VACÍO PARA PIEZAS DE  
POLIETILENO Y ABS**

Tema aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 11 de noviembre de 2019.

**Ing. Douglas Rafaél Martínez Montes**





La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y ULTRASONIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA AL VACÍO PARA PIEZAS DE POLIETILENO Y ABS**, presentado por el Ingeniero **Douglas Rafael Martínez Montes**, estudiante de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, noviembre de 2019  
AACE/asga



EEPF-1152-2019

En mi calidad de Director 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 y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y ULTRASONIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA EL VACÍO PARA PIEZAS DE POLIETILENO Y ABS"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Douglas Rafael Martínez Montes** quien se identifica con Carné 200413338 correspondiente al programa de Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Aplazamiento.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Mtro. Ing. Edgar Danilo Álvarez Cot  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2019



EEPTI-1153-2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y ULTRASONIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA EL VACIO PARA PIEZAS DE POLIETILENO Y ABS"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Douglas Rafael Martínez Montes** quien se identifica con Carné **200413338**.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramirez Flores**  
Coordinadora de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, noviembre de 2019



Maestro  
Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
USAC – Facultad de Ingeniería  
Presente.-

Estimado Mtro. Álvarez:

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico **Douglas Rafael Martínez Montes** quien se identifica con Carné **200413338** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICANDO TERMOGRAFÍA Y ULTRASONIDO EN TERMOFORMADORA QUE TRABAJA EL VACÍO PARA PIEZAS DE POLIETILENO Y ABS”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores  
Asesora

*Sandra Ninett Ramírez Flores*  
INGENIERA QUÍMICA, COL. No. 437  
Msc. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme cumplir una meta más en mi carrera, por darme la vida, por darme todo lo que tengo.
- Mis abuelos y padres** Rafaél Montes Marroquín y Zoila Alfaro Rivas (q.e.p.d.), por su esmero y valiosa motivación. Roberto Martínez y Margarita Montes de Martínez. Por su amor, será siempre mi inspiración.
- Mi esposa** Hilmy Muñoz de Martínez, por su apoyo incondicional, por ser un motivante en mi camino, por la paciencia obtenida en mi carrera.
- Mis hijos** Pablo Javier Martínez Muñoz y Margareth Raquel Martínez Muñoz, por ser dos motivaciones importantes en mi vida, por su amor y comprensión.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b> | Por ser la forjadora de mi carrera. Por guiarme, inspirarme y mostrarme el camino correcto. |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                 | Por instruirme en la ciencia.   |
| <b>Dra. Aura Marina Rodríguez</b>             | Por su valiosa instrucción en la revisión de mi tesis.                                      |
| <b>Msc. Sandra Ninett Ramírez</b>             | Por su apoyo y motivación incondicional.  |
| <b>Mis catedráticos de Postgrado</b>          | Por sus enseñanzas, con su ayuda educativa y consejos de vida.                              |
| <b>Mis amigos de Maestría</b>                 | Por su amistad, por contar con ellos en los momentos difíciles.                             |



## ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                             | V    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                   | VII  |
| GLOSARIO .....  | IX   |
| RESUMEN .....   | XI   |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS ..... | XIII |
| OBJETIVOS .....   | XV   |
| RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....                      | XVII |
| INTRODUCCIÓN .....  | XXI  |

|        |   |    |
|--------|---|----|
|        | 1. MARCO TEÓRICO                                | 1  |
| 1.1.   | Definición de mantenimiento predictivo .....    | 1  |
| 1.2.   | Mantenimiento basado en condición (CBM) .....   | 1  |
| 1.3.   | Técnica de termografía y ultrasonido .....      | 2  |
| 1.3.1. | Espectro electromagnético .....                 | 3  |
| 1.3.2. | Criterios de aceptación eléctricos .....        | 4  |
| 1.3.3. | Técnica de ultrasonido .....                    | 6  |
| 1.3.4. | Actuadores neumáticos .....                     | 6  |
| 1.3.5. | Frecuencias del sonido .....                    | 7  |
| 1.4.   | Piezas de polietileno y ABS termoformadas ..... | 8  |
| 1.4.1. | Definición de termoformado .....                | 9  |
| 1.4.2. | Calentamiento del semielaborado .....           | 10 |
| 1.4.3. | Temperatura .....                               | 12 |
| 1.4.4. | Calor .....                                     | 13 |
| 1.4.5. | Termoformado al vacío .....                     | 14 |
| 1.4.6. | Enfriamiento de la pieza termoformada .....     | 16 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.       | DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....                              | 17 |
| 2.1.     | Toma de imágenes termográficas .....                              | 17 |
| 2.1.1.   | Presentación de análisis de termografía .....                     | 17 |
| 2.1.2.   | Análisis estadístico de termografía.....                          | 20 |
| 2.2.     | Presentación de resultados de análisis de ultrasonido .....       | 21 |
| 2.3.     | Propuesta de mantenimiento predictivo .....                       | 26 |
| 3.       | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....                                   | 29 |
| 3.1.     | Fases de la investigación .....                                   | 29 |
| 3.1.1.   | Fase 1. Revisión y diagnóstico .....                              | 31 |
| 3.1.1.1. | Instrumentos y equipos de recopilación<br>de la información ..... | 32 |
| 3.1.1.2. | Equipo de ultrasonido .....                                       | 35 |
| 3.1.2.   | Fase 2. Sistemas y elementos críticos<br>monitoreados.....        | 37 |
| 3.1.2.1. | Identificación de modos de falla .....                            | 41 |
| 3.1.3.   | Fase 3. Correcciones en las fallas detectadas .....               | 44 |
| 3.1.4.   | Fase 4. Propuesta de inspección en orden de<br>trabajo .....      | 46 |
| 4.       | DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                     | 49 |
| 4.1.     | Análisis interno .....  | 49 |
| 4.2.     | Análisis externo .....  | 50 |
| 4.3.     | Discusión de resultados de termografía .....                      | 50 |
| 4.4.     | Discusión de resultados de análisis por ultrasonido .....         | 52 |
| 4.5.     | Frecuencia óptima de rutinas de mantenimiento predictivo .....    | 53 |
|          | CONCLUSIONES.....   | 55 |

RECOMENDACIONES..... 57  
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 59





# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Gráfico de condición versus tiempo de un elemento mecánico.....       | 2  |
| 2.  | Espectro electromagnético.....  | 4  |
| 3.  | Niveles de acción para el equipo eléctrico .....                      | 5  |
| 4.  | Cámara termográfica FLIR i3,.....                                     | 5  |
| 5.  | Vista de corte de un cilindro neumático.....                          | 7  |
| 6.  | Puerta termoformada .....   | 8  |
| 7.  | Molde para termoformado de HDF .....                                  | 10 |
| 8.  | Área de calentamiento .....   | 11 |
| 9.  | Controlador de temperatura marca Autonics.....                        | 12 |
| 10. | Diagrama PID, para alcanzar una temperatura con mayor precisión ..... | 13 |
| 11. | Termoformado al vacío .....   | 14 |
| 12. | Pieza termoformada al vacío.....                                      | 15 |
| 13. | Bomba de vacío marca Becker .....                                     | 15 |
| 14. | Ventilador eléctrico .....  | 16 |
| 15. | Imágenes termográficas de elementos de la máquina termoformadora..    | 18 |
| 16. | Reporte de termografía en borners de resistores.....                  | 19 |
| 17. | Condición termográfica de los borners de resistores .....             | 21 |
| 18. | Inspección por técnica de ultrasonido .....                           | 22 |
| 19. | Condición de medición por ultrasonido propagado por aire .....        | 23 |
| 20. | Condición de ultrasonido de los actuadores.....                       | 25 |
| 21. | Comportamiento del ultrasonido en el software Spectralyzer .....      | 25 |
| 22. | Diagrama de flujo de mantenimiento predictivo   propuesto .....       | 27 |
| 23. | Diagrama de flujo de monitoreo de condición .....                     | 30 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 24. | Selección de parámetros de monitoreo de condición .....                 | 32 |
| 25. | Cámara termográfica Flir i3 .....                                       | 34 |
| 26. | Equipo de ultrasonido .....   | 35 |
| 27. | Medición mediante la técnica de termografía.....                        | 36 |
| 28. | Medición mediante la técnica de ultrasonido .....                       | 36 |
| 29. | Historial de fallas .....   | 37 |
| 30. | Análisis de modo y efecto de falla.....                                 | 38 |
| 31. | Selección de técnicas de mantenimiento predictivo.....                  | 39 |
| 32. | Valores medidos de Temperatura y evaluados con Norma ANSI/NETA 40       |    |
| 33. | Tabla de severidad .....  | 41 |
| 34. | Imágenes de ultrasonido propagado por aire .....                        | 42 |
| 35. | Tabla de resultados de fugas por ultrasonido .....                      | 43 |
| 36. | Cambio de terminal con técnico de mantenimiento .....                   | 44 |
| 37. | Actuadores nuevos para sustituir dañados y realizar correcciones .....  | 45 |
| 38. | Cambio de kit de empaques para actuador No. 11.....                     | 45 |
| 39. | Orden de trabajo.....   | 47 |
| 40. | Condición termográfica de los borners después de las correcciones ..... | 49 |
| 41. | Mantenimiento correctivo a actuadores .....                             | 53 |

## TABLAS

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | Disposición de datos para análisis de Boxplot .....      | 20 |
| II.  | Disposición de datos para análisis de Boxplot .....      | 24 |
| III. | Listado de elementos a monitorear en termoformadora..... | 39 |
| IV.  | Disposición de datos para análisis de Boxplot .....      | 51 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>                       | <b>Significado</b>          |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>m</b>                             | Metro                       |
| <b>mm</b>                            | Milímetro                   |
| <b>nm</b>                            | Nanómetro                   |
| <b><math>\Omega</math></b>           | Ohmio                       |
| <b>Psi</b>                           | Libras por pulgada cuadrada |
| <b>kPa</b>                           | Kilopascales                |
| <b>dB</b>                            | Decibeles                   |
| <b><math>^{\circ}\text{C}</math></b> | Grados Celcius              |
| <b>mmHg</b>                          | Milímetros de mercurio      |



## **GLOSARIO**

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>ABS</b>           | Acrilonitrilo butadieno estireno.  |
| <b>Fogel</b>         | Es una marca comercial registrada de la empresa Fogel de Centroamérica, S.A. |
| <b>FROSTER</b>       | Modelo de equipo de refrigeración.   |
| <b>PID</b>           | (Proporcional integrativo derivativo) es un mecanismo de control genérico.   |
| <b>Semielaborado</b> | Materia prima para termoformar.  |
| <b>VOSO</b>          | Ver, oír, sentir, oler.  |



## RESUMEN

En Fogel de Centroamérica, S.A. la estrategia de mantenimiento preventivo tiene aproximadamente diez años de estar realizando y mejorando constantemente, el siguiente nivel para muchas empresas de categoría mundial es el mantenimiento predictivo, debido a las altas disponibilidades de maquinaria que se requieren en las plantas de producción de las cuales Fogel de Centroamérica, S.A. no es la excepción, desde ya en los objetivos del departamento de mantenimiento existe la implementación de las técnicas existentes dentro del mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo pareciera de fácil implementación, hay que considerar el costo inicial, ya que representan un número considerable para la adquisición de equipos y entrenamiento de personal y el compromiso de los altos mandos.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo, basado en normas internacionales que permitan alcanzar con éxito los objetivos planteados en la máquina termoformadora que trabaja al vacío para piezas de polietileno y ABS.

Esta investigación tiene un enfoque cualitativo y cuantitativo y es de tipo descriptiva, debido a que el tipo de estadística que se utiliza es con base a mediciones y toma de datos y no existe en ella ninguna prueba de tipo experimental.

Las técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en el desarrollo de la investigación son de termografía y ultrasonido propagado por aire, producto del análisis que sugiere la norma ISO 17359 obteniendo resultados que son valiosos para la toma de decisiones estratégica en el mantenimiento en el momento oportuno.

En la presentación de resultados se puede observar los hallazgos encontrados, se analizaron y posteriormente se toma la decisión de hacer los cambios necesarios, para alcanzar los valores aceptables.

Las conclusiones que se dan en el estudio demuestran la importancia y eficacia de dichas técnicas que facilitaron la detección de posibles fallas de una manera simple y comprensible, con los resultados se obtuvo mejora en la mantenibilidad de la máquina termoformadora, por lo que es un proyecto viable para ejecutarlo.

Las recomendaciones sugieren establecer rutinas, capacitar, evaluar las tendencias e integrar el plan de mantenimiento, las técnicas de mantenimiento predictivo.



## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

En Fogel de Centroamérica, S.A. no se cuenta con un plan de mantenimiento predictivo de termografía y ultrasonido, para la máquina termoformadora por ser una máquina con elementos neumáticos a presión y eléctricos que producen alta temperatura por radiación, se considera necesario la utilización de técnicas de mantenimiento predictivo que contribuyan a mejorar la disponibilidad de la máquina termoformadora.

