



**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE BIMETAL  
PARA CALIBRACIÓN DE DISYUNTOR  
EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN  
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. JOSÉ ALFREDO DÍAZ SERNA  
ASESOR: DR. EDUARDO RUBIO CERDA**

AGUASCALIENTES, AGS, ENERO, 2020.

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



23 de septiembre de 2019.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. José Alfredo Díaz Serna, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "Caracterización eléctrica de bimetálico para calibración de disyuntor en línea de producción", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 23 días del mes de septiembre del año 2019.

Dr. Eduardo Rubio Cerda  
Asesor Académico

Ing. Edilberto Fuentes Rodríguez  
Asesor en Planta

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro.

16 de diciembre de 2019

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero  
Directora  
Posgrado CIATEQ  
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del **Ing. José Alfredo Díaz Serna**, del trabajo titulado:

**“Caracterización eléctrica de bimetálico para calibración de disyuntor  
en línea de producción”**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el estudiante antes mencionado, el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de esta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente.

ATENTAMENTE

**Dr. John Dairo Henao Penenrey**  
Catedrático CONACYT

## RESUMEN

El proceso de calibración de disyuntores para aeronaves es una operación que conlleva altos costos de producción debido a su dificultad y al tiempo necesario para lograr una calibración óptima del dispositivo para que éste actúe dentro de la ventana de tiempo definida para proteger el cableado de las aeronaves una vez instalados en campo.

Este trabajo de investigación es motivado por la necesidad de reducir los tiempos de calibración de disyuntores en la línea de producción, mejorar la capacidad de fabricación de estos componentes, y disminuir los costos asociados al número de operadores requeridos para el proceso.

En estos trabajos se realiza un análisis experimental de la deformación del bimetalo de un disyuntor de 35 amperes, a partir del procesamiento de imágenes obtenidas con un microscopio digital, con el fin de caracterizarlo y encontrar la relación entre su posición inicial y su posición final para establecer las bases que permitan desarrollar un método que simplifique el proceso de calibración en la línea de producción.

Para analizar el movimiento del bimetalo, éste se sometió al 200% de su corriente nominal y se analizó su desplazamiento. Una vez conociendo estos datos se procedió a encontrar posiciones del bimetalo que puedan ser utilizadas como referencia para realizar una calibración en "frío" que elimine la necesidad de probar los dispositivos usando corriente eléctrica, disminuyendo el tiempo requerido para lograr esta calibración.

**Palabras clave:** Caracterización, Bimetalo, Disyuntor, Elemento termostático, Calibración.

## **ABSTRACT**

The calibration process of aircraft circuit breakers is a difficult task. This operation involves high production costs and time to achieve an optimal calibration of the device. This process is necessary for the device to work within the predefined time window to protect the aircraft wiring once installed.

This research is motivated by the need of reducing the calibration times of circuit breakers in the production line and hence improving the line capacity while reducing associated costs with the number of operators required to fulfill the process.

An experimental analysis of the bimetal deformation for 35 Amperes circuit breakers was performed. The characterization of the device was made by processing digital images obtained with a digital microscope. These images were analyzed to find the relation between initial and final position of the bimetal to establish the groundwork to develop a method to simplify the calibration process in the production line.

To analyze the bimetal movement a 200% of the nominal current was applied, and the displacement was analyzed. Once this data was obtained, reference positions of the bimetal were used to propose a "cold" calibration that will eliminate the need of using electrical current and reduce the time required to calibrate these devices.

**Keywords:** Characterization, Bimetal, Circuit breaker, Thermostatic element, Calibration.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Carta de liberación del Asesor .....</b>	<b>I</b>
<b>Carta de liberación del Revisor .....</b>	<b>II</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de contenido.....</b>	<b>V</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>XI</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>XII</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Definición del problema .....	2
1.3. Justificación .....	3
1.4. Objetivo general .....	4
1.5. Objetivos específicos .....	4
1.6. Hipótesis .....	4
<b>2 Marco teórico .....</b>	<b>5</b>
2.1. Principio básico de funcionamiento .....	5
2.2. Disyuntores miniatura .....	6
2.3. Disyuntores para aeronaves .....	7
2.4. Características inherentes de los disyuntores para aeronaves .....	8
2.4.1. Baja disipación de potencia .....	8
2.4.2. Curvas tiempo-corriente .....	9
2.4.3. Tolerancia de carga .....	10
2.4.4. Características de apertura .....	11
2.4.5. Operación coordinada de disyuntores .....	12
2.4.6. Capacidad de interrupción .....	12
2.4.7. Memoria térmica .....	13
2.4.8. Memoria de precarga .....	13
2.4.9. Avance por impulsos .....	13
2.4.10. Confiabilidad .....	13

2.4.11. Bajo peso .....	14
2.4.12. Confiabilidad dieléctrica .....	14
2.5. Principio de operación .....	14
2.5.1 Principio de funcionamiento de sensor bimetálico .....	15
2.6. Flexividad y deflexión específica .....	16
2.7. Diseño de metales termostáticos .....	18
2.8. Tipos de bimetales .....	22
2.8.1. Fijo en cantiléver .....	23
2.8.2. Viga simple soportada libremente .....	24
2.8.3. Bimetal en u .....	24
2.8.4. Espiral o hélice .....	25
2.8.5. Bimetal en disco .....	26
2.9. Consideraciones metalúrgicas.....	28
2.10. Manufactura .....	29
2.11. Aplicaciones .....	31
<b>3 Procedimiento de investigación.....</b>	<b>32</b>
3.1. Descripción de la operación de calibración .....	32
3.2. Descripción técnica del disyuntor .....	34
3.3. Descripción operativa del disyuntor .....	37
3.4. Modificación del disyuntor .....	38
3.5. Equipo para suministro de corriente .....	39
3.6. Microscopio digital .....	41
3.7. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad .....	42
3.8. Fixture para prueba .....	42
3.9. Medición de temperatura .....	43
<b>4 Resultados .....</b>	<b>44</b>
4.1. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad .....	44
4.2. Fixture de prueba .....	46
4.3. Prueba eléctrica y medición de desplazamiento de bimetal .....	50
4.4. Medición de posición de connecting plate .....	58
4.5. Ajuste de tornillos de calibración .....	60
4.6. Validación de ajuste de tornillos de calibración .....	64
4.7. Prueba eléctrica .....	65

<b>Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>Aportación de la tesis.....</b>	<b>69</b>
<b>Consideraciones y recomendaciones .....</b>	<b>70</b>
<b>Trabajo a futuro .....</b>	<b>71</b>
<b>Renuncia .....</b>	<b>73</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>74</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Principio de funcionamiento (a) y componentes externos (b) de un disyuntor .....	5
<b>Figura 2.</b> Componentes internos de un disyuntor miniatura.....	7
<b>Figura 3.</b> Diagrama de sistema tradicional de protección de circuitos.....	8
<b>Figura 4.</b> Curva tiempo corriente de disyuntores 2TC y 3TC.....	10
<b>Figura 5.</b> Curva tiempo corriente de arranque de un motor.....	11
<b>Figura 6.</b> Sistema en cascada donde sólo el disyuntor de 2A con falla abrirá el circuito.....	12
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de bimetálico .....	15
<b>Figura 8.</b> Método estándar de la ASTM para determinar flexibilidad y deflexión específica de un metal termostático .....	17
<b>Figura 9.</b> Renderizado de bimetálico en cantiléver .....	23
<b>Figura 10.</b> Renderizado de bimetálico de viga simple .....	24
<b>Figura 11.</b> Renderizado de bimetálico en U .....	25
<b>Figura 12.</b> Renderizado de bimetálico espiral .....	26
<b>Figura 13.</b> Renderizado de bimetálico en forma de disco .....	27
<b>Figura 14.</b> Ilustración del principio del laminado en frío .....	30
<b>Figura 15.</b> Representación de disyuntor 3TC7 de Sensata Technologies con los componentes involucrados en la calibración de éste .....	32
<b>Figura 16.</b> Disyuntor colocado en dispositivo de prueba antes de activar bimanuales .....	33
<b>Figura 17.</b> Operador apretando tornillos de calibración para calibrar disyuntor .....	33
<b>Figura 18.</b> Cabina enfriadora de disyuntores .....	34
<b>Figura 19.</b> Dispositivo 3TC7 .....	34
<b>Figura 20.</b> Curva tiempo-corriente aproximada de un disyuntor 3TC7 .....	35
<b>Figura 21.</b> Bimetálico de dispositivo 3TC7 .....	35
<b>Figura 22.</b> Compensador de dispositivo 3TC7 .....	37
<b>Figura 23.</b> Disyuntor cerrado (a) y abierto por acción del paso de corriente eléctrica (b) .....	38
<b>Figura 24.</b> Dimensiones de corte realizado en cubierta superior de disyuntor .....	39
<b>Figura 25.</b> Banco de trabajo para suministro de corriente.....	40

<b>Figura 26.</b> Viñeta de calibración de fuente .....	40
<b>Figura 27.</b> Fuente Agilent 6690A para suministro de corriente .....	40
<b>Figura 28.</b> Pantalla de equipo de prueba .....	41
<b>Figura 29.</b> Microscopio digital U500x .....	41
<b>Figura 30.</b> Componente siendo fotografiado por microscopio digital .....	42
<b>Figura 31.</b> Modelo 3D de fixture para prueba eléctrica de dispositivo 3TC7 .....	43
<b>Figura 32.</b> Termómetro infrarrojo Amprobe IR-730.....	43
<b>Figura 33.</b> Componente y dimensión evaluados para estudio GR&R .....	44
<b>Figura 34.</b> Ejemplo de dimensionado realizado en software del componente a evaluar .....	44
<b>Figura 35.</b> Gráfica de reproducibilidad entre operadores .....	46
<b>Figura 36.</b> Placa principal de aluminio 6061 .....	47
<b>Figura 37.</b> Soporte de microscopio digital de aluminio 6061 .....	47
<b>Figura 38.</b> Soporte ajustable de aluminio 6061 .....	48
<b>Figura 39.</b> Soporte de nylamid para clamp .....	48
<b>Figura 40.</b> Nido de nylamid para disyuntor .....	49
<b>Figura 41.</b> Fixture de prueba ensamblado .....	49
<b>Figura 42.</b> Disyuntores modificados e identificados .....	50
<b>Figura 43.</b> Disyuntor modificado .....	50
<b>Figura 44.</b> Disyuntor conectado a fuente eléctrica .....	51
<b>Figura 45.</b> Bimetal de disyuntor bajo microscopio digital mientras se le suministra corriente eléctrica .....	51
<b>Figura 46.</b> Diagrama de flujo del experimento .....	52
<b>Figura 47.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 1 .....	52
<b>Figura 48.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 2 .....	53
<b>Figura 49.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 3 .....	53
<b>Figura 50.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 4 .....	53
<b>Figura 51.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 5 .....	54
<b>Figura 52.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 6 .....	54
<b>Figura 53.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 7 .....	54
<b>Figura 54.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 8 .....	55
<b>Figura 55.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 9 .....	55
<b>Figura 56.</b> Mediciones de bimetálico de disyuntor 10 .....	55

<b>Figura 57.</b> Desplazamiento de bimetales a los 39.5 s .....	57
<b>Figura 58.</b> Cabezal de medición Keyence IM6225 .....	59
<b>Figura 59.</b> Dispositivos medidos en cabezal de medición Keyence IM6225 .....	60
<b>Figura 60.</b> Desplazamiento de bimetel vs giros de tornillo de calibración .....	63
<b>Figura 61.</b> Desarmador verificador de posición de tornillo de calibración .....	64
<b>Figura 62.</b> Medición de separación entre bimetel y connecting plate una vez colocados los tornillos de calibración .....	65
<b>Figura 63.</b> Apertura de los 10 disyuntores comparados contra tiempo mínimo y máximo .....	66
<b>Figura 64.</b> Diagrama de flujo de proceso de ensamble de disyuntor propuesto con calibración en frío .....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Disipación de potencia en disyuntor MS3320 a 28VCD o 115 VCA, 400 Hz..	9
<b>Tabla 2.</b> Efecto de la temperatura ambiente sobre la apertura de un disyuntor MS3320 de Sensata Technologies .....	11
<b>Tabla 3.</b> Tiempos de apertura de dispositivo 3TC7 .....	35
<b>Tabla 4.</b> Medidas obtenidas por operador 1 .....	45
<b>Tabla 5.</b> Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad .....	45
<b>Tabla 6.</b> Desplazamiento de bimetales al ser sometidos a 70 amperes por 39.5 segundos en cada uno de los 10 disyuntores.....	56
<b>Tabla 7.</b> Desplazamiento de bimetales al ser sometidos a corriente de 0 a 70 amperes .....	57
<b>Tabla 8.</b> Separación entre bimetel y connecting plate medida en cabezal Keyence IM6225 .....	59
<b>Tabla 9.</b> Cálculo de ajuste requerido para acercar bimetel a connecting plate ...	61
<b>Tabla 10.</b> Cálculo de ajuste requerido para acercar bimetel a connecting plate con desplazamiento promedio .....	62
<b>Tabla 11.</b> Cálculo de vueltas requeridas para lograr ajuste de bimetel .....	63
<b>Tabla 12.</b> Comparativa de valores de ajuste calculados y reales .....	64
<b>Tabla 13.</b> Tiempos de apertura de disyuntores una vez ajustados .....	66

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en gran medida al Dr. Eduardo Rubio Cerda, asesor de este trabajo de investigación por el apoyo proporcionado para la realización de éste, y a Sensata Technologies Aguascalientes que me brindó el apoyo necesario para acceder al programa de Maestría.

Agradezco también a CIATEQ A.C. Unidad Aguascalientes por la oportunidad recibida para el estudio de la Maestría en Manufactura Avanzada.

Dedico este trabajo a mis padres Belia y Sergio por sus años de formación y por darme la posibilidad de prepararme adecuadamente.

Finalmente dedico también este trabajo a mi compañera de vida Martha por el apoyo y motivación que siempre me proporcionó.

## GLOSARIO

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
<b>Bimetal termostático</b>	Material compuesto, normalmente en forma de tira u hoja, hecho de dos o más capas metálicas con diferentes coeficientes de expansión que cambia su curvatura al ser sometido a cambios de temperatura.
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>	Cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura provocando una dilatación térmica.
<b>Compensador</b>	Elemento termostático de un disyuntor que mediante el aumento de temperatura causado por el flujo de corriente se aleja del connecting plate, retardando la apertura del botón y compensando así los cambios de temperatura que pudieran afectar la calibración del disyuntor.
<b>Connecting plate</b>	Componente de un disyuntor que mediante el empuje proporcionado por el bimetal libera el mecanismo de apertura del botón sujeto al compensador, cortando el flujo de corriente.
<b>Disyuntor térmico de sobrecarga</b>	Dispositivo mecánico conectado a un sistema eléctrico, cuya función es proveer un camino para el flujo de corriente, además de brindar protección y control del circuito eléctrico ya sea iniciando o deteniendo el flujo de corriente.
<b>Flexividad</b>	El cambio en la curvatura de la línea central longitudinal de un metal termostático por unidad de cambio de temperatura por unidad de grosor.
<b>Módulo de elasticidad</b>	Parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.
<b>Pullin</b>	Proceso de calibración del disyuntor donde éste es sometido a una corriente del 200% y es ajustada la posición del bimetal para asegurar su correcto funcionamiento.
$\sigma$	Coefficiente de expansión térmica

<b>Θ</b>	Tiempo en segundos
<b>ρ</b>	Resistividad en ohms mm <sup>2</sup> /m
<b>A</b>	Área en mm <sup>2</sup>
<b>B</b>	Deflexión
<b>c</b>	Capacidad calorífica específica en J/g°C estimada en 0.502 para todos los bimetales
<b>D</b>	Valor de deflexión
<b>d</b>	Densidad en g / cm <sup>3</sup>
<b>De</b>	Diámetro externo
<b>di</b>	Diámetro interno
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
<b>F</b>	Flexividad
<b>I</b>	Corriente en Amperes
<b>K</b>	Constante dependiente de la geometría del elemento termostático.
<b>L</b>	Longitud en mm
<b>M</b>	Masa en gramos
<b>m</b>	Relación de espesor
<b>n</b>	Relación de espesor
<b>P</b>	Fuerza
<b>Q</b>	Calor en calorías
<b>R</b>	Radio
<b>r</b>	Resistencia en Ohms
<b>T</b>	Temperatura
<b>t</b>	Espesor en mm
<b>V</b>	Fracción de volumen
<b>W</b>	Trabajo
<b>w</b>	Ancho en mm

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

Desde el momento en el que la energía eléctrica comenzó a utilizarse, se ha requerido el uso de dispositivos capaces de iniciar e interrumpir el flujo de corriente eléctrica. Los primeros diseños para lograr esta tarea eran básicos y se basaban en el conocimiento empírico del diseñador [1]. Estos diseños eran realizados con base en prueba y error, pero conforme los sistemas eléctricos iban desarrollándose, un enfoque más científico se hizo necesario para lograr tener diseños de interruptores eléctricos que ofrecieran mejor desempeño y mayor confiabilidad.

Históricamente la protección de circuitos eléctricos contra la sobrecarga eléctrica y los cortocircuitos se ha realizado con disyuntores térmicos de sobrecarga, circuit breakers en inglés, y fusibles. Los fusibles son baratos y pueden reutilizarse, pero esta característica puede ser peligrosa ya que se puede alterar el rango de funcionamiento del fusible. Los fusibles de alta capacidad de ruptura solucionan este problema y pueden lidiar con mayores corrientes, pero son por lejos más costosos tanto inicialmente como en mantenimiento. De cualquier modo, reparar un fusible dañado es molesto y puede requerir algo de tiempo.

Por otro lado, un disyuntor térmico de sobrecarga, en adelante llamado únicamente disyuntor, no tiene los problemas anteriores pero su inconveniente es ser más caro y más complejo que un fusible. La necesidad de un dispositivo que tenga las ventajas tanto de los fusibles como de los disyuntores se vuelve aparente. Esto da como resultado la creación de los disyuntores miniatura, que combinan el bajo costo de un fusible con la confiabilidad y capacidad de conexión y desconexión rápidas.

Sensata Technologies, una empresa líder en la fabricación de sensores y dispositivos de protección eléctrica incluyendo disyuntores [2], nace en 1916 como proveedora de la industria de la joyería bajo el nombre de General Plate Company. Posteriormente la compañía se fusiona con la Spencer Thermostat Company en 1931 para formar la Metals



& Controls Corporation, produciendo su primer disyuntor en 1941 para vehículos y aeronaves militares.

En 1959 Texas Instruments adquiere a la Metals & Controls Corporation, afianzando su posición de liderazgo en el mercado de la protección eléctrica. En el año 2006 Texas Instruments decide vender su división de sensores y controles al grupo Bain Capital naciendo así Sensata Technologies.

Sensata Technologies tiene presencia actualmente en México: Aguascalientes, Mexicali y Matamoros. En el mundo: Brasil, República Dominicana, Estados Unidos (Arizona, Indiana, Maryland, Massachusetts, Minnesota, Tennessee, Virginia, Washington), China, India, Japón, Corea, Malasia, Bélgica, Bulgaria, Inglaterra, Francia, Alemania, Holanda, Irlanda del Norte y Polonia.

En la planta de Aguascalientes se producen diversos modelos de disyuntores para importantes clientes del sector aeroespacial como son Boeing, Airbus, Cessna, Bombardier, Xi'an AVIC, etc.

Los disyuntores una vez ensamblados deben ser calibrados, por lo que son sometidos a un 200% de corriente nominal, después dos tornillos llamados tornillos de calibración son girados hacia adentro del dispositivo con el fin de acercar el bimetálico que se ha deformado por efecto de la temperatura hacia el mecanismo de apertura del botón, abriendo el circuito. Esta apertura debe realizarse entre 38 y 41 segundos de iniciada la operación.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La operación de calibración de la posición del bimetálico del disyuntor depende en gran medida de la habilidad del operador debido a la corta ventana de tiempo en la que el disyuntor debe cortar el flujo de corriente, lo que asegura un correcto funcionamiento de apertura dentro de los tiempos especificados por diseño. Si no se consigue realizar esta apertura dentro de la ventana de tiempo especificada el dispositivo debe retirarse del equipo de prueba dejándose enfriar por 3 minutos en un soplador de aire, para

repetir nuevamente la operación. A un operador experimentado puede tomarle hasta 3 intentos el poder calibrar un solo disyuntor, lo que representa un tiempo de hasta 8 minutos, considerando el tiempo de calibración y de enfriamiento, para lograr calibrarlo exitosamente. Si consideramos que un lote de producción normal puede contener hasta 28 disyuntores, esto representa un total de 3 horas y 44 minutos para poder calibrarlo completamente. Esto como se explica en la sección 1.3, trae como consecuencias pérdidas económicas para la organización si comparamos el proceso con otros más eficientes.

El presente trabajo de investigación pretende caracterizar el comportamiento del bimetalo de un disyuntor de 35 Amperes bajo el efecto de corriente eléctrica con el fin de predecir su movimiento para simplificar la calibración del dispositivo y lograr una posible calibración "en frío", es decir sin aplicar corriente eléctrica en futuras investigaciones y con esto reducir el tiempo de la operación.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente las organizaciones trabajan por reducir los tiempos de producción y costos para mejorar el desempeño de la operación y la calidad del producto. Reducir los tiempos de producción incrementan el valor agregado de los productos, por lo que reducir el tiempo ciclo en la producción de un producto o servicio incrementará el volumen de producción. Esto tendrá dos efectos: los costos de producción bajarán y la organización será capaz de producir mayor cantidad de bienes con menos recursos.

EL tiempo ciclo se define como el tiempo requerido en cada estación para llevar a cabo el trabajo requerido. Este tiempo incluye tanto tiempo productivo como tiempo no productivo [3].

$$\text{Tiempo ciclo} = \text{Tiempo de servicio} + \text{tiempo de espera}$$

Esta necesidad de mejorar reducir los tiempos de espera y por lo tanto mejor el tiempo ciclo no es la excepción para Sensata Technologies. Una reducción en el tiempo de calibración de los disyuntores producidos traerá como consecuencias:

1. Mejora en el tiempo de entrega a los clientes.
2. Disminución de scrap (material desperdiciado).
3. Ahorro de capital al reducir el trabajo en proceso (WIP).
4. Mayores ventas debido al aumento de capacidad.
5. Aumento en la productividad de los operadores, lo que se traduce en ahorros al requerir menos personal.
6. Mejora en el uso de equipos, requiriendo menos tiempo de uso y por lo tanto menos mantenimiento.

#### **1.4. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar eléctricamente el bimetálico de un disyuntor de 35 Amperes con la finalidad de obtener información que permita predecir su respuesta para determinar la factibilidad de realizar la calibración del dispositivo en frío, es decir mediante ajustes mecánicos, con el propósito de sustituir el procedimiento actual de calibración que utiliza corriente eléctrica, reducir los tiempos de calibración y simplificar el proceso de producción de estos componentes.

#### **1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterizar el movimiento del bimetálico en un disyuntor de 35 amperes con el fin de predecir su posición final y abrir el camino para el desarrollo de un equipo que logre reducir el tiempo de calibración manual.
- Establecer una metodología para caracterización de bimetálico.
- Obtener, de acuerdo a los estudios experimentales, una fórmula para predecir movimiento y posición del bimetálico bajo la influencia de la corriente eléctrica.

#### **1.6. HIPÓTESIS**

La hipótesis nula  $H_0$  que se plantea es que no es posible conocer la posición final del bimetálico al conocer la posición inicial de éste y el desplazamiento de los tornillos de calibración.  $P$  es el número de disyuntores calibrados por el método propuesto que abran dentro de la ventana de tiempo correcta. Por lo tanto  $H_0: p \geq 0,7$  y  $H_1: p < 0,7$ .

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO

Un disyuntor es un dispositivo mecánico conectado a un sistema eléctrico, cuya función es proveer un camino para el flujo de corriente que además debe brindar protección y control del circuito eléctrico ya sea iniciando o deteniendo el flujo de corriente [1]. Estos dispositivos permanecerán en posición cerrada proporcionando un flujo constante de corriente, o en posición abierta cortando todo flujo eléctrico. Es por eso que su función de cerrar un circuito defectuoso o interrumpir un corto circuito se realizará en pocas ocasiones, y deben ser lo suficientemente confiables para realizar estas operaciones, incluso después de largos periodos de tiempo sin movimiento.

La figura 1 muestra el principio de funcionamiento y los componentes principales de un disyuntor.