### **Descripción**

En el departamento de termoformado, el mantenimiento se ejecuta de acuerdo al cronograma anual de mantenimiento preventivo que es aprobado por el Gerente de Mantenimiento y que está basado en frecuencias y solicitudes de mantenimiento correctivo, cuando al equipo presenta alguna anomalía o falla detectada por el personal de producción.

Las fallas en la máquina termoformadora de polietileno y ABS representan un período de tiempo para iniciarlas producto de la alta temperatura a la que está y debe bajar para manipular guardas o elementos que hallan fallado, con el monitoreo aplicando termografía y ultrasonido, se llevará a cabo una medición, para detectar una falla de forma temprana y así evitar tiempos muertos de operación por mantenimiento aumentando la disponibilidad del equipo.

## **Formulación de la pregunta central**

¿Cómo se puede mejorar el plan de mantenimiento establecido para una termoformadora que trabaja al vacío para piezas de polietileno y ABS?

## **Preguntas de investigación**

1. ¿Cuál es la situación actual de los elementos que se les debe aplicar la técnica de termografía y ultrasonido?
2. ¿Cuáles son los elementos críticos de la termoformadora que deben inspeccionarse con regularidad?
3. ¿Cuáles son las ventajas de la implementación del mantenimiento predictivo de la termoformadora?

## **Delimitación del problema**

Toda la investigación se desarrollará en la planta Fogel de Centroamérica, S. A. ubicada en 3<sup>a</sup>. avenida 8-92 lotificación el Rosario zona 3 de Mixco ciudad de Guatemala, en la máquina termoformadora que trabaja al vacío para piezas de polietileno y ABS.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar un plan de mantenimiento predictivo aplicando termografía y ultrasonido en termoformadora que trabaja al vacío piezas de polietileno y ABS.

### **Específicos**

1. Identificar los elementos que se les debe de aplicar la técnica de mantenimiento predictivo, termografía y ultrasonido.
2. Analizar la frecuencia con que deben de realizarse las inspecciones a los elementos críticos aplicando las técnicas de ultrasonido y termografía.
3. Determinar las ventajas de la implementación del mantenimiento predictivo aplicado a la termoformadora.



## **RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO**

### **Diseño de la investigación**

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo y cuantitativo, es de carácter no experimental que tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento para la máquina termoformadora que trabaja al vacío, para piezas de polietileno y ABS.

### **Tipo de investigación**

La presente investigación se define de tipo descriptiva e inductiva, aplicando normas, técnicas y/o modelos aplicados al mantenimiento predictivo a maquinaria industrial, con el propósito de obtener resultados que puedan ayudar a tomar decisiones o acciones que contribuyan al aprovechamiento de la vida útil del equipo y obtener una producción óptima en el proceso.

### **Alcance**

Está definido por las necesidades a cubrir y es de tipo descriptivo, que comprende el diseño de mantenimiento predictivo con la aplicación de técnicas de ultrasonido propagado por aire y análisis de termografía (IRT) a máquina termoformadora que trabaja al vacío, para piezas de polietileno y ABS, ubicada en planta Fogel de Centroamérica, S.A., en Guatemala.

## **Variables e indicadores**

La valuación será por método cuantitativo, que se obtendrán a partir de las inspecciones realizadas con los equipos de ultrasonido propagado por aire y termografía (IRT), comparando los resultados con las recomendaciones y criterios de aceptación recomendación ANSI/NETA.

Las variables a utilizar serán:

- Temperatura °C
- Sonido dB
- Frecuencia
- Tiempo min.
- Distancia m.

## **Fases de la investigación**

El presente trabajo de investigación se dividirá en las siguientes fases con el objetivo de obtener resultados y parámetros medibles para determinar las mejoras alcanzadas.

### **Fase 1**

Revisión documental y aplicación de la técnica de termografía y ultrasonido y determinar el estado actual de los elementos y revisión de fallas registradas en los archivos de mantenimiento sobre la máquina termoformadora al vacío.

## **Fase 2**

Identificar la frecuencia con base a las fallas registradas en el histórico y estado de los elementos, sistemas y puntos críticos que puedan afectar el funcionamiento de la máquina y que técnica aplicar, así como establecer los valores recomendados de temperatura o ultrasonido, según sea el caso.

## **Fase 3**

Determinar las ventajas obtenidas con la aplicación de la técnica de mantenimiento predictivo con base al impacto obtenido.

## **Fase 4**

Realizar propuestas de inspecciones de mantenimiento predictivo con las técnicas de termografía y ultrasonido aplicado a los elementos críticos de la máquina termoformadora e incluirlos en la orden de trabajo.

## **Instrumentos para la recolección de información**

Para la recolección de información utilizar las siguientes herramientas adicionales al equipo utilizado para termografía y ultrasonido tales como:

- Amperímetro
- Voltímetro
- Manómetro para medición de vacío
- Manómetro para medición de presión neumática

Estos se utilizarán para tomar las lecturas antes de iniciar las mediciones con las técnicas de mantenimiento predictivo, para posteriormente tabular los datos en diferentes formatos de acuerdo a las necesidades, según el caso, y establecer los valores con mayor confiabilidad.



## INTRODUCCIÓN

Con el avance de nuevas tecnologías los altos estándares en las técnicas de mantenimiento y la necesidad de conservar y tener una disponibilidad alta en los equipos de producción, las técnicas de mantenimiento han evolucionado convirtiéndose en un pilar fundamental para la industria.

El enfoque de este estudio será una innovación con las técnicas utilizadas para el mantenimiento predictivo que son aplicables para todo tipo de industrias; seleccionando la técnica adecuada a la necesidad se logra obtener resultados positivos. Las técnicas van desde una inspección (VOSO), hasta la utilización de equipo sofisticado y un amplio conocimiento, como es la termografía y ultrasonido propagado por aire.

Este estudio analizará los elementos en una máquina termoformadora de polietileno y ABS, la cual cuenta con el inconveniente, que si se presenta una falla toma un lapso significativo para alcanzar una temperatura donde los técnicos puedan manipular el o los elementos que presenten falla.

La técnica de mantenimiento predictivo de termografía y ultrasonido tiene la gran ventaja que puede efectuarse sin tener contacto con el equipo y poder determinar con facilidad el momento adecuado para corregir la falla.

La implementación del mantenimiento predictivo formará parte de la solución a fallas repetitivas y fallos inesperados. El resultado esperado es crear una línea de tendencias para anteponernos a un paro no planificado.

Para la factibilidad de la implementación del mantenimiento predictivo se cuenta con los recursos necesarios, herramienta y el personal técnico.

El presente trabajo consistirá en realizar la ruta de monitoreo del circuito de vacío, neumático y rodamientos por medio de ultrasonido. La termografía se utilizará en motor de bomba de vacío, elementos eléctricos y resistencias del área de horno donde se calienta la materia prima a termoformar.

La investigación está contemplada en los siguientes capítulos:

En el primer capítulo, marco teórico se describirá la técnica de mantenimiento predictivo termografía y ultrasonido y el proceso de Termoformado al vacío.

En el segundo capítulo, presentación de resultados se desarrollará la investigación enfocándose en la máquina de termoformado al vacío, así como de sus componentes, para llevar a cabo una rutina de mantenimiento predictivo.

En el tercer capítulo, discusión de resultados se presentarán los resultados obtenidos y se incorporarán a la rutina de mantenimiento e integrarlas a los formatos ya definidos por Fogel de Centroamérica, S.A., así como toda la documentación necesaria, para la implementación del plan de mantenimiento predictivo.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Definición de mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo es uno de los mantenimientos más eficaces en la actualidad, utilizando variable física con el desgaste o estado de una máquina, por medio de la trazabilidad de parámetros y condiciones operativas del equipo. García (2012). También se puede decir, que es una actividad que consiste en dar un seguimiento, mediante una medición periódica o continua a un sistema, con diferentes variables y mecanismos que pueden constituir una máquina y hacer comparaciones con patrones preestablecidos por normas o previos estudios o condiciones de diseño González (2009).

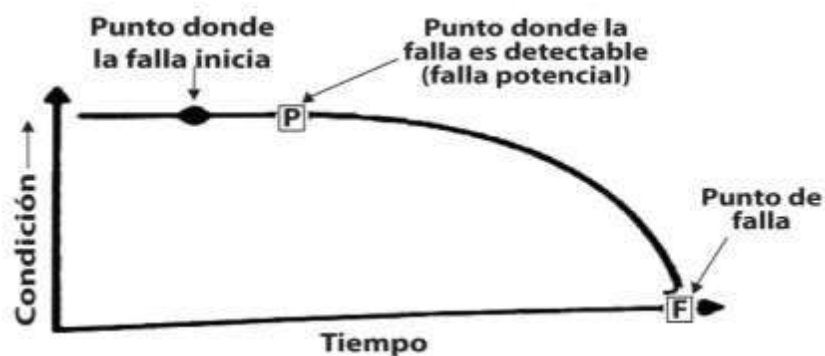
El objetivo primordial de esta estrategia o técnica es detectar de manera temprana una falla, y así actuar de manera programada y disminuir la probabilidad de fallas catastróficas y lograr mantener el equipo con un indicador de disponibilidad alto, así como disminuir los costos de reparación Altmann (2007).

## **1.2. Mantenimiento basado en condición (CBM)**

El mantenimiento basado en condición, es una estrategia utilizada por mantenimiento donde se registra la condición de un sistema o elemento para ver su comportamiento en el transcurso del tiempo. Villa (2011), lo define como: “actividad que recomienda acciones de mantenimiento basadas en la información recolectada a través del monitoreo de la condición, intenta evitar tareas de mantenimiento innecesarias mediante acciones solo donde hay evidencia de

comportamientos anormales de un elemento” (p. 32). Se observan las mediciones y se analizan sus tendencias, para la toma de decisiones.

Figura 1. **Gráfico de condición versus tiempo de un elemento mecánico**



Fuente: Altmann. (2007). *Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento predictivo.*

### 1.3. **Técnica de termografía y ultrasonido**

Esta técnica comprende en revelar la energía emitida en ondas electromagnéticas infrarrojas, por el objeto o material que se analiza (Marks volumen I) y que permite determinar temperaturas sin necesidad de contacto de forma física con el elemento a estudiar, los rayos infrarrojos emitidos por los objetos o cuerpos son convertidos a imágenes que se pueden visualizar con colores adecuados por medio de una cámara termográfica (IR). FLIR (2017); la reflexión producto del material o la superficie causa un nivel de energía radiada y puede ser interpretada por la cámara termográfica de tecnología infrarroja Girdhar (2004).

### **1.3.1. Espectro electromagnético**

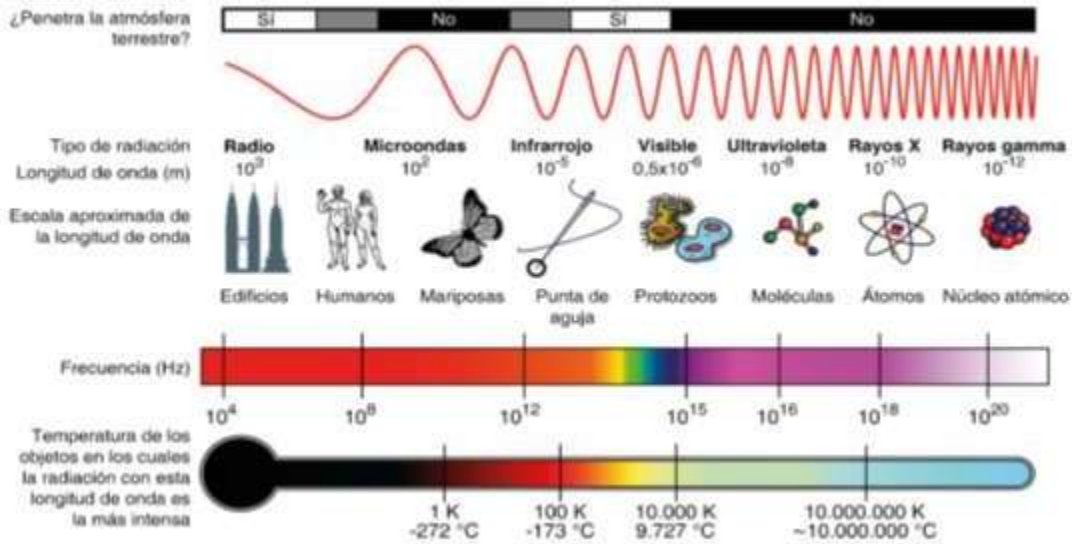
En el espectro se agrupan todas las longitudes de onda desde las de onda corta hasta las de radio que son de mayor longitud.

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Refiriéndose a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar, mediante espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación. (Abarca D. & Iglesias F., 2012, p.10).

Es conveniente considerar los siguientes tipos de radiación electromagnética con más detalle:

- La luz visible
- Infrarrojo
- Microondas
- Ondas de radio
- Ultravioleta
- Rayos X
- Rayos gamma

Figura 2. Espectro electromagnético



Fuente: Wikipedia (2018). *Espectro electromagnético*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico).