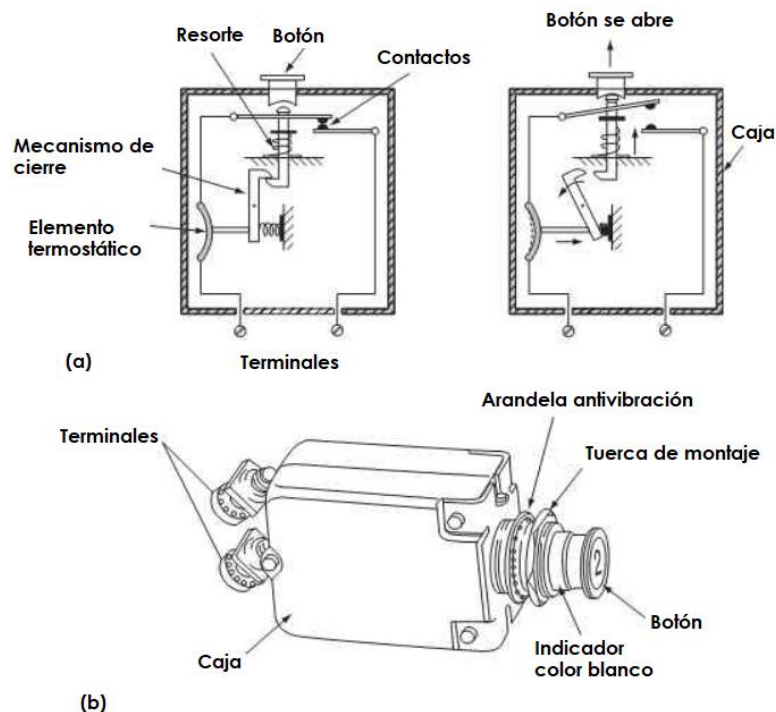


Figura 1. Principio de funcionamiento (a) y componentes externos (b) de un disyuntor.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [http://www.industrial-electronics.com/aircraft\\_7.html](http://www.industrial-electronics.com/aircraft_7.html)

La función de un disyuntor es entonces tener dos condiciones estables, "cerrado" donde idealmente tiene una impedancia de cero, muy pequeña en la práctica; y "abierto" donde idealmente tiene una impedancia infinita, extremadamente alta en la práctica.

Los disyuntores pueden ser usados para aplicaciones de alto y bajo voltaje. Para el presente trabajo se tratarán los dispositivos para bajos voltajes conocidos como disyuntores miniatura.

## **2.2. DISYUNTORES MINIATURA**

Se ha convertido en práctica general la protección de circuitos eléctricos confiando únicamente en los disyuntores en miniatura, que también son conocidos como disyuntores de "caja moldeada". Ya que su alcance puede llegar hasta aplicaciones de 600 Amperes a 600 Voltios, solo su tamaño físico justifica el término miniatura [4].

Los primeros disyuntores miniatura datan de los años 1910-1925, éstos fueron desarrollados en Estados Unidos con base en el diseño de disyuntores de aceite y accionados por un elemento fusible. Pero no fue hasta 1930 donde los disyuntores en miniatura tal como los conocemos comenzaron a desarrollarse a la par en Estados Unidos y en Gran Bretaña [4].

Los disyuntores miniatura son probados y clasificados de acuerdo a la norma UL 489-1991 [5]. Todos sus mecanismos y componentes están completamente contenidos en una caja moldeada de material aislante (Fig. 2). La cubierta y la base de estos disyuntores están diseñados de tal forma que los dispositivos no puedan abrirse para propósitos de mantenimiento. Los contactos principales no pueden retirarse, sin embargo, algunos disyuntores miniatura incluyen accesorios de instalación como pueden ser elementos de tornillería. Están disponibles en una gran cantidad de rangos de corriente.

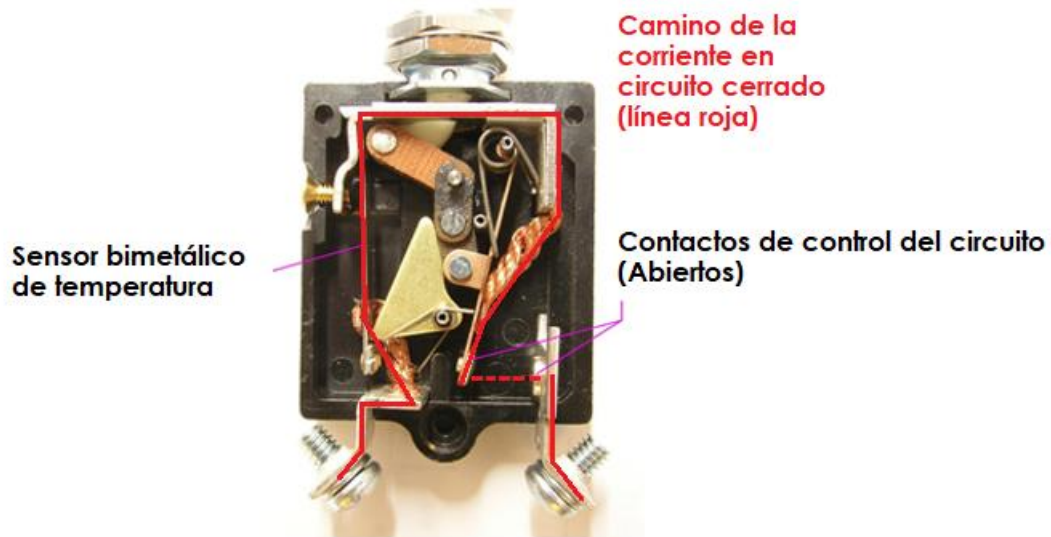


Figura 2. Componentes internos de un disyuntor miniatura.<sup>2</sup>

### 2.3. DISYUNTORES PARA AERONAVES

Dentro de los disyuntores miniatura existe gran cantidad de aplicaciones, dentro de ellas en el sector aeroespacial, que son los dispositivos tratados en el presente estudio. Los sistemas eléctricos de las aeronaves se han vuelto cada vez más complejos, pero la tecnología usada para proteger el cableado a la distribución de corriente ha cambiado poco en las últimas décadas. La protección actual de las aeronaves se logra con disyuntores electromecánicos de varios tipos. Estos dispositivos han disminuido su tamaño y mejorado sus límites de desempeño, pero sus características básicamente son las mismas [6]. La figura 3 muestra el esquema para la protección de cables con componentes relativamente baratos y confiables.

<sup>2</sup> <http://otodiagramwiring.today/aero-switch-wiring-circuit-breakers.html>

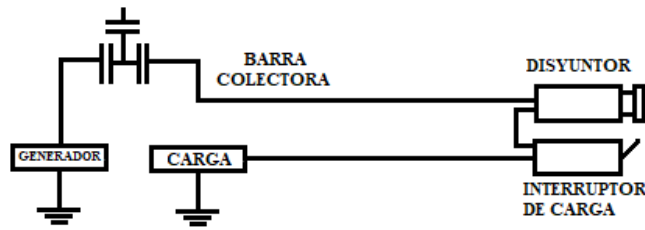


Figura 3. Diagrama de sistema tradicional de protección de circuitos.<sup>3</sup>

Los disyuntores electromecánicos han servido satisfactoriamente por varias generaciones de diseños de aeronaves. Un diseño simple, aunado a años de evolución en su desarrollo, ha demostrado ser una solución confiable y de bajo costo para la protección del cableado de las aeronaves. Como la gran mayoría de disyuntores, el elemento clave para su funcionamiento es el uso de un sensor bimetálico que reacciona directamente al flujo de corriente calentándose. Los factores que contribuyen al sobrecalentamiento del cable son inherentemente percibidos por el bimetal, aunque también existen factores externos que el bimetal no puede detectar como cambios menores rápidos de voltaje o corriente, radiación, interferencia electromagnética, etc. [6].

## 2.4. CARACTERÍSTICAS INHERENTES DE LOS DISYUNTORES PARA AERONAVES

Algunas características inherentes a la tecnología de acuerdo a los requerimientos de diseño de Texas Instruments o Sensata Technologies son [6]:

### 2.4.1. Baja disipación de potencia

Los disyuntores transportan corrientes normales continuamente con muy baja caída de voltaje a través de las terminales.

Como la TABLA 1 muestra, un disyuntor modelo MS3320 de Sensata Technologies de 5 Amperes normalmente disipa menos de 2 Watts a carga de diseño, y un disyuntor de 20

<sup>3</sup> Cannavo F., Peterson R., Cobb C. (1987) 'Circuit Protection for Advanced Aircraft – A Functional and Historical Perspective.' SAE International SAE Aerospace Avionics Equipment and Integration Conference and Exposition. Vol 1.

Amperes solo disipa 5 Watts. Los disyuntores compensados, como su nombre lo indica, son compensados internamente para no ser afectados por la temperatura ambiente o por el aumento de temperatura debido al calentamiento  $I^2R$  de dispositivos adyacentes.

Estos dos factores eliminan el gasto y peso de sistemas de enfriamiento externos.

TABLA 1  
*Disipación de potencia en disyuntor MS3320 a 28VCD o 115 VCA, 400 Hz*

AMPERAJE DE DISYUNTOR (A)	CAIDA DE VOLTAJE (V)	DISIPACIÓN DE POTENCIA (W)
1	1.10	1.10
2	0.70	1.40
5	0.35	1.75
10	0.28	2.80
15	0.25	3.75
20	0.25	5.00

### **2.4.2. Curvas tiempo-corriente**

Los disyuntores son seleccionados para proveer protección ante el peor escenario de sobrecarga para el cableado mientras permite a la vez la máxima corriente vs. tiempo. Esto se traduce en poder usar el menor calibre de cable para un circuito en particular. Los tiempos de apertura del disyuntor son paralelos a las curvas de daño del cable debido a que el sensor bimetálico es esencialmente un análogo electromecánico del cable. La correcta selección del disyuntor permite un margen suficiente entre la curva del dispositivo y la curva de daño del cable, lo que permite tener en cuenta las tolerancias normales del dispositivo y la aplicación. La curva de daño del cable también tiene implicaciones en otras consideraciones de aplicación: tolerancia de carga,



apertura final y coordinación. La figura 4 muestra la curva tiempo corriente de dos modelos de disyuntores producidos por Sensata Technologies.

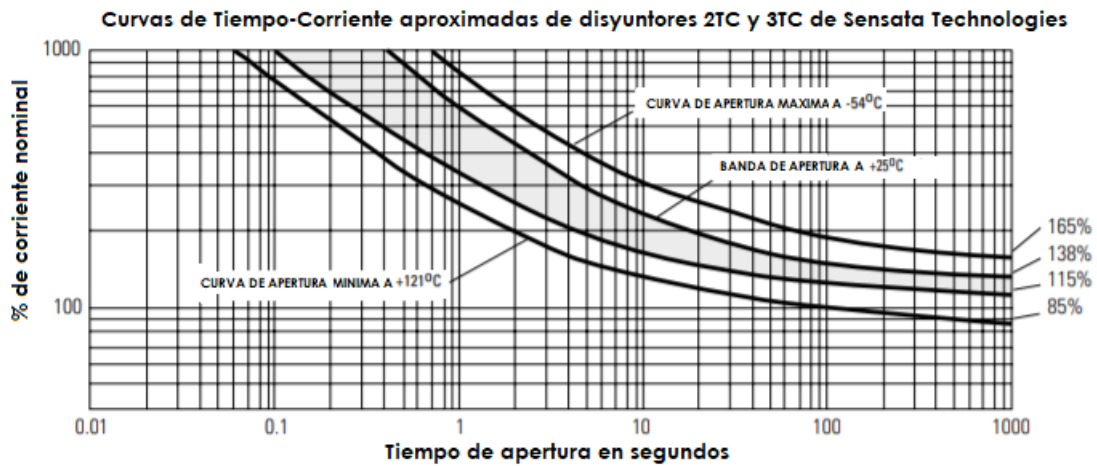


Figura 4. Curva tiempo corriente de disyuntores 2TC y 3TC.<sup>4</sup>

### 2.4.3. Tolerancia de carga

Es común que se produzcan altas de corriente transitorias durante el modo normal de operación de las aeronaves. Las curvas de apertura de los disyuntores pueden ser adaptadas a las curvas del daño del cableado y así evitar aperturas innecesarias de los disyuntores. Sin esta habilidad para absorber picos de corriente momentáneos, al hacer uso de dispositivos de protección que abran el circuito eléctrico instantáneamente se requeriría usar diámetros de cable por encima de la especificación. La figura 5 muestra la curva tiempo corriente del arranque de un motor y como el disyuntor evita cortar el flujo de corriente.