### 1.3.2. Criterios de aceptación eléctricos

La norma ISO 18434-1 clasifica las fallas tomando unos criterios de aceptación de la NETA, para equipos o sistemas eléctricos donde da valores tomando en cuenta la temperatura ambiente como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3. Niveles de acción para el equipo eléctrico

| Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA,<br>* O/S: Temperatura Over Similar - O/A: Temperatura Over/Ambient |                      |                 |
|--|----------------------|-----------------|
|  | CLASIFICACIÓN        | CONDICIÓN       |
| 1°C - 10°C O/A ó <3°C O/S  | En buen estado       | BUENO           |
| 11°C-20°C O/A y 3°C a 15°C O/S   | Probable deficiencia | ACEPTABLE       |
| 21°C-40°C O/A y >15°C O/S  | Deficiencia          | INSATISFACTORIA |
| >40°C O/A y >15°C O/S  | Deficiencia mayor    | PELIGROSA       |

Fuente: ANSI/NETA (2017). *Para evaluación de riesgos por temperatura en componentes eléctricos.*

Figura 4. Cámara termográfica FLIR i3



Fuente: Flirmedia (2017). *Cámara termográfica.* Recuperado de <https://www.flirmedia.com>.

### **1.3.3. Técnica de ultrasonido**

Como lo explica Marks, en el manual del ingeniero mecánico. “El análisis de señal acústica o ultrasonido comprende el análisis de la energía de sonido” (Marks,1992) y la técnica de ultrasonido es muy utilizada en diferentes aplicaciones en la industria una de ellas es la detección de fugas en sistemas de aire comprimido y sistemas de vacío; “el sonido se propaga en forma de ondas” Ensayo no destructivo por método de ultrasonido (n.d.), esto nos ayuda conociendo las propiedades de las ondas y la utilización de equipo adecuado a detectar fallas o fugas en sistemas tales como: neumáticos, bombas de vacío, válvulas, trampas de vapor, entre otros. “El sonido tiene como fuente la propiedad mecánica vibratoria que viaja a través de un medio y es percibido como “sonido” por el receptor” UE systems, (1997, p.10).

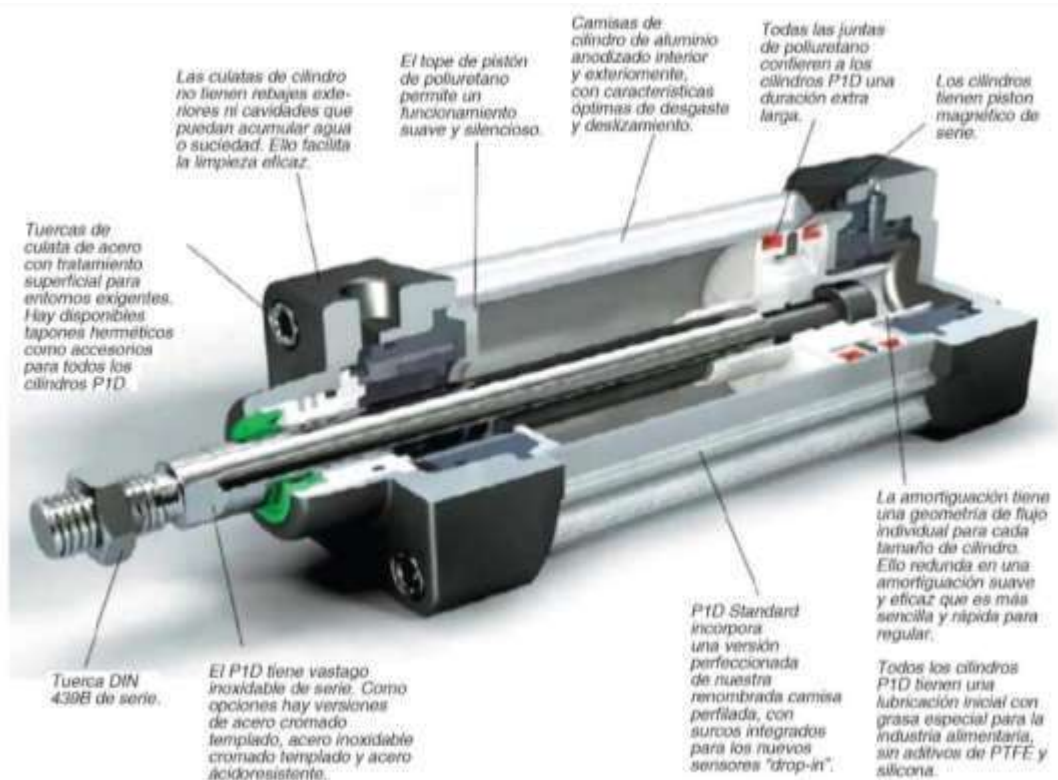
Como lo menciona Olarte & Botero (2011), debe tenerse la tecnología necesaria, para que el ultrasonido pueda escucharse o visualizarse en un display mediante técnicas o circuitos de amplificación, hoy en día ya se cuenta con instrumentos específicos para esta técnica de mantenimiento.

### **1.3.4. Actuadores neumáticos**

Cilindros neumáticos es un tipo de actuador que el accionamiento se realiza mediante aire comprimido, están divididos en dos grandes grupos: cilindros de simple efecto y cilindros de doble efecto (Carrobes, 2000); el de simple efecto actúa en una sola de las cámaras y el retorno se realiza por un muelle, en cambio el de doble efecto utiliza aire comprimido en ambas cámaras.



Figura 5. Vista de corte de un cilindro neumático



Fuente: Rosero L. (2013). *Actuador neumático*.

### 1.3.5. Frecuencias del sonido

Rimoldi (2006), afirma que, en el rango de frecuencias del sonido no todo es audible para los seres humanos, existe un rango, el cual puede diferir entre una y otra persona, por cuestiones de anatomía o edad, este rango se encuentra alrededor de 16 Hz como el límite inferior y el superior 20 KHz. Los rangos se encuentran clasificados de la manera siguiente:

- Subsónico:  $f < 16\text{Hz}$ : no se escucha ningún tono, aunque exista presión entre las moléculas.
- Sónico:  $16\text{Hz} \leq f \leq 20\text{KHz}$ : rango audible por los humanos.

- Ultrasónico:  $f > 20\text{KHz}$  comienza el umbral del dolor.

#### 1.4. Piezas de polietileno y ABS termoformadas

La técnica de termoformado se ha practicado con mucho éxito en la industria y ha evolucionado a pasos agigantados, siendo muy importante para el desarrollo de la industria y la utilización de polímeros.

Las nuevas necesidades del mercado de refrigeración, cada día son más exigentes y las normativas en la industria con respecto al medio ambiente se va haciendo más rigurosas, dependiendo en que mercado quiera ingresar, estas dependerán de la ubicación del mercado, por ejemplo el estadounidense es más exigente que el centroamericano, lo cual conlleva a que la maquinaria utilizada, para el proceso de termoformado evolucione con nuevas tecnologías como la automatización industrial, que a la vez requiere mantenimiento mayor calificado, los nuevos polímeros con nuevas propiedades, para una mejor innovación en los acabados de los productos termoformados como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6. **Puerta termoformada**



Fuente: Fogel (2017). *Puerta termoformada*. Recuperado de <https://www.fogel-group.com>.

### **1.4.1. Definición de termoformado**

El termoformado es un proceso mediante el cual se alcanza a dar forma a una lámina plástica por medio de transferencia de calor y la utilización de un sistema de vacío (600 a 760 mmHg), dándole forma por medio de un molde que puede ser fabricado de madera, HDF, MDF o aluminio. El molde debe soportar valores de temperatura superiores a los cuales se lleva a cabo el proceso de Termoformado. Pérez (2012).

Entre los procesos de termoformado, la inyección y el soplado, el termoformado permite realizar producciones pequeñas por su bajo costo en matricería obteniendo mayor utilidad en producciones altas.

Los materiales más demandados para termoformado son PET PSI, PP, PAI, PEAD, ABS. Otros materiales que se pueden termoformar son: PVC, acrílico, policarbonato, entre otros. Los espesores varían dependiendo la necesidad o características de diseño, los más utilizados van de 0,2 mm para envases descartables a 6 mm en la mayoría de piezas o carcasas de electrodomésticos y maquinaria, “pero en la industria del empaque la mayoría de las operaciones de termoformado se utilizarán con películas delgadas” Molina (2008).

Una característica a tomar en cuenta en este proceso de termoformado, la pieza debe ser desmoldable con la mayor facilidad posible, esto podría lograrse haciendo la matriz o molde con mayor dimensión en la base con respecto a la parte superior. “Este ángulo de desmolde y la aplicación de algún tipo de lubricante ayuda considerablemente al proceso de desmolde y generalmente es de 3 grados como mínimo” (Gruenwald, 1998).

Molina (2008) afirma: “El método más antiguo es el termoformado al vacío, llamado simplemente formado al vacío en sus inicios, en los años mil novecientos cincuenta” (p 33). En el cual se usa presión negativa respecto a la atmosférica, para adherir la lámina precalentada dentro de la cavidad del molde.

En Fogel de Centroamérica se utilizan moldes de HDF (fibra de alta densidad) y en los casos de geometría compleja de aluminio, los cuales han cumplido satisfactoriamente con los estándares de calidad del proceso.

**Figura 7. Molde para termoformado de HDF**



Fuente: elaboración propia.

Existen 3 etapas del termoformado, que son: 1). Calentamiento del semielaborado. 2). Proceso de vacío y 3). Enfriamiento.

#### **1.4.2. Calentamiento del semielaborado**

El calentamiento se realiza mediante resistores eléctricos, “la resistencia de cualquier material con un área transversal uniforme se determina, mediante los siguientes factores: material, longitud, área transversal y temperatura”

Boylestad, (2004, p.59). En la parte superior de la lámina de plástico se efectúa la transferencia de calor a una distancia aproximada de 500mm. Dependiendo del polímero, su espesor y color, así es como debe de durar el ciclo de calentamiento como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8. **Área de calentamiento**



Fuente: elaboración propia.

Cengel (2011), afirmaba que: “el calor, es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura”. (p2), con este proceso logramos que la lámina a termoformar alcance un estado moldeable.

El proceso de calentamiento es controlado por medio de la automatización industrial, con controladores de temperatura, son dispositivos electrónicos que

con la ayuda de otros dispositivos como las termocuplas pueden manejar valores programados y mantenerlos de tal manera que la temperatura se mantenga controlada en todo momento como una función PID (Sistema proporcional integral derivativo).

Figura 9. **Controlador de temperatura marca Autonics**



Fuente: Autonics. (2017). *Catálogo de marca*.

### 1.4.3. **Temperatura**

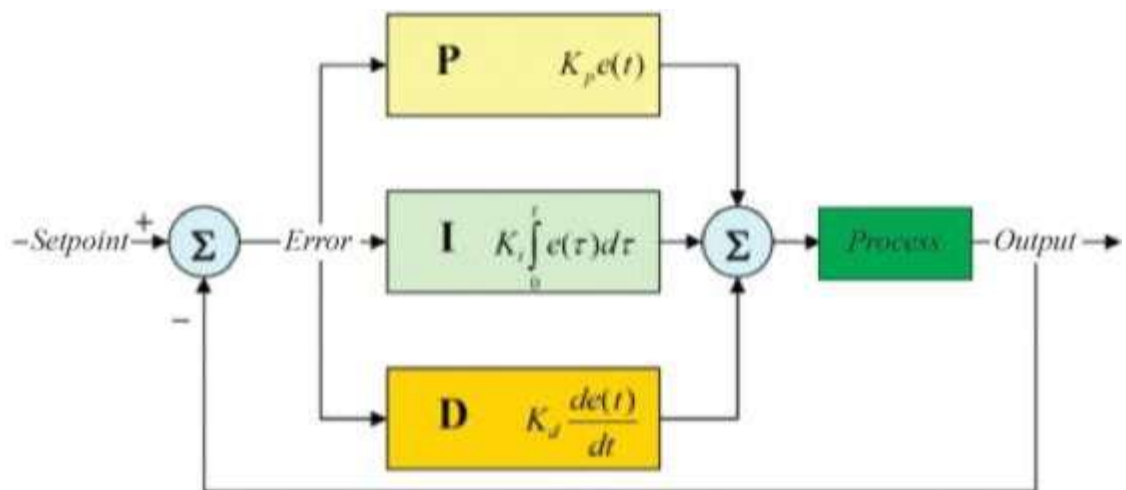
La temperatura es un fenómeno de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas de un elemento o sustancia y se miden, se dice que dos objetos tienen equilibrio térmico si y solo si tienen la misma temperatura y las mediciones se dividen en dos tipos absoluta y relativa.

#### 1.4.4. Calor

El calor se puede definir como la energía cinética total de todos los átomos y está relacionada directamente con la temperatura, pero con conceptos diferentes, además existen diferentes tipos de calor que a continuación se describen:

- Calor sensible: Este fenómeno se da cuando hay un cambio de entalpia y se asocia directamente a un cambio de temperatura.
- Calor latente: Este tipo de calor se da cuando hay un cambio de entalpía, caracterizado por un cambio de fase de modo isotérmica.
- Calor de reacción: Es requerido por una reacción química.
- Calor eléctrico: Se produce al existir un flujo de electrones llamado corriente eléctrica.

Figura 10. Diagrama PID, para alcanzar una temperatura con mayor precisión



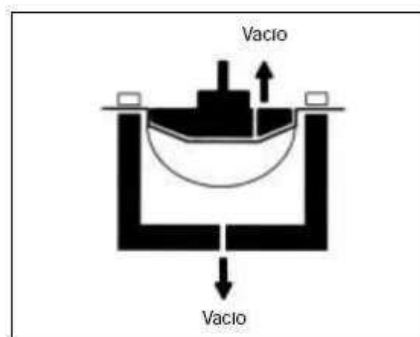
Fuente: Rocatek (2017). Diagrama PID. Recuperado de <https://www.rocatek.com>.

#### 1.4.5. Termoformado al vacío

Es uno de los procesos versátiles y más económicos. Consiste en sujetar la materia prima en un mecanismo, luego aumentarle la temperatura hasta alcanzar el estado moldeable, el cual por medio del vacío tomará la forma del molde de acuerdo al diseño adaptándose completamente a la geometría deseada. Morton (1989), afirma: “El aire que queda entre el molde y el semielaborado se elimina mediante la etapa de vacío (600 a 700mmHg), que atrae la lámina contra la superficie y contornos del molde. Una vez que se enfría se extrae el molde” (p 104).

En la siguiente figura 6, se muestra el proceso de termoformado al vacío (1) se suaviza la lámina plana de plástico por medio de transferencia de calor. (2) se coloca sobre un molde diseñado previamente; (3) el vacío se inyecta por medio de agujeros en el molde que atraen la lámina hacia la cavidad; (4) el plástico alcanza la dureza desviada sobre molde; (5) finalmente se desmolda la pieza, para ser recortada de la hoja.

Figura 11. Termoformado al vacío



Fuente: D. h. Morton-Jones (1989). *Procesamiento de plásticos*.



Figura 12. **Pieza termoformada al vacío**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Bomba de vacío marca Becker**



Fuente: elaboración propia.

El sistema de vacío, está compuesto por una bomba que genera una presión negativa respecto de presión atmosférica conectada a un tanque. “Se recomienda diseñar un recipiente para una presión mayor que la de operación” Megyesy & Eugene (1992 p. 21).

#### **1.4.6. Enfriamiento de la pieza termoformada**

El proceso de enfriamiento empieza cuando se ha alcanzado la forma deseada del termoplástico en el molde, después de un tiempo, es enfriado por aire forzado que se obtiene utilizando un ventilador en una posición estratégica, para dirigir el aire y alcanzar la temperatura donde la pieza está en su estado rígido y concluye cuando la temperatura ha descendido para desmoldar sin que sufra ningún cambio que pueda afectar su calidad o estética.

**Figura 14. Ventilador eléctrico**



Fuente: elaboración propia.

## **2 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

La estrategia del mantenimiento basada en monitoreo con técnicas de termografía y ultrasonido, se ejecutó en el departamento de termoformado en la máquina termoformadora de polietileno y ABS, con el objetivo de verificar condiciones del equipo y intervenir en el tiempo justo para evitar una falla que afecta la disponibilidad de la máquina consecuentemente la producción.

### **2.1. Toma de imágenes termográficas**

Las imágenes de termografía resultan muy versátiles para realizar un mantenimiento predictivo, ya que cuentan con numerosas ventajas muy importantes, tales como tomar la medición con el equipo operando y se puede realizar a una distancia segura para el ingeniero, técnico o persona designada para tomar la imagen.

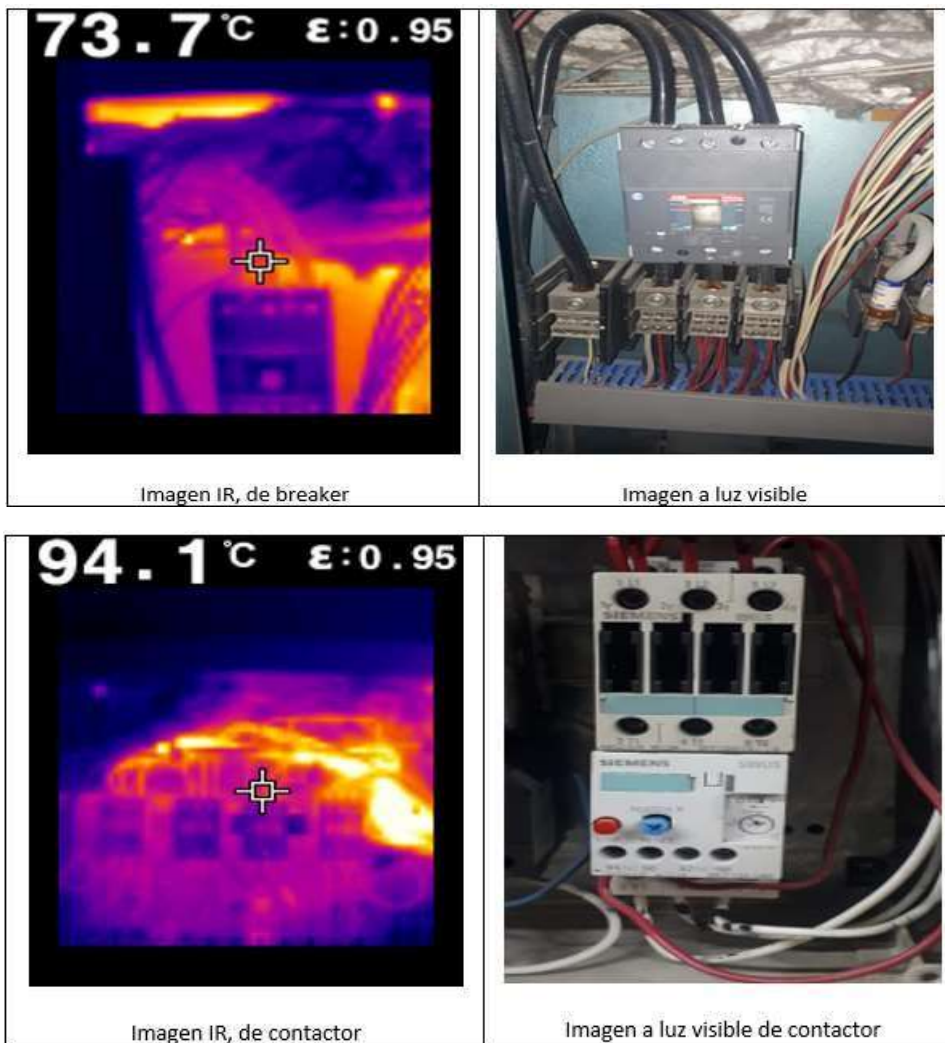
Se realizó el análisis termográfico para cada uno de los elementos elegidos, se muestran las siguientes imágenes individuales obtenidas en la figura 15.

#### **2.1.1. Presentación de análisis de termografía**

Con base en las imágenes termográficas anteriores, se obtiene una serie de información difícil de comprender, si no se conoce la información del estado de los elementos y poder así tomar una decisión al encontrar un valor fuera de rango de aceptación una a una, lo cual crea la necesidad de conocer la información de una forma rápida el estado de los elementos medidos y con ello facilitar la toma de decisiones al encontrar un valor fuera de rango, por medio de una tabla o algo similar; en el departamento de mantenimiento el ingeniero o

responsable del análisis la toma de decisiones debe recibir información fácilmente comprensible para que cumpla su objetivo que es mantener dentro de los valores de aceptación el equipo.

Figura 15. **Imágenes termográficas de elementos de la máquina termoformadora**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 16, se muestra la información de termografía realizada después de hacer las correcciones en anomalías detectadas.

Figura 16. Reporte de termografía en borners de resistores

| Máquina Termoformadora   |                         |            |                      |                                   |                |                            |
|--|-------------------------|------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------------|
| Realizado por  | Werner Chet             |            |                      |                                   |                |                            |
| Área   | Termoformado            |            |                      |                                   |                |                            |
| Equipo utilizado   | Cámara Termográfica     |            |                      |                                   |                |                            |
| Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA,<br>* O/S: Temperatura Over Similar - O/A: Temperatura Over/Ambient |                         |            |                      |                                   |                |                            |
|  |                         |            | CLASIFICACIÓN        | CONDICIÓN                         |                |                            |
| 1°C - 10°C O/A ó <3°C O/S  |                         |            | En buen estado       | BUENO                             |                |                            |
| 11°C-20°C O/A y 3°C a 15°C O/S   |                         |            | Probable deficiencia | ACEPTABLE                         |                |                            |
| 21°C-40°C O/A y >15°C O/S  |                         |            | Deficiencia          | INSATISFACTORIA                   |                |                            |
| >40°C O/A y >15°C O/S  |                         |            | Deficiencia mayor    | PELIGROSA                         |                |                            |
| Fecha de Análisis  | Temperatura Ambiente °C | No. Borner | Temperatura °C       | Diferencial de Temperatura °C O/S | Clasificación  | Condición segura ANSI/NETA |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 1          | 139.5                | 3                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 2          | 138                  | 1.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 3          | 139                  | 2.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 4          | 140                  | 3.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 5          | 145                  | 8.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 6          | 143.5                | 7                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 7          | 142                  | 5.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 8          | 141.5                | 5                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 9          | 140.4                | 3.9                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 10         | 142.4                | 5.9                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 11         | 143                  | 6.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 12         | 145.1                | 8.6                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 13         | 143.1                | 6.6                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 14         | 140.5                | 4                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 15         | 141.8                | 5.3                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 16         | 139                  | 2.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 17         | 145                  | 8.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 18         | 147                  | 10.5                              | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 19         | 143.5                | 7                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 20         | 140.1                | 3.6                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 21         | 140.5                | 4                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 22         | 144                  | 7.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 23         | 148.5                | 12                                | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 24         | 143                  | 6.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 25         | 139                  | 2.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 26         | 148                  | 11.5                              | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 27         | 140.7                | 4.2                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 28         | 140                  | 3.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 29         | 145                  | 8.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 30         | 141.5                | 5                                 | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 31         | 140                  | 3.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 32         | 143.2                | 6.7                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 33         | 143                  | 6.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 34         | 149.9                | 13.4                              | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 35         | 146                  | 9.5                               | En buen estado | BUENO                      |
| 22/01/2019   | 136.5                   | 36         | 146.5                | 10                                | En buen estado | BUENO                      |

Fuente: elaboración propia.

### 2.1.2. Análisis estadístico de termografía

El siguiente análisis estadístico fue realizado en borners de resistores para las mediciones de termografía, utilizando el diagrama de cajas y bigotes o diagrama de boxplot como se le llamará de aquí en adelante. Es una herramienta muy útil para analizar grandes cantidades de datos, como en este caso.

Tabla I. Disposición de datos para análisis de Boxplot

|                  | Valores °C | Ancho °C |
|------------------|------------|----------|
| Minimo           | 138        | 138      |
| Q1               | 140        | 2.32     |
| Mediana          | 143        | 2.38     |
| Q3               | 145        | 2.30     |
| Máximo           | 150        | 4.90     |
| Datos atípicos 1 | 0          | 0        |
| Datos atípicos 2 | 0          | 0        |

Fuente: elaboración propia.

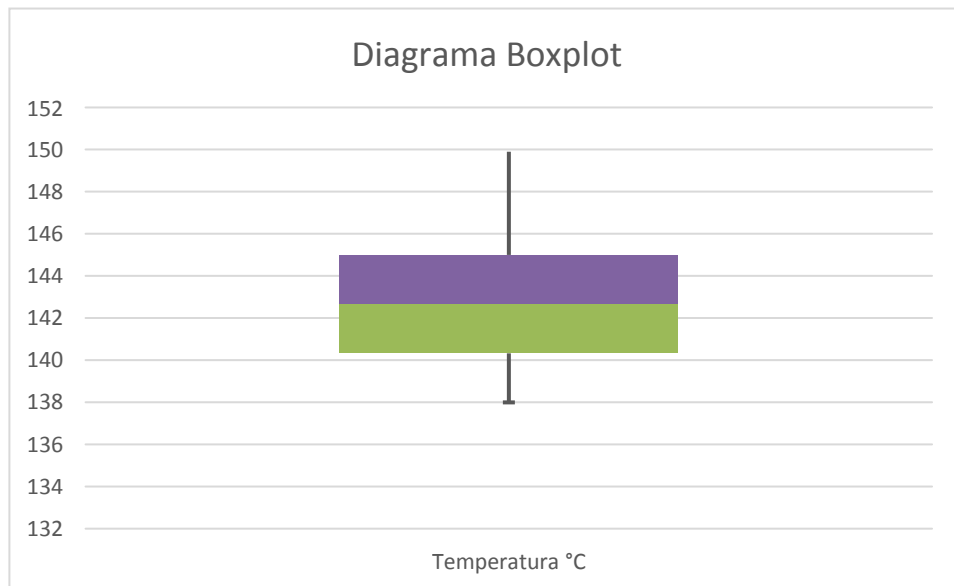
La siguiente figura agrupa los valores de los parámetros observados en los borners de los resistores.