<sup>4</sup> <https://telemeter.info/index/download>

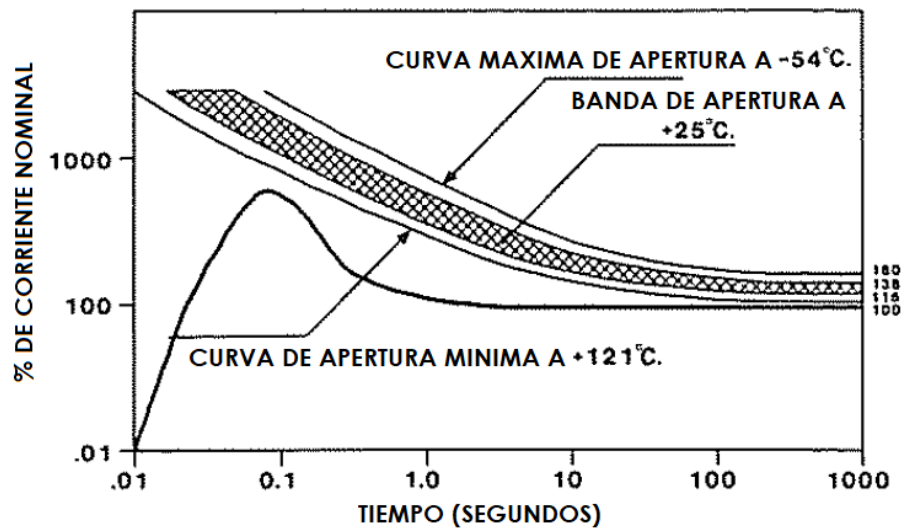


Figura 5. Curva tiempo corriente de arranque de un motor.<sup>5</sup>

#### 2.4.4. Características de apertura

La apertura de diseño de los disyuntores es especificada de tal forma que el dispositivo debe resistir un mínimo de sobrecarga de corriente indefinidamente sin abrir, típicamente 115% de la corriente nominal, y finalmente abrir a una mayor sobrecarga, normalmente de 138%, esto de acuerdo a la especificación MIL-C-5809G [7]. Hay que considerar que la corriente de apertura se ve afectada por la temperatura ambiente tal como lo muestra la TABLA 2.

TABLA 2

*Efecto de la temperatura ambiente sobre la apertura de un disyuntor MS3320 de Sensata Technologies.*

Temperatura Ambiente	Mínima corriente de apertura	Máxima corriente de apertura
25°C	115%	138%
121°C	100%	138%
-55°C	115%	160%

<sup>5</sup> Cannavo F., Peterson R., Cobb C. (1987) 'Circuit Protection for Advanced Aircraft – A Functional and Historical Perspective.' SAE International SAE Aerospace Avionics Equipment and Integration Conference and Exposition. Vol 1

### 2.4.5 Operación coordinada de disyuntores

La coordinación de los disyuntores se refiere a la necesidad de un sistema eléctrico en cascada. Un sistema en cascada es aquel donde un canal eléctrico se divide en sub canales y luego en cargas específicas. Una sobrecarga dada debe abrir el disyuntor más pequeño en el circuito para prevenir que sean cortadas otras cargas en el canal que no son afectadas por la falla. Como lo muestra la figura 6, una sobrecarga de 18 Amperes causará que solamente se abra su disyuntor y no los disyuntores de 5 y 10 Amperes, dejando las partes sanas del sistema funcionando.

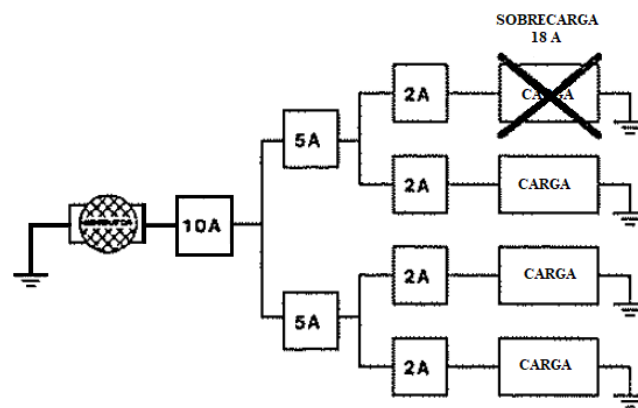


Figura 6. Sistema en cascada donde solo el disyuntor de 2A con falla abrirá el circuito.<sup>6</sup>

### 2.4.6. Capacidad de interrupción

La capacidad de interrupción, también conocida como ruptura, es la máxima sobrecarga potencial que un circuito produce bajo el peor caso de condiciones de falla. Normalmente se considera como la suma de capacidad de falla de todos los generadores en paralelo de la aeronave. El disyuntor debe responder virtualmente de manera instantánea.

<sup>6</sup> Cannavo F., Peterson R., Cobb C. (1987) 'Circuit Protection for Advanced Aircraft – A Functional and Historical Perspective.' SAE International SAE Aerospace Avionics Equipment and Integration Conference and Exposition. Vol 1

#### **2.4.7. Memoria térmica**

Es la habilidad del disyuntor de tomar en cuenta la energía almacenada en el cable de previas condiciones de carga antes de una apertura por sobrecarga. Ya que ésta es una cualidad inherente de los bimetales en los disyuntores, no se ha definido una especificación para la industria. Los dos aspectos de la memoria térmica son la memoria de precarga y avance por impulsos.

#### **2.4.8. Memoria de precarga**

La memoria de precarga permite al disyuntor acortar su tiempo de apertura ante una sobrecarga dada como función del nivel de la corriente normal que éste ve antes de la sobrecarga. Ya que la temperatura del cableado sube en respuesta a esta precarga, esta característica ayuda a mantener la temperatura del cable debajo de la curva de daño en un amplio rango de corrientes de precarga y sobrecarga.

#### **2.4.9 Avance por impulsos**

Se refiere a la condición donde el disyuntor es repetidamente reseteado a una condición de sobrecarga sin dar suficiente tiempo a la carga y al cable de enfriarse. Bajo estas condiciones usando un dispositivo de protección con tiempos fijos de apertura, es posible sobrepasar la temperatura del cable por encima de su temperatura de uso segura. La capacidad de sensado de temperatura inherente al disyuntor para aeronaves ayuda a prevenir que esto suceda.

Además de las características ya mencionadas los disyuntores para aeronaves deben tener 3 características al momento de ser diseñados [8]:

#### **2.4.10. Confiabilidad**

La confiabilidad requiere un énfasis especial en los equipos de aerotransporte, no porque se tolere la falta de confiabilidad en otros equipos, sino porque es más difícil de lograr. Los factores normales de seguridad e incertidumbre que se proporcionan en otras

aplicaciones y que suelen ser muy grandes no pueden incorporarse a las aplicaciones aeronáuticas, las cuales deben diseñarse considerando un desempeño con poco margen de error. Por lo tanto, es esencial realizar pruebas prolongadas para garantizar un margen de seguridad suficiente en cada uno de los componentes.

#### **2.4.11. Bajo peso**

El peso es claramente un factor vital en los componentes de una aeronave. Después de la estructura de la aeronave, motores, tripulación y combustible, la carga desplazable efectiva es muy limitada. Por cada libra de peso extra se requerirán aproximadamente 6 libras extra de peso en la estructura del avión para poder llevarla. Por lo tanto, los costos de fabricación se vuelven secundarios si el peso puede reducirse con el uso de materiales especiales o maquinados adicionales. Las prácticas regulares de diseño para transporte terrestre o marítimo no pueden aplicarse para los equipos aéreos y es necesario considerar el efecto del peso en los materiales utilizados.

#### **2.4.12. Confiabilidad dieléctrica**

Los materiales aislantes utilizados deben ser capaces de resistir la condensación sin tener un deterioro en la superficie del dispositivo o en sus cualidades resistivas. Los marcos moldeados de baquelita son efectivos para lograr que los dispositivos resistan las condiciones antes mencionadas.

### **2.5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN**

Como ya se mencionó el funcionamiento de los disyuntores se debe gracias a la acción mecánica de los bimetálicos termostáticos. Un bimetálico termostático es un material compuesto, normalmente en forma de tira u hoja, y hecho de dos o más capas metálicas con diferentes coeficientes de expansión. Cuando estas son unidas permanentemente, el material cambiará su curvatura al ser sometido a cambios de temperatura. [9]

El bimetel al cambiar su curvatura será el actuador que hará que el mecanismo de enclave del botón se destrabe, haciendo que los contactos internos se separen y el flujo de corriente eléctrica se interrumpa.

### 2.5.1 Principio de funcionamiento de sensor bimetálico

La figura 7 muestra el funcionamiento de un bimetel.

1. Dos tiras metálicas de la misma longitud con un alto y bajo coeficiente de expansión térmica respectivamente.
2. Al elevar la temperatura, su longitud relativa cambiará.
3. Cuando las tiras metálicas son unidas, y la temperatura se eleva, la tira de alta expansión (HES) estará sometida a compresión mientras la tira de baja expansión (LES) estará sometida a tensión.
4. Las fuerzas producen un momento que causa que el elemento se doble formando un arco uniforme. El doblado es directamente proporcional a la diferencia entre el coeficiente de expansión y el cambio de temperatura de las tiras metálicas, e inversamente proporcional al espesor de las tiras combinadas. La cantidad de deformación también es afectada por la relación entre los módulos de elasticidad de ambas tiras y por su relación de espesor [10].

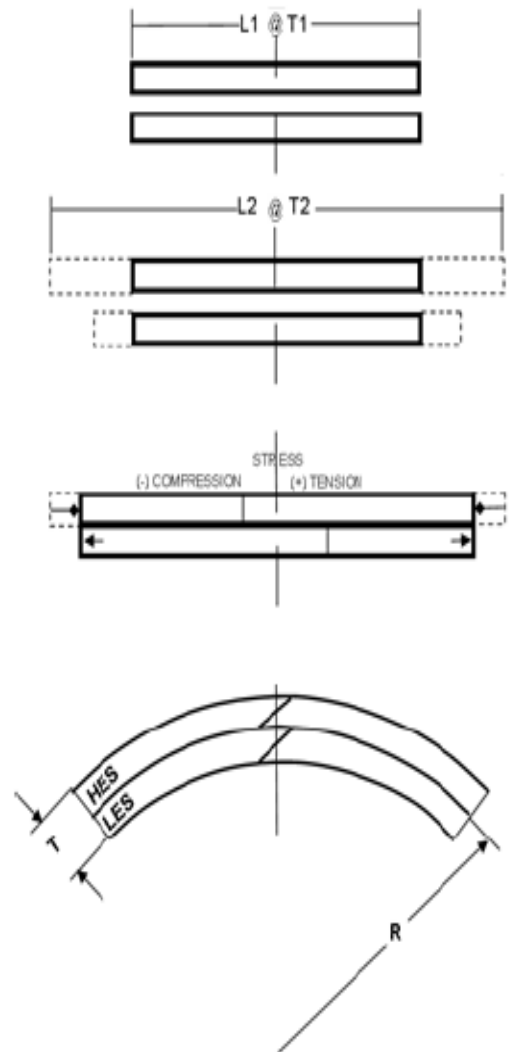


Figura 7. Comportamiento de bimetel. <sup>7</sup>

<sup>7</sup> ENGINEERED MATERIALS SOLUTIONS, "Thermostatic Bimetal Designer's Guide", Wickeder group, Attleboro MA. EE.UU.AA. p.5

Los esfuerzos de tensión y compresión generados en la unión pueden calcularse mediante [9]:

$$\sigma = E/2 (\alpha_2 - \alpha_1) (T_2 - T_1) \quad (1)$$

donde los metales tienen diferentes coeficientes de expansión térmica ( $\alpha_1 > \alpha_2$ ) con un cambio de longitud a una temperatura  $T_2 > T_1$ . Se asume que ambos metales tienen el mismo módulo de elasticidad (E) y el mismo espesor.

El principio de operación de los metales termostáticos, o bimetales, es conocido desde hace más de 200 años. Sin embargo, las aplicaciones tecnológicas tuvieron un auge después del descubrimiento del Invar, una aleación de hierro y 36% de níquel, por parte de Charles-Edoaurd Guillaume en 1897. Esta aleación tiene un coeficiente de expansión térmica (CET) de casi cero a temperatura ambiente, pero puede incrementarse al aumentar o disminuir el porcentaje de níquel en la aleación. Debido a esto el CET de la aleación puede igualarse al de diversos materiales controlando el porcentaje de níquel. Esta habilidad de crear aleaciones con un CET a medida es la base para el diseño de metales termostáticos [9].

## 2.6. FLEXIVIDAD Y DEFLEXIÓN ESPECIFICA

El término flexividad es exclusivo de los metales termostáticos y es definido por la ASTM (American Society for Testing and Materials) como el cambio en la curvatura de la línea central longitudinal del espécimen por unidad de cambio de temperatura por unidad de grosor y puede determinarse mediante la siguiente expresión [9]:

$$F = \frac{\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)t}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Donde t es el espesor total asumiendo que el espesor de cada tira metálica es t/2, y  $T_2$  y  $T_1$  son las temperaturas final e inicial respectivamente. Para determinar la flexividad entre dos temperaturas cualesquiera  $T_1$  y  $T_2$ , es necesario medir las curvaturas  $1/R_1$  y  $1/R_2$  a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente. Para encontrar la curvatura a cualquier temperatura se debe medir la distancia D [11]. Por lo tanto, el radio R puede calcularse como:

$$\frac{1}{R} = \frac{8D}{L^2 + 4Dt + 4D^2} \quad (3)$$

Donde D y L se definen a partir de la figura 8. Los valores de  $\frac{1}{R_2}$  y  $\frac{1}{R_1}$  son determinados a la temperatura  $T_2$  y  $T_1$  respectivamente. El procedimiento estándar de la ASTM para determinar la flexividad de un material requiere un espécimen sujeto en dos extremos como se muestra en la misma figura, sumergido en un baño líquido [12]. Los valores de deflexión en la línea central (D) son medidos a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Los radios de curvatura son luego calculados usando las dos ecuaciones antes mencionadas.

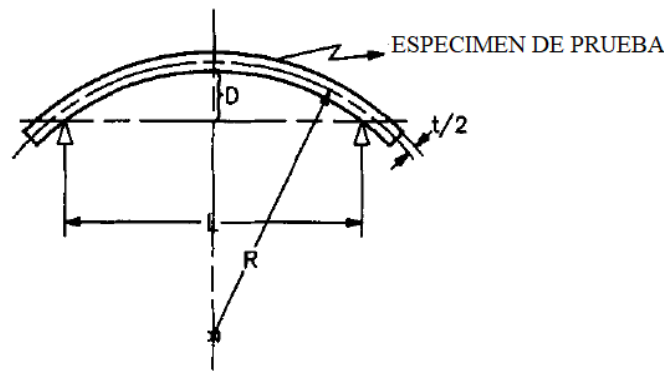


Figura 8. Método estándar de la ASTM para determinar flexividad y deflexión específica de un metal termostático. <sup>8</sup>

Timoshenko desarrolló una ecuación para calcular el cambio de curvatura de un metal termostático sujeto en dos extremos [13].

$$\frac{1}{R} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T_2 - T_1)(1+m)^2}{t[3(1+m)^2 + (1+mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right)]} \quad (4)$$

Donde m y n son la relación de espesores ( $t_1/t_2$ ) y la relación de módulos de elasticidad ( $E_1/E_2$ ) respectivamente. El radio (R) está inversamente relacionado con la curvatura del espécimen (a menor radio, mayor curvatura o deflexión). Si los espesores y los módulos de elasticidad de los metales son iguales, la ecuación se reduce a:

<sup>8</sup> Khadkikar P. (1993) 'The Principles and Properties of Thermostat Metals'. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. Volume 45, no. 6, p. 39-42



$$\frac{1}{R} = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)(T_2 - T_1)}{2t} \quad (5)$$

Es aparente a partir de esta ecuación que la deflexión térmica es directamente proporcional a la diferencia en los CET de los metales y al cambio de temperatura, e inversamente proporcional al espesor del metal termostático.

Los metales termostáticos comercialmente disponibles tienen valores de flexividad que van desde  $10 \times 10^{-6}$  a  $38 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [9]. La flexividad es una entidad útil que nos permite calcular la deflexión esperada de cualquier metal termostático dado un cambio de temperatura determinado. La fuerza generada por un elemento bimetálico cuando una parte o toda su deflexión es suprimida es también proporcional a la flexividad del metal termostático.

## 2.7. DISEÑO DE METALES TERMOSTÁTICOS

Ya que la propiedad más crítica de un metal termostático es su capacidad para flexionarse a partir de un cambio de temperatura, los componentes de un metal termostático son seleccionados principalmente por sus coeficientes de expansión térmica lineales. Usualmente el CET de un material es una función de la temperatura. Ya que la mayoría de los metales y aleaciones tienen un CET relativamente constante solo en un rango limitado de temperaturas, los metales termostáticos normalmente tienen un rango limitado de temperaturas 'útiles' donde la deflexión está bien definida y es relativamente lineal. Generalmente, las aleaciones de baja expansión son de hierro-níquel, similares al Invar. Las aleaciones de alta expansión son usualmente a base de hierro con cromo y níquel. Algunos tipos de acero inoxidable también pueden ser usados en aleaciones de alta expansión.

La resistividad de un metal termostático es también crítica para algunas aplicaciones y se vuelve importante su consideración al diseñar el metal termostático. En aplicaciones donde los elementos termostáticos son calentados mediante una corriente eléctrica, se vuelve muy importante controlar la resistividad para que el calor generado por la corriente eléctrica pueda calcularse.

La resistividad de los metales termostáticos es usualmente controlada insertando una tercera capa entre las capas de alta y baja expansión y/o alterando la relación de espesores del componente [9]. La tercera capa usualmente consiste de níquel, cobre, manganeso o de aleaciones derivadas de estos metales.

Es deseable conocer el módulo de elasticidad de un metal termostático compuesto, ya que el trabajo realizado por el elemento termostático es proporcional a su módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad, o de Young, mide la resistencia a la deformación de los materiales cuando se aplican fuerzas externas. Cuando la relación de espesor del componente está diseñada para obtener la máxima curvatura se obtiene la siguiente relación [9]:

$$E = \frac{4E_1t_1^3 + 4E_2t_2^3}{t^3} \quad (6)$$

La ecuación históricamente usada para calcular el módulo de elasticidad en flexión de un bimetálico termostático de dos capas es [10]:

$$E_{flex} = \frac{4E_1 \left\{ (t_1 - c_1)^3 + c_1^3 + \left( \frac{E_2}{E_1} [(t_2 + t_1 - c_1)^3 - (t_1 - c_1)^3] \right) \right\}}{t^3} \quad (7)$$

$$\text{Donde } c_1 = \frac{E_1 t_1^2 + E_2 t_2^2 (2t_1 + t_2)}{2(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \quad (8)$$

$E_1$  y  $E_2$  son los módulos de elasticidad de los componentes,  $t_1$  y  $t_2$  los espesores y  $t$  el espesor total del bimetálico.

Para los bimetálicos termostáticos de 3 o más capas, las ecuaciones del módulo de elasticidad se vuelven más complejas. Debido a esto los valores son calculados aproximadamente usando medidas en tensión uniaxial, así como con la regla de mezclas bajo tensión uniaxial [10].

Varias propiedades de materiales compuestos pueden ser estimados a partir de la regla de mezclas, ésta nos dice que las propiedades de un material compuesto son una

función de la fracción de volumen de cada material en el compuesto. La densidad, esfuerzos y módulo de elasticidad pueden calcularse usando esta regla [14]. Para compuestos que contienen fibras continuas alineadas uniaxialmente, el esfuerzo del compuesto se expresa como:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (9)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo axial,  $V$  es la fracción de volumen del componente y los subíndices  $c$ ,  $f$  y  $m$  se refieren al compuesto, fibra y matriz, respectivamente.

Bajo condiciones de tensión uniforme, como sería un esfuerzo longitudinal igual en los componentes del elemento, la relación para el módulo de elasticidad es:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (10)$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad y los subíndices representan a los componentes del material compuesto. Esta ecuación ignora cualquier esfuerzo transversal debido a las diferentes tendencias contráctiles de los componentes ( $\nu_f \neq \nu_m$ , donde  $\nu$  es la relación de Poisson). Sin embargo, en los sistemas metálicos, la diferencia en la relación de Poisson de los dos componentes es generalmente insignificante por lo que los valores resultantes de la regla de mezclas generalmente se encuentran dentro de los límites del error experimental.

Para el caso de la densidad, la relación es:

$$d_c = d_f V_f + d_m V_m \quad (11)$$

En varias aplicaciones, los elementos termostáticos sirven tanto como sensores de temperatura como controladores de temperatura. Una consideración importante en el diseño de un elemento es la cantidad de deflexión y fuerza requeridos para realizar el trabajo. La deflexión ( $B$ ) debida al cambio de temperatura depende solamente de la geometría del elemento y de la flexividad del metal termostático. La fuerza ( $P$ ) generada

cuando parte o toda la deflexión es inhibida, referida como la fuerza térmica, depende del módulo de elasticidad del metal termostático, además de la geometría y flexividad del metal. Las ecuaciones para calcular la deflexión y la fuerza de un metal termostático son [15]:

$$B = \frac{K_1 F \Delta T L^2}{t} \quad (12)$$

$$P = \frac{K_2 F E \Delta T w t^2}{L} \quad (13)$$

Las constantes K1 y K2 son dependientes de la geometría del elemento. Éstas se proporcionan en la sección 2.8 donde se muestra cada constante según el tipo de bimetálico.

El trabajo (W) realizado por el elemento es igual a PB y es proporcional al cuadrado de la flexividad, módulo de elasticidad y el diferencial de temperatura [9]:

$$W = (K_1 K_2) F^2 E \Delta T^2 (L w t) \quad (14)$$

Como lo muestra la ecuación anterior a mayor flexividad de un metal termostático, menor será el volumen requerido para realizar el trabajo. Por lo tanto, un metal termostático con una máxima flexividad para un rango de temperatura determinado es usualmente seleccionado para una aplicación determinada. Para la mayoría de las formas de elementos, la deflexión es una función lineal de la temperatura. Sin embargo, una deflexión no lineal discontinua puede obtenerse usando un elemento con forma de disco o viga.

La resistividad de un metal termostático puede tener mayor peso que otros factores si el elemento bimetálico es un componente que transporta corriente. La relación entre la resistividad y la resistencia en un elemento termostático rectangular está definida por [10]:

$$\rho = \frac{r A}{L} = \frac{R w t}{L} \quad (15)$$

El cálculo de la resistividad es sencillo si los 3 componentes se consideran un circuito en paralelo [10]:

$$\frac{t_1^f}{\rho_1} + \frac{t_2^f}{\rho_2} + \frac{t_3^f}{\rho_3} = \frac{1}{\rho} \quad (16)$$

Usando la primera ley de Joule y la definición de capacidad calorífica específica es posible derivar un incremento ideal de temperatura en un bimetal donde las pérdidas de calor por convección y radiación se consideran despreciables.

De la primera ley de Joule, una corriente eléctrica tiene un efecto de calentamiento de [10]:

$$Q = I^2 r \theta \quad (17)$$

La relación entre este calentamiento y el aumento de temperatura está dada por [10]:

$$Q = cM (\Delta T) \quad (18)$$

Por lo tanto, el aumento de temperatura de un resistor (sin considerar pérdidas de calor por convección y radiación) está dado por [10]:

$$\Delta T = \frac{I^2 r \theta}{c m} \quad (19)$$

Al sustituir  $r$  a partir de la relación entre la resistividad y resistencia  $\rho = \frac{rA}{L} = \frac{rwt}{L}$ , y asumiendo una sección transversal rectangular podemos expresar el aumento de temperatura de un resistor como [10]:

$$\Delta T = \frac{I^2 \rho \theta}{c d (wt)^2} \quad (20)$$

## 2.8 TIPOS DE BIMETALES

Los bimetales termostáticos por su forma pueden clasificarse en [16]:

### 2.8.1 Fijo en cantiléver

Son los más simples y los más comunes. Generalmente el espesor no debe ser menos al 5% del ancho y el ancho no debe ser mayor al 20% de la longitud total para asegurar un correcto funcionamiento. La figura 9 muestra un bimetetal en cantiléver.

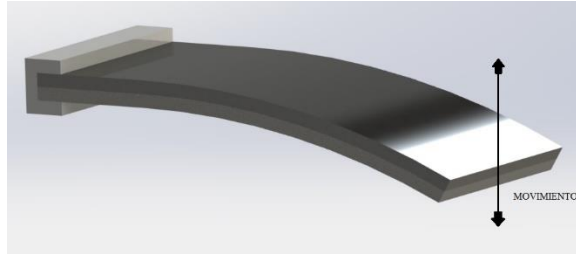


Figura 9. Renderizado de bimetetal en cantiléver.

Su deflexión térmica puede calcularse mediante:

$$B = \frac{0.53 F (T_2 - T_1) L^2}{t} \quad (21)$$

Su fuerza mecánica (fuerza requerida para causar una deflexión mecánica) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{4EBwt^3}{L^3} \quad (22)$$

Su fuerza térmica (fuerza desarrollada si el bimetetal está completamente restringido) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{2.12EF (T_2 - T_1) wt^2}{L} \quad (23)$$

### 2.8.2. Viga simple soportada libremente

Sigue las mismas consideraciones de diseño del bimetálico en cantiléver. Este se muestra en la figura 10.

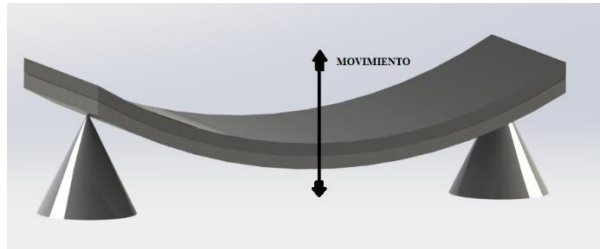


Figura 10. Renderizado de bimetálico de viga simple.