Estos datos representan los valores de temperatura en cada uno de los borners de la máquina termoformadora y si se determina alguna desviación de valores esto debe ser objeto de análisis para aplicar la opción correctiva necesaria.

Este análisis permite inspeccionar el grupo de resistores en conjunto y con el tiempo si se sigue estrictamente con el programa de mantenimiento predictivo

se pueden ir generando tendencias individuales de cada resistor que ayudarán a definir el comportamiento en cada uno de ellos.

**Figura 17. Condición termográfica de los borners de resistores**



Fuente: elaboración propia.

## **2.2. Presentación de resultados de análisis de ultrasonido**

Con los datos obtenidos con el equipo Ultraprobe se encuentran las intensidades del sonido en diferentes puntos e identificándose fugas en los elementos a los cuales se les aplicó la técnica de ultrasonido y posteriormente corregirlas.

Figura 18. Inspección por técnica de ultrasonido



Fuente: elaboración propia.



Figura 19. Condición de medición por ultrasonido propagado por aire

| CRITERIOS DE SEVERIDAD     |                 |                     |           |                           |  |
|----------------------------|-----------------|---------------------|-----------|---------------------------|--|
| Realizado por              |                 | Werner Chet         |           |                           |  |
| Área                       |                 | Termoformado        |           |                           |  |
| Equipo utilizado           |                 | Cámara Termográfica |           |                           |  |
| 10<br>Peligroso sin alerta |                 |                     |           | 9<br>Peligroso con alerta |  |
| 8<br>Muy alto              |                 |                     |           | 7<br>Alto                 |  |
| 6<br>Moderado              |                 |                     |           | 5<br>Bajo                 |  |
| 4<br>Muy Bajo              |                 |                     |           | 3<br>Menor                |  |
| 2<br>Muy Menor             |                 |                     |           | 1<br>No hay defectos      |  |
| Fecha de Análisis          | No. De actuador | Fuga Si/No          | Severidad | Sonido dB                 |  |
| 22/11/2018                 | 1               | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 2               | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 3               | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 4               | Si                  | 4         | 57                        |  |
| 22/11/2018                 | 5               | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 6               | Si                  | 4         | 57                        |  |
| 22/11/2018                 | 7               | Si                  | 4         | 57                        |  |
| 22/11/2018                 | 8               | Si                  | 4         | 57                        |  |
| 22/11/2018                 | 9               | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 10              | Si                  | 5         | 58                        |  |
| 22/11/2018                 | 11              | Si                  | 6         | 59                        |  |
| 22/11/2018                 | 12              | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 13              | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 14              | No                  | 1         | 51                        |  |
| 22/11/2018                 | 15              | Si                  | 6         | 59                        |  |

Continuación figura 19.

|            |    |    |   |    |
|------------|----|----|---|----|
| 22/11/2018 | 16 | Si | 6 | 59 |
| 22/11/2018 | 17 | No | 1 | 51 |
| 22/11/2018 | 18 | No | 1 | 51 |
| 22/11/2018 | 19 | No | 1 | 51 |
| 22/11/2018 | 20 | Si | 4 | 57 |
| 22/11/2018 | 21 | Si | 3 | 56 |
| 22/11/2018 | 22 | Si | 4 | 57 |
| 22/11/2018 | 23 | Si | 6 | 59 |
| 22/11/2018 | 24 | Si | 4 | 57 |

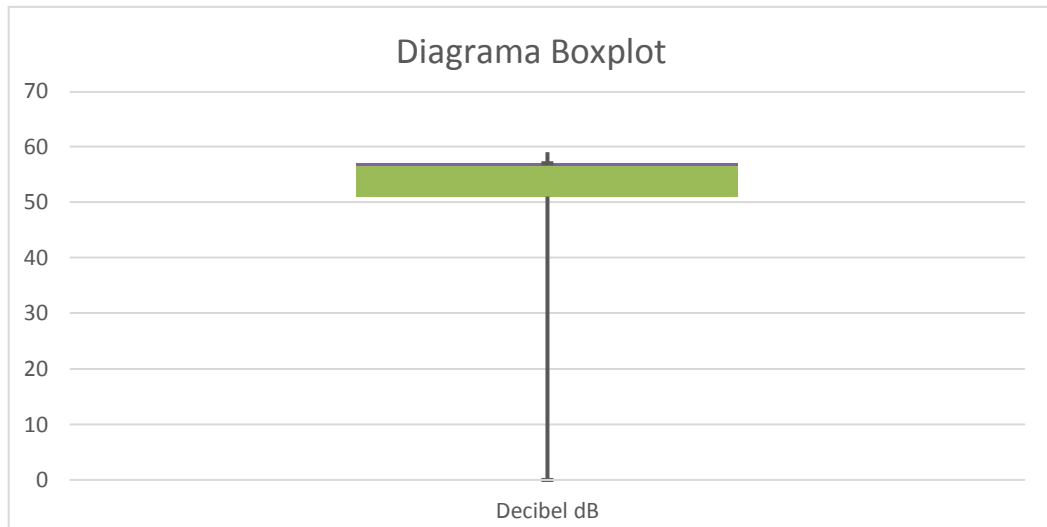
Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Disposición de datos para análisis de Boxplot**

|                  | Valores dB | Ancho dB |
|------------------|------------|----------|
| Minimo           | 51         | 51       |
| Q1               | 51         | 0        |
| Mediana          | 56.5       | 5.5      |
| Q3               | 57         | 0.5      |
| Máximo           | 59         | 2        |
| Datos atípicos 1 | 0          | 0        |
| Datos atípicos 2 | 0          | 0        |

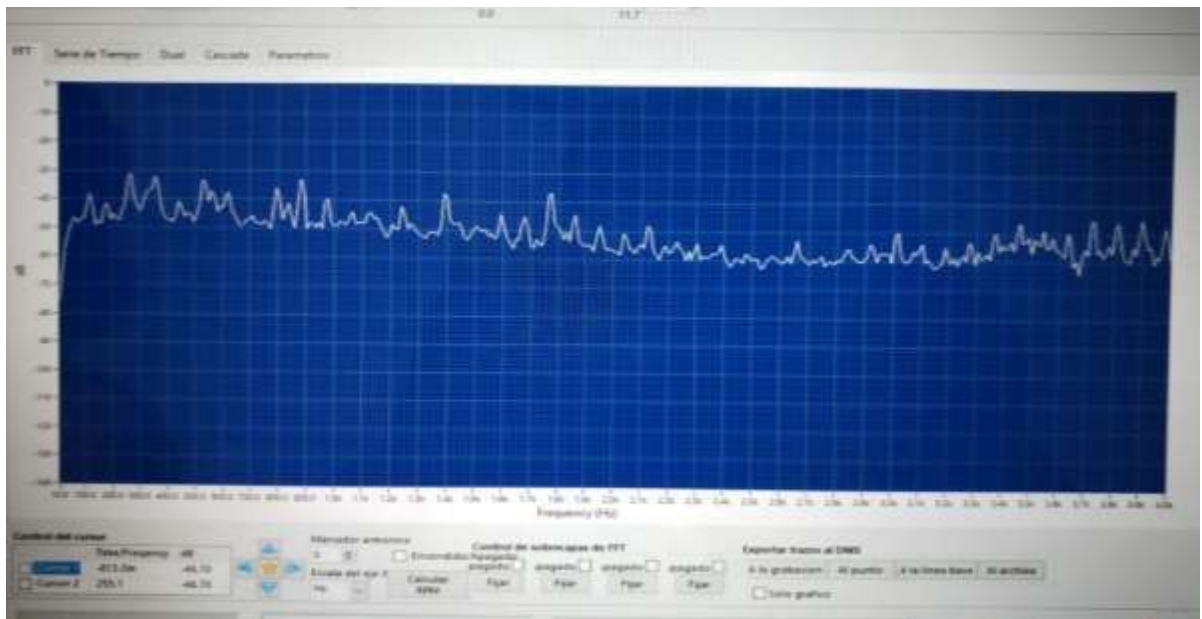
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Condición de ultrasonido de los actuadores**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comportamiento del ultrasonido en el software Spectralyzer**



Fuente: elaboración propia, gráfica de una fuga de aire, analizada en el software UE Spectralyzer 4.2.

### **2.3. Propuesta de mantenimiento predictivo**

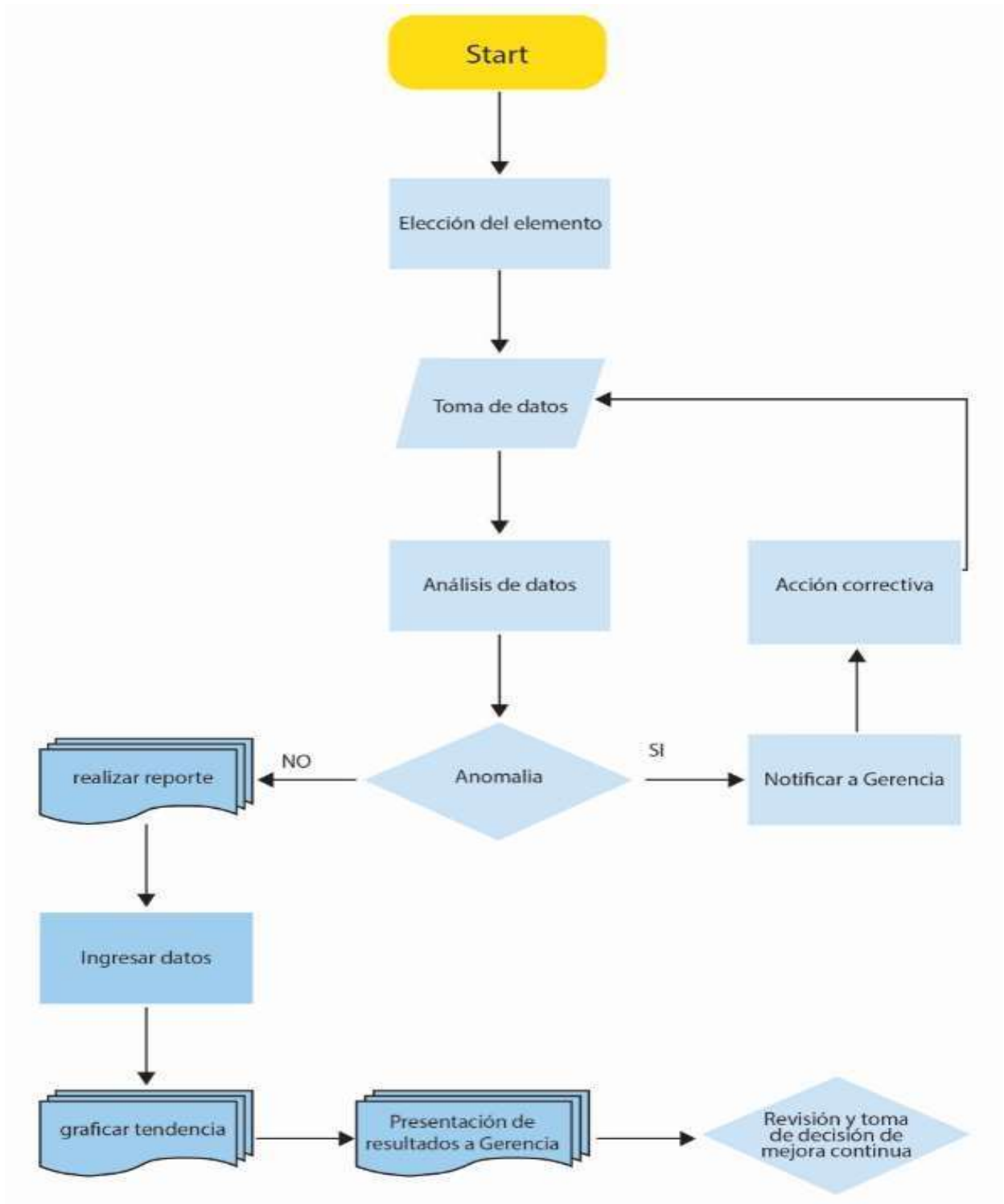
Este modelo de mantenimiento propuesto se basa en la Norma ISO 17359:2011 y consta de once pasos, inicia en la elección del elemento y finaliza en la revisión y toma de decisión de mejora continua.

Todos los datos tomados ingresarlos a la base de datos que existe en el software de mantenimiento de Fogel de Centroamérica, S.A., para graficar su tendencia, así continuar con el proceso de mantenimiento predictivo.

Instruir y capacitar al personal delegado para realizar el mantenimiento predictivo en cada proceso, para evitar errores en el análisis.

La rutina de mantenimiento se genera desde el software de mantenimiento con una frecuencia de una vez por mes, podrá ser analizada y mejorada si es necesario, durante la investigación no se presentó ninguna falla después de las correcciones, por lo que la frecuencia podría ampliarse hasta aparecer una falla y tomar ese tiempo como el mínimo para realizar la inspección de mantenimiento predictivo.