Su deflexión térmica puede calcularse mediante:

$$B = \frac{0.133 F (T_2 - T_1) L^2}{t} \quad (24)$$

Su fuerza mecánica (fuerza requerida para causar una deflexión mecánica) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{64EBwt^3}{L^3} \quad (25)$$

Su fuerza térmica (fuerza desarrollada si el bimetálico está completamente restringido) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{8.51EF (T_2 - T_1) wt^2}{L} \quad (26)$$

### 2.8.3. Bimetálico en U

Se duplica la fuerza en comparación con los bimetálicos en cantiléver o de viga simple, pero la deflexión se reduce a la mitad. Su principal aplicación es la transformación del

cambio de temperatura en fuerza para controlar válvulas o interruptores. Un ejemplo de éste se muestra en la figura 11.

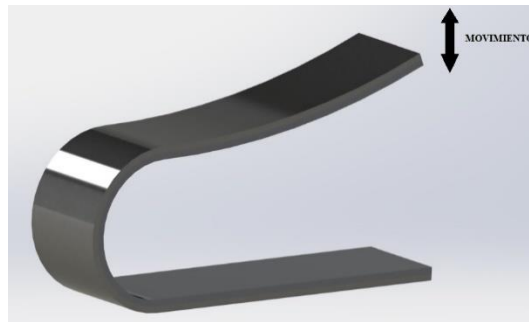


Figura 11. Renderizado de bimetálico en U.

Su deflexión térmica puede calcularse mediante:

$$B = \frac{0.265 F (T_2 - T_1) L^2}{t} \quad (27)$$

Su fuerza mecánica (fuerza requerida para causar una deflexión mecánica) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{16EBwt^3}{L^3} \quad (28)$$

Su fuerza térmica (fuerza desarrollada si el bimetálico está completamente restringido) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{4.24EF (T_2 - T_1) wt^2}{L} \quad (29)$$

#### 2.8.4. Espiral o hélice

Estos bimetálicos proporcionan amplios movimientos con pequeños cambios de temperatura en espacios reducidos. También proporcionan torque que puede ser usado en aplicaciones como indicadores de temperatura, compensación de temperatura, apertura y cerrado de válvulas, etc. Éste se muestra en la figura 12.



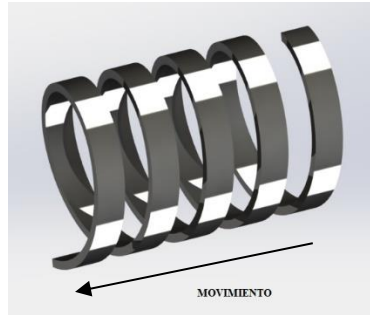


Figura 12. Renderizado de bimetel espiral.

Su deflexión térmica puede calcularse mediante:

$$B = \frac{67 F (T_2 - T_1)L}{t} \quad (30)$$

Su fuerza mecánica (fuerza requerida para causar una deflexión mecánica) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{0.0232E Awt^3}{Lr} \quad (31)$$

Su fuerza térmica (fuerza desarrollada si el bimetel está completamente restringido) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{1.55EF (T_2 - T_1)wt^2}{r} \quad (32)$$

### 2.8.5 Bimetel en disco

Los bimetales en forma de disco, figura 13, proporcionan protección de motores y aplicaciones eléctricas sencillas a costo reducido, por lo que se han vuelto muy populares.

Este bimetel es pretensado mediante el encintado o abovedado. Con un aumento de la temperatura, las tensiones térmicas producidas debido a la acción del bimetel

alcanzan un punto en el que igualan a los esfuerzos del pretensado. En este punto el disco se cambia de forma al cóncavo opuesto. Al enfriarse la acción inversa sucede a una temperatura más baja. Las temperaturas de ajuste superior e inferior dependen de la geometría del disco.

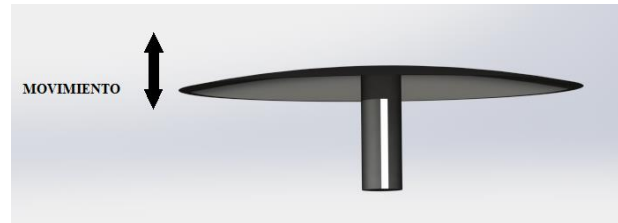


Figura 13. Renderizado de bimetálico en forma de disco.

La selección de la forma del bimetálico al diseñar dispositivos termostáticos dependerá en gran medida de la deflexión requerida, fuerza requerida, espacio disponible, peso muerto del bimetálico, esfuerzos permisibles, volumen mínimo del bimetálico, costo, presión y fuerzas externas como la fricción.

Su deflexión térmica puede calcularse mediante:

$$B = \frac{0.106F (T_2 - T_1)(D^2 - d^2)}{t} \quad (33)$$

Su fuerza mecánica (fuerza requerida para causar una deflexión mecánica) puede calcularse mediante:

$$P = \frac{64EBwt^3}{(De^2 - di^2)} \quad (34)$$

Su fuerza térmica (fuerza desarrollada si el bimetálico está completamente restringido) puede calcularse mediante:

$$P = 6.78EF (T_2 - T_1)t^2 \quad (35)$$

## 2.9. CONSIDERACIONES METALÚRGICAS

El coeficiente de expansión térmica (CET) es usualmente definido como el incremento fraccional en longitud por unidad de aumento de temperatura. La definición exacta varía dependiendo si se especifica a una temperatura precisa (coeficiente verdadero de expansión térmica) o en un rango de temperaturas (coeficiente de expansión térmica promedio). El coeficiente verdadero está relacionado con la pendiente de la tangente de la gráfica longitud-temperatura, mientras que el coeficiente promedio se rige por la pendiente de la cuerda entre dos puntos en la curva [17].

Y aunque el CET es la propiedad básica que gobierna el comportamiento del metal termostático, ésta es una función de la química de la aleación, por lo que las propiedades mecánicas como la resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad juegan también un papel importante en determinar el comportamiento del elemento termostático [17]. Durante su tiempo de funcionamiento los elementos termostáticos deben mantener su forma bajo los esfuerzos generados por los cambios de temperatura, así como los generados por cargas mecánicas externas. Varias propiedades son críticas para un correcto funcionamiento del elemento termostático a lo largo de su vida útil, esto es reaccionar a los cambios de temperatura dentro de los tiempos especificados por diseño en el caso de los disyuntores. Los esfuerzos cíclicos de origen mecánico y térmico pueden disminuir el tiempo de vida de un elemento bimetálico. Cuando se aplican esfuerzos cíclicos a un material, aunque éstos no causen deformación plástica, el material puede fallar debido a la fatiga. La falla por fatiga se modela típicamente descomponiendo las tensiones cíclicas en componentes medios y alternos. El estrés medio es el promedio de tiempo del estrés principal. La definición de estrés alterno se define como la diferencia entre el estrés mínimo y máximo, o la diferencia entre el estrés medio y máximo [18]. Estos esfuerzos pueden causar cambios en la calibración del elemento al igual que los esfuerzos residuales, los cuales son esfuerzos que permanecen en un material sólido después de haber eliminado la causa original de estos esfuerzos [19], y aunque éstos pueden llegar a ser deseables en algunas aplicaciones en este caso éstos pueden hacer que el metal termostático falle. Los esfuerzos residuales pueden ocurrir a través de una variedad de mecanismos que incluyen deformaciones inelásticas

(plásticas), gradientes de temperatura (durante el ciclo térmico) o cambios estructurales (transformación de fase).

Debido a lo anterior las propiedades que son normalmente monitoreadas en proceso de fabricación de los metales termostáticos incluyen al tamaño de grano, dureza, límite elástico, resistencia a la tracción y elongación. Además, la vida útil de estos elementos dependerá de la ductilidad del metal termostático, su tamaño de grano, de los esfuerzos mecánicos y térmicos y del ambiente. Adicionalmente, los esfuerzos presentes antes del ciclado y los que sean generados o liberados durante el ciclo también son importantes [9].

El tamaño de grano es controlado mediante el proceso de rolado y recocido del bimetálico, procesos como el rolado angular de canal es usado para producir granos finos que mejoran las propiedades mecánicas de los metales, aumentando la resistencia a la tracción y el límite elástico [20].

## **2.10. MANUFACTURA**

El método más usado para la manufactura de bimetálicos utiliza un proceso de unión en frío que puede usarse en gran cantidad de materiales incluso en los que no pueden unirse por métodos tradicionales de fusión [16]. Este método, conocido como soldadura por rolado en frío, unión por rolado frío, laminado en frío o revestimiento de hoja mediante rolado; requiere que las superficies estén completamente limpias y separadas por una distancia interatómica [21].

El proceso, tal como lo muestra la figura 14 comienza colocando las hojas de metal una sobre otra y pasándolas a través de un par de rodillos que producen una reducción substancial y simultánea que permite una unión sólida. Ya que una perfecta limpieza en los materiales es simplemente no lograda, la presión usada debe ser lo suficientemente grande para lograr una unión satisfactoria [21].

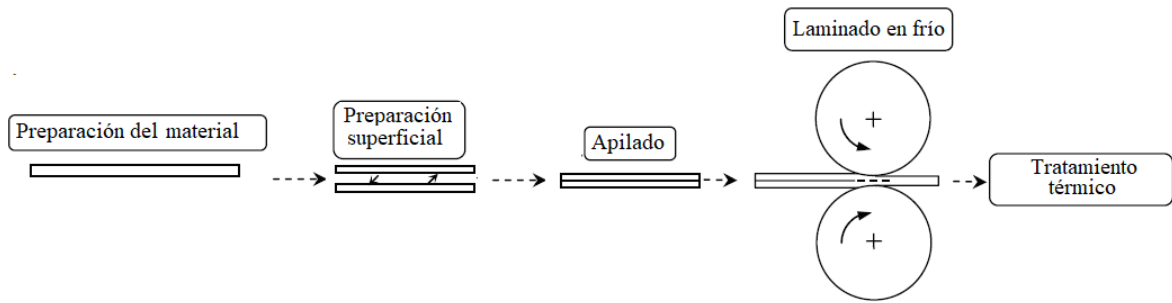


Figura 14. Ilustración del principio del laminado en frío.<sup>9</sup>

Durante el proceso de unión, se produce una reducción del espesor de los materiales de hasta un 50% debido a la alta presión de los rodillos [21]. Esta reducción de espesor de los materiales que serán unidos produce una gran cantidad de calor y crea superficies vírgenes en ellos. La unión, normalmente mecánica, de las capas compuestas es por lo tanto obtenida por la afinidad mecánica y atómica interfacial de los dos metales. Generalmente un tratamiento de recocido es realizado después del rolado para incrementar la fuerza de la unión ya que se producirá una fuerte unión metalúrgica en la interface original de los metales [22]. Este tratamiento varía desde 50 °C hasta 900 °C dependiendo del metal utilizado [23].

Una vez realizado el tratamiento térmico, el bimetálico puede ser procesado por cualquier método de manufactura convencional para lograr la forma y tamaño deseados. Finalmente se marcan en el bimetálico el lado de alta o baja expansión de acuerdo a la especificación requerida.

Como ya se mencionó anteriormente para lograr una unión satisfactoria de los metales es esencial remover las capas de materiales entre los metales a unirse, las cuales se componen de óxidos, iones de azufre, fósforo y oxígeno, grasa, humedad y polvo. Existen tres métodos principales de limpieza [24]: (a) Limpieza química, (b) Limpieza mecánica y (c) Establecer una capa superior frágil.

<sup>9</sup> Long L., Kotobu N., Fuxing Y. (2008). Progress in Cold Roll Bonding of Metals. 1-2. doi:10.1088/1468-6996/9/2/023001

## 2.11. APLICACIONES

Actualmente, los usos para los metales termostáticos van desde aplicaciones industriales hasta el sector automotriz y aeroespacial. Sus principales bondades son su bajo peso, pequeño tamaño y robustez, además de no requerir de energía externa o campos magnéticos para funcionar.

Los bimetales termostáticos tienen gran variedad de aplicaciones entre las que destacan:

- Medición de temperatura
- Compensación (normalmente para temperatura ambiente)
- Control de cualquier parámetro vs. temperatura
- Aplicaciones termo-mecánicas donde el calor se convierte en energía mecánica.

### 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DE CALIBRACIÓN

El método de calibración o 'pull in' como se conoce a esta parte del proceso de Sensata Technologies consiste en suministrar el 200% de corriente nominal con ayuda de un equipo construido especialmente para este propósito al disyuntor mientras se introducen dos tornillos de calibración, de modo que éstos empujen el bimetálico hasta hacer que éste libere el botón del dispositivo empujando el componente que libera el mecanismo que abre el circuito el cual se conoce como connecting plate y compensador. Los principales componentes internos del disyuntor se muestran en la figura 15.