Figura 22. Diagrama de flujo de mantenimiento predictivo propuesto



Fuente: elaboración propia.



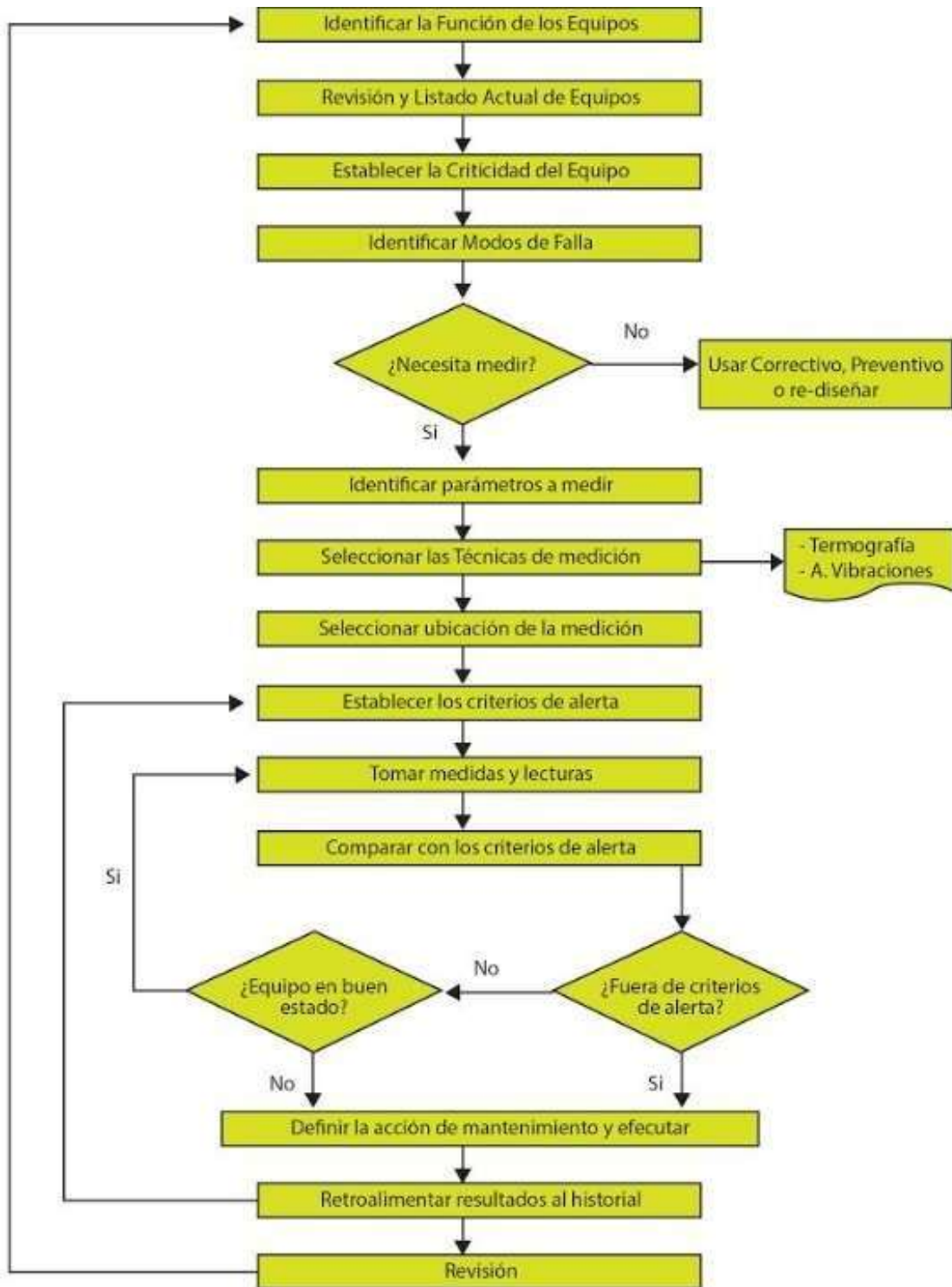
### **3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

El objetivo de estudio del presente trabajo con técnicas de mantenimiento predictivo basadas en monitoreo con las técnicas de termografía y ultrasonido en la máquina termoformadora de polietileno y ABS, con lo cual se pretende pasar al siguiente nivel de preventivo a predictivo y mejorar la disponibilidad de la máquina.

#### **3.1. Fases de la investigación**

En Fogel de Centroamérica se cuenta con un software y sistema de órdenes de trabajo, donde queda registrado las diferentes fallas y tipos de mantenimiento en máquina termoformadora, la cual proporciona un historial de fallas; la Norma ISO 17359 brinda un modelo típico de implementación para un programa de un monitoreo de condición donde se utiliza la técnica de termografía y ultrasonido, las cuales se utilizaron en el desarrollo de la investigación.

Figura 23. Diagrama de flujo de monitoreo de condición



Fuente: Norma ISO 17359 (2003). Diagrama de flujo de monitoreo de condición.



### **3.1.1. Fase 1. Revisión y diagnóstico**

Revisión documental y diagnóstica del equipo, según los archivos del departamento de mantenimiento; y del resultado de ese análisis se fundamenta la aplicación de las técnicas de termografía y ultrasonido, adecuadas para realizar el monitoreo y minimizar y controlar las fallas en el proceso.

La Norma ISO 17359 da una guía para decidir qué tipo de parámetros y monitoreo de condición se puede elegir, según el tipo de máquina, como se puede observar en la figura 16.

**Figura 24. Selección de parámetros de monitoreo de condición**

| Parámetros            | Tipo de máquina |                  |                   |                    |       |           |                     |            |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|-------|-----------|---------------------|------------|
|                       | Motor eléctrico | Turbina de vapor | Turbina de viento | Turbina industrial | Bomba | Compresor | Generador eléctrico | Ventilador |
| Temperatura           | •               | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   | •          |
| Presión               |                 | •                | •                 | •                  | •     | •         |                     | •          |
| Relación de presión   |                 |                  | •                 | •                  |       | •         |                     |            |
| Caudal de aire        |                 |                  | •                 | •                  |       | •         |                     | •          |
| Caudal de líquidos    |                 | •                |                   |                    | •     | •         |                     |            |
| Corriente             | •               |                  |                   |                    | •     | •         | •                   | •          |
| Voltaje               | •               |                  |                   |                    |       | •         | •                   | •          |
| Resistencia           | •               |                  |                   |                    |       |           | •                   |            |
| Potencia de entrada   | •               | •                | •                 | •                  |       |           | •                   |            |
| Potencia de salida    | •               | •                | •                 | •                  |       |           | •                   |            |
| Ruido                 | •               | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   | •          |
| Vibración             | •               | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   | •          |
| Presión de aceite     |                 | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   |            |
| Consumo de aceite     |                 | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   |            |
| Degradación de aceite |                 | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   |            |
| Torque                | •               | •                |                   | •                  |       | •         | •                   |            |
| Velocidad             | •               | •                | •                 | •                  | •     | •         | •                   | •          |
| Eficiencia (derivada) |                 | •                | •                 | •                  | •     | •         |                     | •          |

Fuente: Norma ISO 17359 (2003). *Selección de parámetros de monitoreo de condición.*

### **3.1.1.1. Instrumentos y equipos de recopilación de la Información**

- Equipo de termografía

Se utilizó el instrumento marca flir i3, es una cámara liviana pero potente para producir imágenes IR, diseñada para aplicaciones de mantenimiento predictivo tanto para el área mecánica como la eléctrica.

La imagen IR se procesó en el software flir tools que es un software exclusivo de la marca.

Figura 25. Cámara termográfica Flir i3



FLIR i3,  
FLIR i5 y FLIR i7

## Cámaras Infrarrojas Compactas

¡Fáciles de usar y pesan sólo 340 gramos!

- Tamaño compacto, ligeras: 340 gramos
- Sensibilidad térmica\* de <math><0.1^{\circ}\text{C}</math> @ <math>25^{\circ}\text{C}</math>
- Lente con enfoque automático
- Almacenan hasta 5000 imágenes JPG

- Pantalla LCD a color de 7.1 cm
- Batería de larga duración de >5 horas
- Útil galería de imágenes en miniatura



Tamaño de bolsillo



Amplia pantalla de 7.1 cm



Detecta problemas ocultos con rapidez



Incluye software para PC



### Características de las Cámaras FLIR i3, i5 e i7

- **Resolución de las imágenes infrarrojas**  
3.600 píxeles - 60x60 (FLIR i3)  
6.4000 píxeles - 80x80 (FLIR i5)  
14.400 píxeles - 120x120 (FLIR i7)
- **Alta precisión**  
De 2% de lectura y sensibilidad térmica de 0.1°C le ayudarán a identificar los problemas más fácil y más rápidamente. \* Sensibilidad térmica de 0.15 °C para el modelo FLIR i3
- **Fácil de usar**  
Sus diseños automatizados y de bolsillo las hacen muy amigables, incluso para los usuarios no profesionales. Son perfectas para usos generales
- **Lentes con enfoque automático**  
Dan excelente visión.
- **LCD de alta resolución**  
A color de 7.1 cm (2.8")
- **Diseño reforzado**  
Diseño resistente, con mango fácil de sostener. Cumplen con la Norma IP43 a prueba de agua y polvo
- **Modos de medición**  
Para los modelos FLIR i3 y FLIR i5 solo Punto Central y para la FLIR i7 medición por Área (min/máx con detección automática de punto frío y caliente) e Isoterma (arriba/abajo).
- **Batería de larga duración**  
Operación de >5 horas continuas en una sola carga para realizar inspecciones ininterrumpidas.
- **Ultraligera (340 gramos)**  
Reduce la fatiga del usuario.
- **Amplia memoria de almacenaje**  
Su tarjeta MicroSD almacena hasta 5000 imágenes radiométricas en formato JPEG, las cuales podrán analizarse con el software QuickReport™ para PC incluido.
- **Incluye**  
Tarjeta MicroSD de 512 MB, adaptador MiniSD™, batería de ión de litio recargable con adaptador/cargador de CA de 100-240V y conectores para Reino Unido, Oceanía, América, software QuickReport™ con cable mini-B USB, obturador manual de lentes incorporado, correa y maletín resistente.



Fuente: Flir (2019). Cámara termográfica. Recuperado de <https://www.flir.com>.

### 3.1.1.2. Equipo de ultrasonido

Ultraprobe 100 es un instrumento muy práctico para detectar cualquier fuga de aire comprimido y gases e inspeccionar en válvulas de vapor, algunas fallas mecánicas, se pueden ajustar en 8 posiciones de sensibilidad con indicador de decibeles.

Figura 26. Equipo de ultrasonido

## ULTRAPROBE® 100

Equipo eficiente para la detección de fugas y análisis de válvulas, diseñado para ahorrar energía, tiempo y dinero

El Ultraprobe® 100 es una herramienta práctica para detectar cualquier fuga de gases y aire comprimido, inspeccionar trampas de vapor e identificación de fallas mecánicas. Fácil de usar, encuentra fácilmente fugas de aire comprimido y vapor, además previene fallas mecánicas con este equipo único.

**¿Por qué la tecnología de Ultrasonido es el enfoque inteligente hacia estas inspecciones?**

- Los ultrasonidos son direccionales y localizables.
- Ultrasonidos competidores pueden ser bloqueado o eliminados.
- Los ultrasonidos pueden ser utilizados en ambientes ruidosos.
- Los cambios en el nivel de Ultrasonido proveen una advertencia temprana de problemas potenciales.
- Los equipos de Ultrasonido son fáciles de usar.

El Ultraprobe® 100 puede ajustarse en 8 posiciones de sensibilidad con indicador de decibelios. Además cuenta con una barra de LED en la que cada uno corresponde a 3 dB, ideal para calcular los decibelios detectados.





**UP 100KT  
Ultraprobe® 100 Kit**

- Pistola de Ultrasonido UP 100 con medidor de barra tipo LED.
- 8 posiciones de sensibilidad.
- Módulo de Escaneo.
- Concentrador de Caucho.
- Generador de Tonos (WTG-1) con cargador de batería.
- Auriculares.
- Batería alcalina de 9V (reemplazable)
- Estuche blando de nylon
- Manual de Usuario
- Módulo de Contacto o Estetoscopio



So advanced, it's simple

Fuente: elaboración propia.

Medición de temperatura en borners de resistores, se muestra imagen obtenida en figura 27.

Figura 27. **Medición mediante la técnica de termografía**



Fuente: elaboración propia.

Detección de fugas de aire en actuadores de mesa 1, aplicando la técnica de ultrasonido, se muestra imagen en la figura 28.

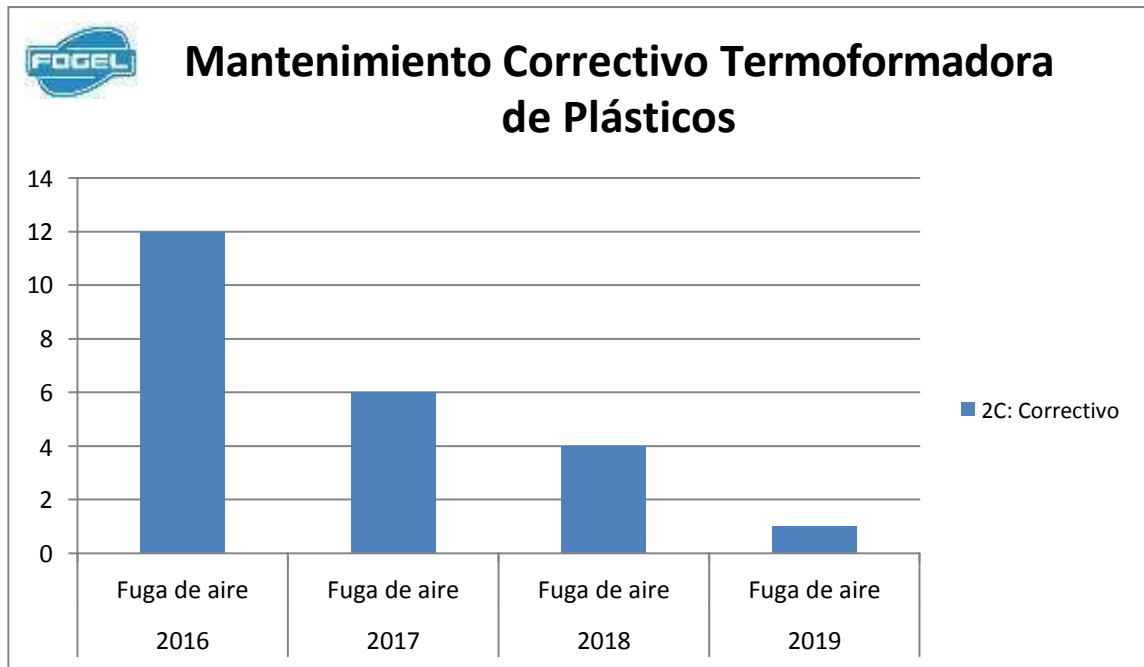
Figura 28. **Medición mediante la técnica de ultrasonido**



Fuente: elaboración propia.

Para el objetivo se presentan los siguientes resultados.

Figura 29. **Historial de fallas**



Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Fase 2. Sistemas y elementos críticos monitoreados

Los elementos se clasificaron de acuerdo a su criticidad, haciendo un análisis para medir el impacto sobre la máquina y el proceso, a continuación se muestra el resultado obtenido.

Figura 30. Análisis de modo y efecto de falla

| Equipo componente              | Modos de Falla Potenciales    | Efectos de Fallas Potenciales | S E V | Causas Potenciales                   | O C U | Controles de Ocurrencia | D E T | N P R | Acciones Recomendadas    |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|-------------------------|-------|-------|--------------------------|
| Panel Eléctrico                | Falta de suministro eléctrico | Breaker Principal dañado      | 6     | Calentamiento                        | 3     | Análisis de termografía | 5     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Falta de suministro eléctrico | Contactador Zona 1            | 6     | Calentamiento                        | 3     | Análisis de termografía | 5     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Falta de suministro eléctrico | Contactador Zona 2            | 6     | Calentamiento                        | 3     | Análisis de termografía | 5     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Falta de suministro eléctrico | Contactador Zona 3            | 6     | Calentamiento                        | 3     | Análisis de termografía | 5     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Calentamiento de conexiones   | Cable de conductor dañado     | 6     | Conexiones flojas                    | 3     | Análisis de termografía | 5     | 90    | Mantenimiento predictivo |
| Motor eléctrico 1              | Motor sobrecalentado          | Fallo en alimentación         | 6     | Conexiones flojas                    | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                |                               | Fallo en embobinado           | 6     | Trabajo en dos fases                 | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Rodamiento dañado             | Ruido                         | 5     | Contaminación y falta de lubricación | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 125   | Mantenimiento predictivo |
|                                |                               | Calentamiento                 | 5     | Contaminación y falta de lubricación | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 125   | Mantenimiento predictivo |
| Motor eléctrico 2              | Motor sobrecalentado          | Fallo en alimentación         | 6     | Conexiones flojas                    | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                |                               | Fallo en embobinado           | 6     | Trabajo en dos fases                 | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Rodamiento dañado             | Ruido                         | 5     | Contaminación y falta de lubricación | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 125   | Mantenimiento predictivo |
|                                |                               | Calentamiento                 | 5     | Contaminación y falta de lubricación | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 125   | Mantenimiento predictivo |
| Conexiones a resistores        | Calentamiento                 | Cable de conductor dañado     | 6     | Conexiones flojas                    | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
|                                | Falta de Potencia             | Terminal dañada               | 6     | Conexiones flojas                    | 5     | Análisis de termografía | 3     | 90    | Mantenimiento predictivo |
| Actuadores neumáticos de mesas | Fugas en empaques             | Absorción de calor            | 7     | Empaques dañados                     | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 175   | Mantenimiento predictivo |
|                                | Fugas en conexiones           | Pérdida de potencia           | 7     | Conexiones flojas                    | 5     | Análisis de ultrasonido | 5     | 175   | Mantenimiento predictivo |
| Bombas de Vacío                | Pérdida de vacío              | Pérdida de producción         | 7     | Conexiones flojas                    | 7     | Análisis de ultrasonido | 7     | 343   | Mantenimiento predictivo |
|                                |                               |                               | 9     | Piezas rotas                         | 1     | Análisis de ultrasonido | 7     | 63    | Mantenimiento predictivo |

Fuente: elaboración propia.



Tabla III. **Listado de elementos a monitorear en termoformadora**

| Listado de elementos |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Cantidad             | Descripción                  |
| 2                    | Bomba de vacío               |
| 12                   | Actuadores neumáticos mesa 1 |
| 12                   | Actuadores neumáticos mesa 2 |
| 1                    | Tubería de vacío             |
| 2                    | Acumuladores de vacío        |
| 1                    | Panel eléctrico              |
| 3                    | Contactores                  |
| 36                   | Borners de resistores        |

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Selección de técnicas de mantenimiento predictivo**

|             | Bomba de vacío | Actuadores neumáticos mesa 1 | Actuadores neumáticos mesa 2 | Tubería de vacío | Acumuladores de vacío | Panel eléctrico | Contactores | Borners de resistores |
|-------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| Termografía | ■              |                              |                              |                  |                       | ■               | ■           | ■                     |
| Ultrasonido | ■              | ■                            | ■                            | ■                | ■                     |                 |             |                       |

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Valores medidos de temperatura y evaluados con Norma ANSI/NETA

| Máquina Termoformadora   |                         |                                |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
|--|-------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|--|---|--|--|--|-------------------------------|--|--------------------------------|--|----------------------------|---------------|-----------|--|----------------------------|----------------|-------|--|--------------------------------|----------------------|-----------|--|---------------------------|-------------|-----------------|--|-----------------------|-------------------|-----------------|--|
| Realizado por  |                         | Werner Chet                    |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| Área   |                         | Termoformado                   |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| Equipo utilizado   |                         | Cámara Termográfica            |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA.</th> </tr> <tr> <th colspan="2">O/S: Temperatura Over Similar</th> <th colspan="2">O/A: Temperatura Over/ambiente</th> </tr> <tr> <th>DIFERENCIAL DE TEMPERATURA</th> <th>CLASIFICACIÓN</th> <th colspan="2">CONDICIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1°C – 10°C O/A ó &lt; 3°C O/S</td> <td>En buen estado</td> <td colspan="2">BUENO</td> </tr> <tr> <td>11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S</td> <td>Probable deficiencia</td> <td colspan="2">ACEPTABLE</td> </tr> <tr> <td>21°C–40°C O/A y &gt;15°C O/S</td> <td>Deficiencia</td> <td colspan="2">INSATISFACTORIA</td> </tr> <tr> <td>&gt;40°C O/A y &gt;15°C O/S</td> <td>Deficiencia mayor</td> <td colspan="2">INSATISFACTORIA</td> </tr> </tbody> </table> |                         |                                |                |                               |                      |                            |  | Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA. |  |  |  | O/S: Temperatura Over Similar |  | O/A: Temperatura Over/ambiente |  | DIFERENCIAL DE TEMPERATURA | CLASIFICACIÓN | CONDICIÓN |  | 1°C – 10°C O/A ó < 3°C O/S | En buen estado | BUENO |  | 11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S | Probable deficiencia | ACEPTABLE |  | 21°C–40°C O/A y >15°C O/S | Deficiencia | INSATISFACTORIA |  | >40°C O/A y >15°C O/S | Deficiencia mayor | INSATISFACTORIA |  |
| Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA.  |                         |                                |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| O/S: Temperatura Over Similar  |                         | O/A: Temperatura Over/ambiente |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| DIFERENCIAL DE TEMPERATURA   | CLASIFICACIÓN           | CONDICIÓN                      |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 1°C – 10°C O/A ó < 3°C O/S   | En buen estado          | BUENO                          |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S   | Probable deficiencia    | ACEPTABLE                      |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21°C–40°C O/A y >15°C O/S  | Deficiencia             | INSATISFACTORIA                |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| >40°C O/A y >15°C O/S  | Deficiencia mayor       | INSATISFACTORIA                |                |                               |                      |                            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| Fecha de Análisis  | Temperatura Ambiente °C | No. Borner                     | Temperatura °C | Diferencial de Temperatura °C | Clasificación        | Condición segura ANSI/NETA |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 1                              | 148.9          | 8.9                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 2                              | 147.3          | 7.3                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 3                              | 153.8          | 13.8                          | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 4                              | 153            | 13                            | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 5                              | 148            | 8                             | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 6                              | 156.4          | 16.4                          | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 7                              | 148            | 8                             | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 8                              | 145.5          | 5.5                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 9                              | 140.4          | 0.4                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 10                             | 151.3          | 11.3                          | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 11                             | 153.4          | 13.4                          | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 12                             | 145.1          | 5.1                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 13                             | 143.1          | 3.1                           | En buen estado       | BUENO                      |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 14                             | 151.3          | 11.3                          | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 15                             | 141.8          | 1.8                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 16                             | 149.6          | 9.6                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 17                             | 146.2          | 6.2                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 18                             | 148.3          | 8.3                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 19                             | 160.2          | 20.2                          | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 20                             | 149.1          | 9.1                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 21                             | 140.5          | 0.5                           | En buen estado       | BUENO                      |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 22                             | 147            | 7                             | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 23                             | 158.7          | 18.7                          | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 24                             | 155            | 15                            | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 25                             | 153.2          | 13.2                          | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 26                             | 148            | 8                             | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 27                             | 140.7          | 0.7                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 28                             | 145            | 5                             | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 29                             | 165.2          | 25.2                          | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 30                             | 158.5          | 18.5                          | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 31                             | 140            | 0                             | En buen estado       | BUENO                      |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 32                             | 143.2          | 3.2                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 33                             | 143            | 3                             | En buen estado       | BUENO                      |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 34                             | 149.9          | 9.9                           | Probable deficiencia | ACEPTABLE                  |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 35                             | 157            | 17                            | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |
| 21/11/2018   | 139                     | 36                             | 160            | 20                            | Deficiencia          | INSATISFACTORIA            |  |   |  |  |  |                               |  |                                |  |                            |               |           |  |                            |                |       |  |                                |                      |           |  |                           |             |                 |  |                       |                   |                 |  |

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2.1. Identificación de modos de falla

La Norma ISO 17359 recomienda identificar los modos de falla, análisis y efectos de falla, se aplicó el método AMEF para identificar las fallas potenciales en los neumáticos de la máquina termoformadora aplicando la técnica de ultrasonido.

Figura 33. Tabla de severidad

| Efecto               | Efecto de Severidad   | Valor |
|----------------------|---|-------|
| Peligroso sin alerta | Valor de severidad muy alto cuando un modo de Problema potencial afecta la operación del sistema sin alerta | 10    |
| Peligroso con alerta | Valor de severidad muy alto cuando un modo de Problema potencial afecta la operación del sistema con alerta | 9     |
| Muy alto             | Identificar modos de Problema potenciales y su impacto en la confiabilidad del proceso o actividad          | 8     |
| Alto                 | Sistema inoperable con equipo dañado  | 7     |
| Moderado             | Sistema inoperable con daños menores  | 6     |
| Bajo                 | Sistema inoperable sin daños  | 5     |
| Muy bajo             | Sistema operable con una significativa degradación de rendimiento   | 4     |
| Menor                | Sistema operable con una degradación de rendimiento   | 3     |
| Muy menor            | Sistema operable con mínima interferencia   | 2     |
| Ninguno              | No hay efectos  | 1     |

Fuente: Hernández (2005). *Tabla de severidad.*

Figura 34. Imágenes de ultrasonido propagado por aire



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Tabla de resultados de fugas por ultrasonido**

| Fecha de Análisis | No. De actuador | Fuga Si/No | Severidad | Sonido dB |
|-------------------|-----------------|------------|-----------|-----------|
| 22/11/2018        | 1               | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 2               | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 3               | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 4               | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 5               | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 6               | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 7               | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 8               | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 9               | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 10              | Si         | 5         | 58        |
| 22/11/2018        | 11              | Si         | 6         | 59        |
| 22/11/2018        | 12              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 13              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 14              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 15              | Si         | 6         | 59        |
| 22/11/2018        | 16              | Si         | 6         | 59        |
| 22/11/2018        | 17              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 18              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 19              | No         | 1         | 51        |
| 22/11/2018        | 20              | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 21              | Si         | 3         | 56        |
| 22/11/2018        | 22              | Si         | 4         | 57        |
| 22/11/2018        | 23              | Si         | 6         | 59        |
| 22/11/2018        | 24              | Si         | 4         | 57        |

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3. Fase 3. Correcciones en las fallas detectadas

De acuerdo a los resultados obtenidos en la fase 2, se corrigieron las fallas que estaban fuera de los parámetros de aceptación, bajo la Norma ANSI/NETA, para los parámetros de temperatura, en la siguiente figura se muestra cambio de terminal de níquel en bornier de resistor.