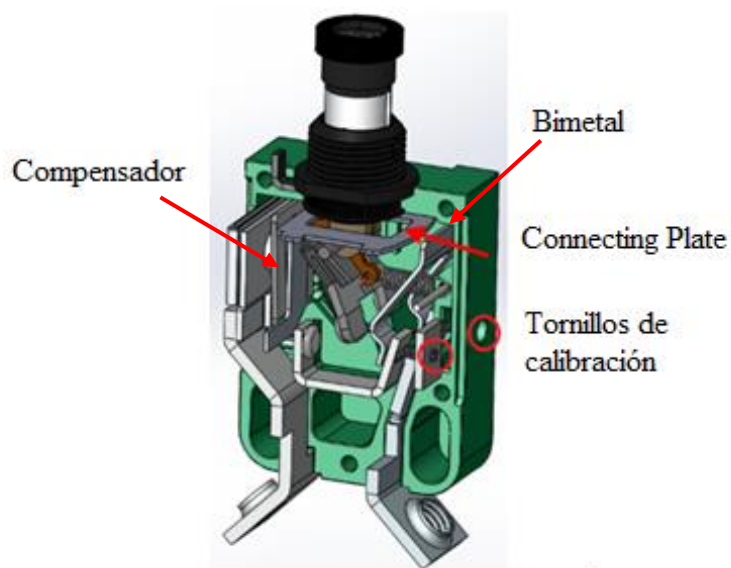


Figura 15. Representación de disyuntor 3TC7 de Sensata Technologies con los componentes involucrados en la calibración de éste.

El dispositivo 3TC7 se colocó en un nido de acero, como lo muestra la figura 16, para posteriormente mediante el uso de bimanuales dos electrodos de cobre hagan contacto en ambas terminales y cierren el circuito.

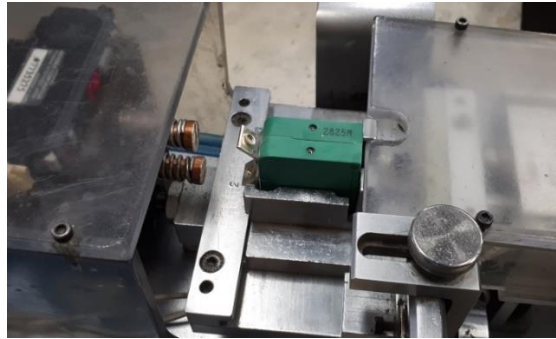


Figura 16. Disyuntor colocado en dispositivo de prueba antes de activar bimanuales.

Posteriormente se suministraron 70 Amperes de corriente para comenzar la calibración. El operador procedió a rotar ambos tornillos de calibración a la vez para empujar al bimetálico del disyuntor hacia el mecanismo de liberación del botón y así abrir el circuito eléctrico, como se muestra en la figura 17. Esta acción debe realizarse en un tiempo de entre 38 y 41 segundos para asegurar que el disyuntor quede calibrado para abrir antes dentro del 115 a 138% de corriente y dentro de los 55 segundos al 200% de corriente según la especificación de funcionamiento.

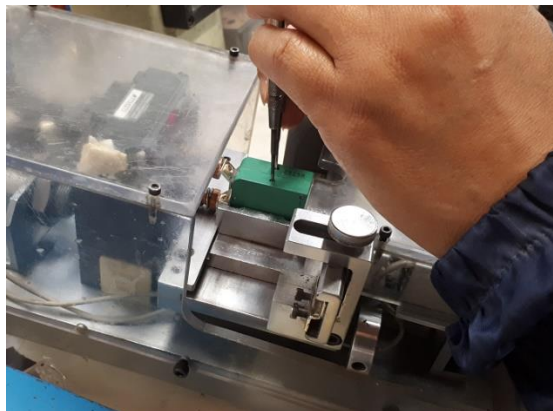


Figura 17. Operador apretando tornillos de calibración para calibrar disyuntor.

Si el disyuntor no abre dentro de la ventana de tiempo de 38 a 41 segundos el operador deberá modificar la distancia de los tornillos de calibración, y alejar el bimetálico del mecanismo de apertura del botón en caso de que el dispositivo abra antes de 38 segundos, o apretarlos para acercarlo al bimetálico en caso de que el disyuntor abra después de 41 segundos. En ambos casos el operador deberá retirar el disyuntor del nido y dejarlo



enfriar por 3 minutos dentro de una cabina que inyecta aire a presión, la cual se muestra en la figura 18, antes de intentar nuevamente.



Figura 18. Cabina enfriadora de disyuntores.

Una vez calibrado el disyuntor, éste se sometió a una prueba eléctrica funcional conocida como ratecheck. En esta prueba el disyuntor es conectado a una corriente eléctrica de 43.05 Amperes por 60 minutos, donde éste deberá mantenerse cerrado (prueba de hold), después la corriente se aumenta a 46.55 Amperes y el disyuntor debe abrir cortando el flujo de corriente. (Prueba de trip).

### 3.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL DISYUNTOR

Para este caso de estudio, se caracterizó el bimetálico utilizado en dispositivos Klixon 3TC7 construidos por Sensata Technologies. Estos son dispositivos ligeros utilizados en aplicaciones aeroespaciales y eléctricas. Este dispositivo puede interrumpir un circuito de 6,000 A a 30 VDC o 3,500 A a 120 VAC [25]. Existen en rangos de 5 a 35 Amperes, pero el presente estudio caracterizó el bimetálico de 35 Amperes debido a que es uno de los dispositivos con mayor demanda. La figura 19 muestra un disyuntor 3TC7.



Figura 19. Dispositivo 3TC7.

Este dispositivo debe interrumpir el flujo de corriente ante una sobrecarga en los tiempos mostrados en la tabla 3:

TABLA 3  
Tiempos de apertura de dispositivo 3TC7

200%	400%	600%
15 - 55 sec	2.0 - 7.0 sec	1.0 - 3.5 sec

Es decir, a 200% de la corriente nominal del dispositivo éste deberá abrir entre 15 y 55 segundos. A 400% de la corriente nominal deberá abrir entre 2 y 7 segundos y a 600% de la corriente nominal abrirá entre 1 y 3.5 segundos. La figura 20 muestra la curva tiempo corriente de un disyuntor 3TC7.

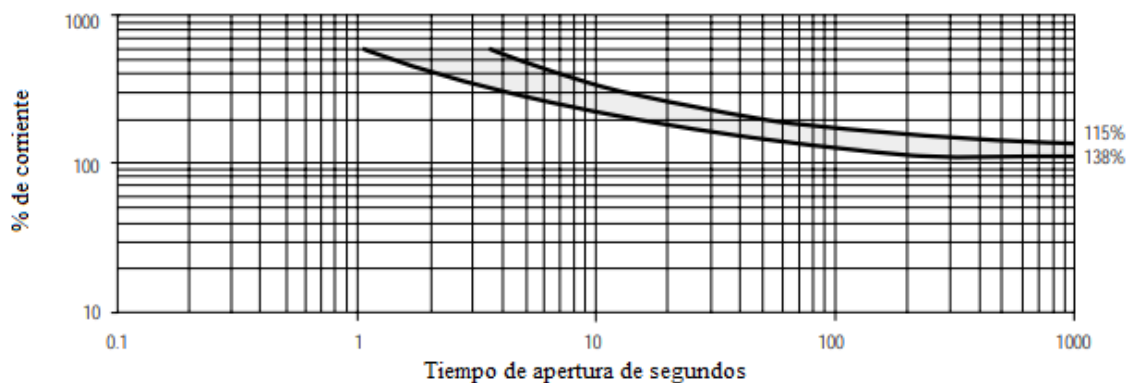


Figura 20. Curva tiempo-corriente aproximada de un disyuntor 3TC. <sup>10</sup>

El elemento termostático que permite a los dispositivos funcionar (Fig. 21), consiste en una aleación que consta de 36.1% de aleación P (72% Mn, 18% Cu, 10% Ni) para el lado de alta expansión, 32% de aleación 10 (36% Ni, 64% Fe) para el lado de baja expansión, y 32% de cobre CDA 107 en su capa central, esta aleación es conocida comercialmente como P35R [26].

Esta aleación tiene una gran flexividad y una baja resistencia eléctrica gracias a la capa central de cobre.

<sup>10</sup> <http://www.flamecorp.com/PDF/Sensata/Aircraft%20Circuit%20Breakers/3TC7.pdf>

Sus propiedades termostáticas y físicas son las siguientes:

Flexividad ASTM (50 – 200 °F)	$200 \times 10^{-7}$ (in/in)/°F
Flexividad ASTM (100 – 300 °F)	$190 \times 10^{-7}$ (in/in)/°F
Curvatura específica (10-93°C)	$36.0 \times 10^{-6}$ (mm/mm)/°C
Curvatura específica (38-149°C)	$34.2 \times 10^{-6}$ (mm/mm)/°C
Rango máximo de sensibilidad térmica	0 a 400 °F (-20 a 200 °C)
Rango de temperatura para deflexión útil	-100 a 500 °F (-70 a 260 °C)
Temperatura máxima recomendada	700 °F (370 °C)
Resistividad eléctrica a 75°F (24 °C)	0.053 a 0.063 $\mu\text{ohms-m}$
Densidad	0.291 Lb/in <sup>3</sup> (8.05 g/cm <sup>3</sup> )
Módulo de elasticidad (E)	131 GPa

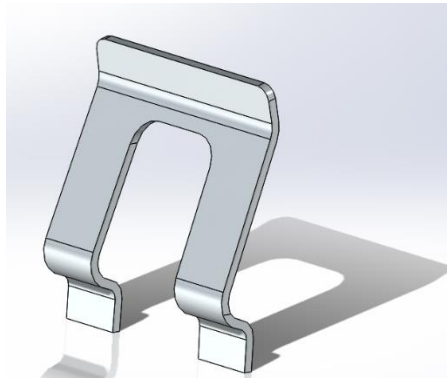


Figura 21. Bimetal de dispositivo 3TC7.

La forma irregular de este bimetálico hace que ninguna de las fórmulas estándar para la obtención del desplazamiento pueda aplicarse, por lo que su desplazamiento se obtendrá experimentalmente.

Además del bimetálico mencionado, el disyuntor lleva otro elemento termostático conocido como compensador, el cual tiene la función como su nombre lo dice de compensar las variaciones de temperatura ambiente que pudieran causar cambios en los tiempos de apertura del dispositivo. Al flexionarse el compensador al ser calentado por el flujo de corriente y la temperatura ambiente éste se alejará del connecting plate, haciendo que la apertura del botón requiera más tiempo.

El compensador, mostrado en la figura 22, consiste de una aleación que consta de aleación P (72% Mn, 18% Cu, 10% Ni) para el lado de alta expansión y 32% de aleación 10 (36% Ni, 64% Fe) para el lado de baja expansión, su nombre comercial es P675R [27].

Esta aleación tiene una gran flexividad y una baja resistencia eléctrica gracias a la capa central de cobre.

Sus propiedades termostáticas y físicas son las siguientes:

Flexividad ASTM (50 – 200 °F)	$217 \times 10^{-7} \text{ (in/in)/}^\circ\text{F}$
Flexividad ASTM (100 – 300 °F)	$211 \times 10^{-7} \text{ (in/in)/}^\circ\text{F}$
Curvatura específica (10-93°C)	$39.0 \times 10^{-6} \text{ (mm/mm)/}^\circ\text{C}$
Curvatura específica (38-149°C)	$38 \times 10^{-6} \text{ (mm/mm)/}^\circ\text{C}$
Rango máximo de sensibilidad térmica	0 a 400 °F (-20 a 200 °C)
Rango de temperatura para deflexión útil	-100 a 500 °F (-70 a 260 °C)
Temperatura máxima recomendada	800 °F (370 °C)
Resistividad eléctrica a 75°F (24 °C)	1.07 a 1.18 $\mu\text{ohms-m}$
Densidad	0.275 Lb/in <sup>3</sup> (7.61 g/cm <sup>3</sup> )
Módulo de elasticidad (E)	131 GPa

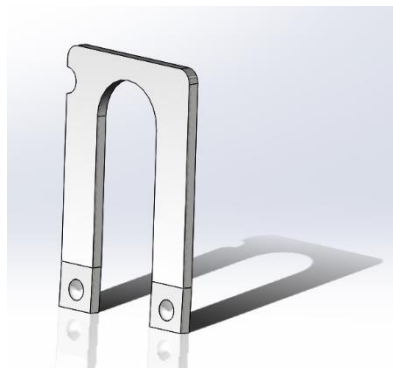


Figura 22. Compensador de dispositivo 3TC7.