Figura 36. Cambio de terminal con técnico de mantenimiento



Fuente: elaboración propia.

**Figura 37. Actuadores nuevos para sustituir dañados y realizar correcciones**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 38. Cambio de kit de empaques para actuador No. 11**



Fuente: elaboración propia.

Para el objetivo 2, se presentan los siguientes resultados.

#### **3.1.4. Fase 4. Propuesta de inspección en orden de trabajo**

En coordinación con el departamento de mantenimiento posterior a realizar las correcciones se determinó, incluir en las órdenes de trabajo que son generadas por medio de un software, una frecuencia mensual de inspección, a continuación se muestra la misma.







## **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1. Análisis interno**

De acuerdo a los alcances de la presente investigación se puede identificar que fue posible llevar a cabo las técnicas de termografía y ultrasonido con un impacto positivo sobre la máquina en cuanto a la disponibilidad debido a la ejecución del análisis sin afectar la producción y se logró realizar las mejoras correspondientes de una manera planificada.

En el horno de calentamiento de la termoformadora se determinó que la medición de la temperatura resulto efectiva realizándola en los nodos.

En los elementos eléctricos es importante mantener los valores dentro los intervalos sugeridos, por que son los que más impactan al momento de una falla consecuencia de la temperatura elevada en el área.

Existen algunos elementos que su bajo costo podría interpretarse como una limitante para la implementación del mantenimiento predictivo, pero estratégicamente el costo beneficio podría inclinar la balanza hacia un impacto positivo teniendo claro que la falta de disponibilidad de la máquina tiene un impacto alto en la producción.

## **4.2. Análisis externo**

Según nuestro análisis externo comparando la técnica de mantenimiento preventivo oficialmente es donde se encuentra la estrategia de mantenimiento de Fogel de Centroamérica, S.A., se puede identificar que el método de mantenimiento predictivo resultó efectivo para detectar fallas basadas en las técnicas de medición y monitoreo de los estados de los sistemas de la máquina termoformadora, según se demuestra en los resultados obtenidos.

De acuerdo a la experiencia de expertos en termografía en equipos similares cinco meses es poco tiempo para determinar todos los parámetros necesarios de la gráfica de tendencias, por lo que el resultado de esta investigación puede no ser definitivo.

## **4.3. Discusión de resultados de termografía**

De los resultados obtenidos en las imágenes termográficas, se realizó un análisis estadístico en donde se encontraron algunos valores con deficiencia, según el criterio de la Norma ANSI/NETA, que fue la utilizada para evaluar el estado de los elementos.

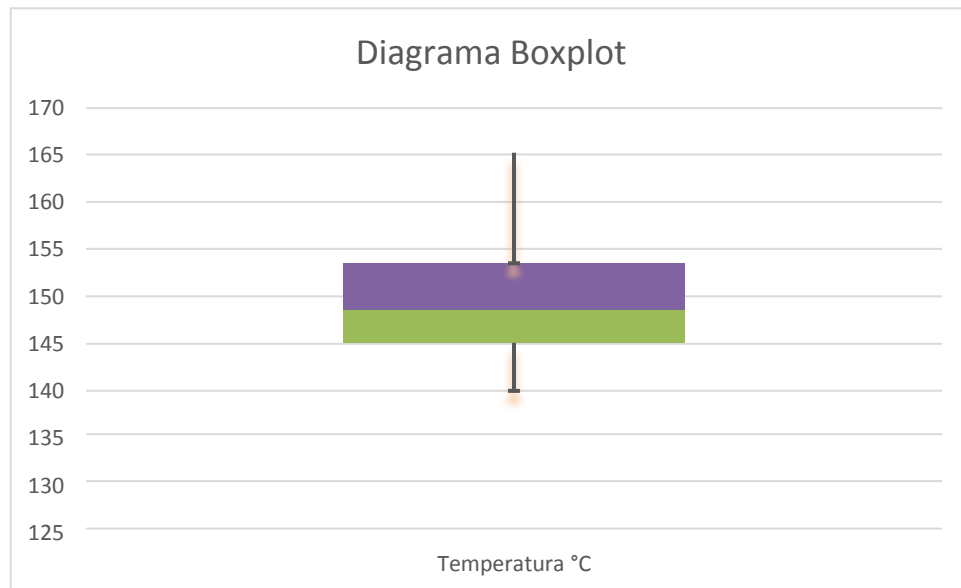
Con estas mediciones se procedió a corregir los elementos que se encontraron fuera de aceptación, posteriormente se tomaron imágenes termográficas, con el objetivo de verificar los cambios, el análisis se detalla a continuación:

Tabla IV **Disposición de datos para análisis de Boxplot**

|                  | Valores | Ancho |
|------------------|---------|-------|
| Mínimo           | 140     | 140   |
| Q1               | 145.07  | 5.07  |
| Mediana          | 148.6   | 3.52  |
| Q3               | 153.5   | 4.9   |
| Máximo           | 165.2   | 11.7  |
| Datos atípicos 1 | 0       | 0     |
| Datos atípicos 2 | 0       | 0     |

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Condición termográfica de los borners después de las correcciones**



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anterior de boxplot se puede observar los valores de temperatura de acuerdo a los criterios de severidad que son aceptables, este criterio dependerá de la persona o el termógrafo que revisa la información, en este caso se utilizó la diferencia de temperatura respecto a un equipo similar como lo establece la Norma ANSI/NETA.

El comité técnico ISO de termografía da un criterio basado en la experiencia mecánica y eléctrica del profesional y establece que la información se puede presentar en diferenciales o valores absolutos de temperatura (ISO TC 108 SC 5, 1993).

Al analizar la temperatura encontrada en las termografías tomadas antes y después de las correcciones podemos concluir que la técnica de mantenimiento predictivo termográfica fue muy útil y eficiente para encontrar posibles fallas y corregirlas a tiempo sin tener que afectar la producción, por lo tanto, el trabajo efectuado tuvo éxito.

#### **4.4. Discusión de resultados de análisis por ultrasonido**

Los resultados obtenidos al aplicar la técnica de ultrasonido son satisfactorios, debido a que se encontraron varios hallazgos con fugas significativas que sin la herramienta adecuada no se pudieran haber detectado.

Se tuvo como resultado la planificación de mantenimiento correctivo programado para solucionar los hallazgos encontrados, para esto fue necesario cambiar empaques a actuadores y los que presentaban un daño mayor como rayones se procedió a cambiarlos por nuevos.

Figura 41. **Mantenimiento correctivo a actuadores**



Actuadores nuevos

Cambio de empaques a  
actuador

Fuente: elaboración propia.

#### **4.5. Frecuencia óptima de rutinas de mantenimiento predictivo**

De acuerdo a los resultados que se obtuvo en el análisis de termografía y ultrasonido, se puede construir las frecuencias óptimas de mantenimiento predictivo basándonos en el monitoreo mensual que se estableció en la orden de trabajo, en la cual la frecuencia puede ajustarse de acuerdo a la tendencia que vaya tomando la condición y acercándose al valor límite superior permisible para cada elemento.





## CONCLUSIONES

1. Se diseñó el plan de mantenimiento predictivo con las técnicas de ultrasonido y termografía para la máquina termoformadora que trabaja las piezas de polietileno y ABS en Fogel de Centroamérica, S.A.
2. Se determinó el estado de los componentes de la máquina, encontrándose 32 hallazgos con la técnica de termografía y 13 con la técnica de ultrasonido propagado por aire.
3. Se determinó la frecuencia con la que se realizó el monitoreo será mensual pudiéndose modificar de acuerdo a los resultados obtenidos y analizados, según el avance del mantenimiento predictivo, la técnica de termografía debe de realizarse con la máquina a plena carga y aplicar los criterios de norma ANSI/NETA, mientras que la de ultrasonido se hará con el horno de calentamiento apagado.
4. Se analizó que las ventajas del mantenimiento predictivo resultaron de gran beneficio para el estado de la termoformadora y la disponibilidad de la misma, de acuerdo a la corrección que se realizó de los hallazgos encontrados sin afectar la producción.



## RECOMENDACIONES

1. Continuar con las rutinas establecidas para analizar las tendencias y observar con mayor precisión los valores obtenidos, para tomar las mejores decisiones.
2. Capacitar al personal de mantenimiento en las técnicas de termografía y ultrasonido e invertir en las herramientas necesarias, para realizar el mantenimiento predictivo con tecnología de punta y conocimiento.
3. Analizar las tendencias y evaluar la frecuencia con que se ejecuta la toma de termografía y ultrasonido, según la necesidad de cada elemento y si fuera necesario incluir más sistemas o elementos de la máquina.
4. Mantener actualizado el plan de mantenimiento predictivo de la máquina termoformadora que trabaja al vacío para piezas de polietileno y ABS de acuerdo a las nuevas tendencias que protejan los activos de la industria.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abarca, D. y Iglesias, F. (2012). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo mediante la aplicación de termografía industrial en los motores eléctricos de la Planta Eurolit en la empresa Tubasec, C.A.*. Tesis de grado Ingeniero de Mantenimiento. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
2. Academia Testo (2018). *Historia Cámara Termográfica*, Argentina. Recuperado de <https://www.academiatesto.com.arg>
3. Altmann, C.(2007). *Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento proactivo*. Buenos Aires, Argentina: Adine.
4. ASTM American Society Testing Materials (2016). *Estándar E1616 Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. Estados Unidos: Journal of Testing.
5. Botero E. (2007). *Mantenimiento preventivo*. Universidad Industrial de Santander-UIS. Tesis Postgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena, Colombia.
6. Boylestad, R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. México: Pearson Educación.

7. Carrobles M. & Rodríguez F. (2000). *Manual de Mecánica Industrial*, España: Editorial Cultural, S.A..
8. Cengel Y. A & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: Fundamentos. McGraw Hill.
9. D. H. Morton-Jones (1989), *Polymer Processing*. Inglaterra: London Chapman & Hall.
10. Espinoza E. (2016). *Termoformado de geometrías complejas*. Tesis de Máster de ingeniería de los materiales y fabricación. Universidad pública de navarra. España.
11. Eugene A. (1992). *Marks manual del ingeniero mecánico*. Volumen I, 2da. edición en español, México: McGraw Hill.
12. FLIR (2018), Recuperado de [www.flir.com](http://www.flir.com).
13. García S. (2009-2012). *Ingeniería del Mantenimiento*. España: Editorial Renovetec.
14. Girdhar, P. & Octo M. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier. Oxford.
15. Gruenwald G, Thermoforming, (1998). *A Plastic Processing Guide*.
16. ISO TC 108 SC 5. (1993). *Conditioning monitoring and diagnostics of Machine System*. ISO Editorial Progremme.

17. Megyesy, E. (1992). *Manual de Recipientes a Presión*. México: Limusa.
18. Molina, V. (2008). *Diseño de una Termoformadora de Envases Plásticos*. Tesis de Maestría Escuela de Politécnica Nacional, Quito Ecuador.
19. Pérez, V. & Chavarro, B. (2012). *Diseño y construcción de una máquina de termoformado*. Tesis de Pregrado de Ingeniería Industrial. Universidad Estatal de Milagro, Ecuador.
20. Picazo, M. (2016). *Diagnóstico de Máquinas Eléctricas mediante Técnicas de Termografía Infrarroja*. Universidad Politécnica de Valencia España.
21. Rimoldi, C & Mundo L. (2012). *Ensayo no destructivo por método de ultrasonido*. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Aeronáutica. Sevilla España.
22. Roselo L. (2013). *Sistema de Control de peso para llenado de sacos de harina de 50Kg*. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Norte, Ecuador.
23. Rocatek, S.A. (2017). *Automatización Industrial*. Recuperado de [www.rocatek.com/forum:lazos\\_control.php](http://www.rocatek.com/forum:lazos_control.php).
24. UE Training Systems, (1997). *Airborne ultrasound Level I Elmsford*, Systems, Inc.. Estados Unidos.
25. Villa, L. (2011). *Mantenimiento predictivo aplicado a máquinas sometidas a velocidad y carga variables mediante análisis de órdenes*. Tesis

Doctoral Doctorado en Ingeniería de Ciencias y Automática.  
Universidad de Valladolid, Valladolid, España.