### 3.3. DESCRIPCIÓN OPERATIVA DEL DISYUNTOR

El disyuntor se mantiene cerrado gracias a la acción de un componente de enclave que se sujeta al ensamble del compensador, haciendo que los contactos internos del dispositivo queden en contacto y por lo tanto permitiendo el paso de corriente.

Al aplicar corriente eléctrica y por lo tanto calentando el disyuntor, el bimetálico se flexionará empujando el connecting plate y éste a su vez empujará el compensador haciendo que el componente de enclave se libere si la flexión es lo suficientemente pronunciada, separando los contactos. Se debe considerar como ya se mencionó que el compensador es también un elemento termostático al igual que el bimetálico por lo que éste se flexionará ligeramente haciendo que el connecting plate requiera de más desplazamiento para hacer contacto con él.

La figura 23 muestra gráficamente el proceso de desenclavado del botón y la consiguiente interrupción del flujo de corriente eléctrica.

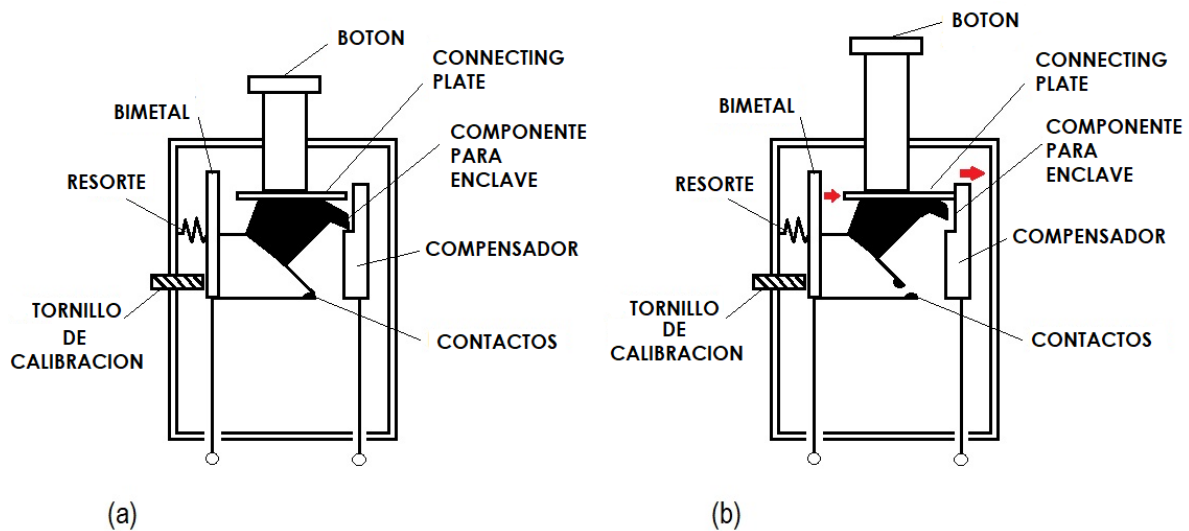


Figura 23. Disyuntor cerrado (a) y abierto por acción del paso de corriente eléctrica (b).

### 3.4. MODIFICACIÓN DE DISYUNTOR

Para poder realizar el análisis de movimiento del bimetálico del disyuntor 3TC7, se realizó un diseño para la modificación de las cubiertas superiores de éstos, maquinando una abertura que permitiera ver el bimetálico sin afectar a los demás componentes internos del disyuntor, figura 24.

La ventana en los disyuntores permitió visualizar el movimiento del bimetálico una vez sometido a corriente eléctrica.

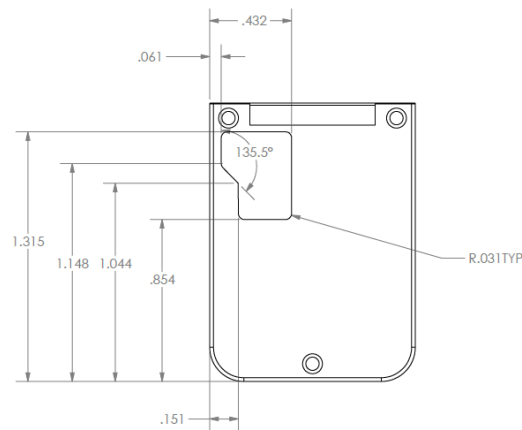


Figura 24. Dimensiones de corte realizado en cubierta superior de disyuntor.

### 3.5. EQUIPO PARA SUMINISTRO DE CORRIENTE

Para suministrar 70 Amperes al disyuntor se utilizó un equipo de prueba eléctrica que suministra corriente eléctrica por el tiempo indicado por el usuario. Este equipo fue diseñado y construido en Sensata Technologies Aguascalientes para realizar pruebas eléctricas a los diferentes dispositivos manufacturados en la planta. Este equipo se muestra en la figura 25.

Consta de un banco donde cada dispositivo es conectado a dos cables por los que se suministra la corriente. Los cables usados son calibre 10 de 22" de largo de acuerdo a las especificaciones de la AWG (American wire gauge), el cual tiene un diámetro de 0.1019" con una resistividad de 3.27 Ohms por km [28] de acuerdo a la especificación MIL-C-5809 que regula los requerimientos generales de los disyuntores para uso en aeronaves [11].



Figura 25. Banco de trabajo para suministro de corriente.

La corriente fue suministrada por una fuente Agilent 6690A con capacidad de trabajo de 0 a 15 Volts y 0 a 440 Amperes y de corriente directa, la cual es calibrada periódicamente en la planta de Sensata tal como se ilustra en la figura 26.



Figura 26. Viñeta de calibración de fuente.

La fuente Agilent 6690<sup>a</sup> mostrada en la figura 27 cuenta con una precisión de 0.04% v y 0.1% A a 25 +/- 5 °C de acuerdo a las especificaciones del fabricante.



Figura 27. Fuente Agilent 6690A para suministro de corriente.

El equipo de prueba consta de una interface con el usuario donde este selecciona la corriente necesaria para las pruebas experimentales. Mostrada en la figura 28.

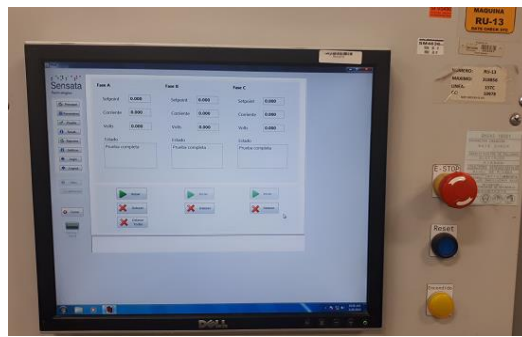


Figura 28. Pantalla de equipo de prueba.

Para realizar el presente estudio se cargó un nuevo modelo de prueba para suministrar los 70 Amperes requeridos y realizar el análisis del movimiento del bimetálico.

### 3.6. MICROSCOPIO DIGITAL

Para medir el desplazamiento del bimetálico se utilizó un microscopio digital U500X de la marca CoolingTech mostrado en la figura 29. Sus especificaciones son las siguientes:

Sensor de imagen CMOS

Control de velocidad

Enfoque de 15mm a 40mm

Software para procesamiento de imágenes

Resolución de video de 0.3 M

Iluminación integrada con ajuste manual

Resolución de imágenes de 640\*480

Zoom digital de 5X



Figura 29. Microscopio digital U500x.



### 3.7. ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

El microscopio digital fue sometido a un estudio de repetibilidad con el fin de evaluar su confiabilidad para la realización del presente estudio. Se utilizaron 10 piezas (ajenas al disyuntor evaluado en este estudio), 3 operadores y 2 repeticiones para realizar el estudio GR&R. La repetibilidad del equipo de medición es la variación en las lecturas obtenidas con el equipo usado varias veces en la misma parte, también se conoce como variación del equipo. La reproducibilidad es la variación en el promedio de las mediciones hechas por operadores distintos usando el mismo equipo de medición al medir características idénticas en las mismas partes, también se conoce como variación del operador [29].

El componente analizado se conoce como contact spring y es utilizado en disyuntores 6TC65 de Sensata Technologies. Éste fue seleccionado debido a las dimensiones similares con los desplazamientos analizados en el presente estudio (Fig. 30).

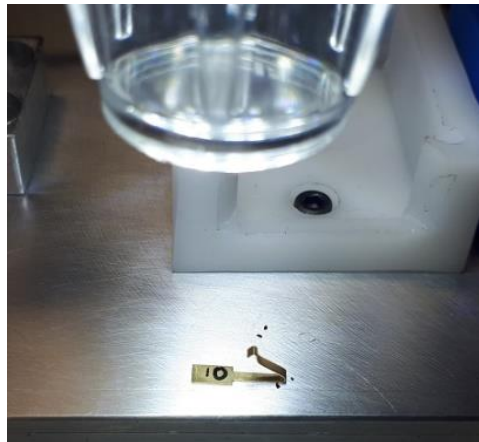


Figura 30. Componente siendo fotografiado por microscopio digital.

Para realizar el estudio se enumeraron 10 muestras, las cuales fueron medidas por tres personas diferentes de manera aleatoria. Este procedimiento se realizó 2 veces.

### 3.8. FIXTURE PARA PRUEBA

Con el propósito de realizar la prueba para la caracterización del bimetálico del dispositivo 3TC7, se diseñó y construyó un fixture que permitiera sostener la pieza bajo prueba,

evitando así movimiento no deseado en ella y asegurando que el microscopio digital estuviera siempre en la misma posición.

El fixture de prueba fue diseñado usando el software SolidWorks 2017 (Fig. 31). Éste consta de una base de aluminio 6061, un soporte de aluminio 6061 para el microscopio digital, un nido y un soporte de nylamid y un clamp destaco 205-U.

El propósito del clamp es mantener el disyuntor fijo y evitar que éste pueda levantarse debido a la acción de los cables de prueba que se conectan en ambas terminales.

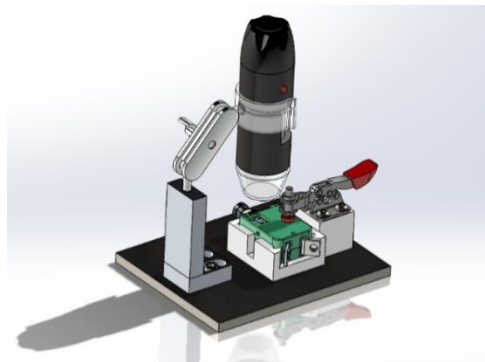


Figura 31. Modelo 3D de fixture para prueba eléctrica de dispositivo 3TC7.

### 3.9. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para obtener la temperatura en los bimetales, se usó un termómetro infrarrojo Amprobe IR-730 (Fig 32). Este dispositivo cuenta con un rango de medición de temperatura de -26 °F a 2282 °F y un error de +/- 0.5% de acuerdo a las especificaciones del fabricante.



Figura 32. Termómetro infrarrojo Amprobe IR-730. <sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> <https://www.amprobe.com/product/ir-730/>

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

Se midió el ancho de 10 componentes contact spring (Fig. 33) con límites de 0.104" (2.641mm) a 0.108" (2.743 mm) como muestra la figura 30. Se utilizó una pieza fuera de especificación (2.79 mm), para demostrar su correcta diferenciación de los demás contact springs. Estas dimensiones fueron validadas usando un cabezal de medición Keyence IM6225 calibrado por el departamento de calibración de Sensata Technologies.



Figura 33. Componente y dimensión evaluados para estudio GR&R.

Los componentes evaluados fueron medidos usando el microscopio digital CoolingTech y analizados usando el software proporcionado por CoolingTech para el dimensionado de imágenes (Fig. 34). Este software se instaló en la computadora de control de la fuente eléctrica. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos por un operador.

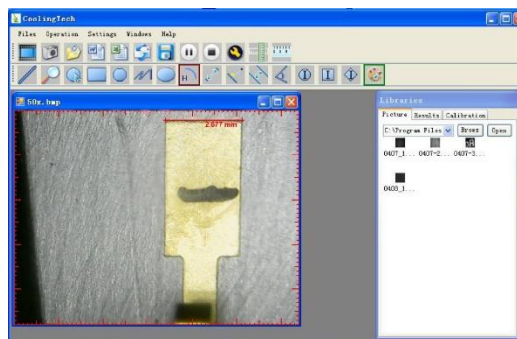


Figura 34. Ejemplo de dimensionado realizado en software del componente a evaluar.

TABLA 4

Medidas obtenidas por operador.

Muestra	Medidas operador 1	Medidas operador 2	Medidas operador 3	Medidas Operador 1 (segunda vuelta)	Medidas Operador 2 (segunda vuelta)	Medidas Operador 3 (segunda vuelta)
1	2.799	2.801	2.798	2.799	2.798	2.795
2	2.646	2.646	2.648	2.652	2.652	2.664
3	2.647	2.631	2.632	2.632	2.639	2.642
4	2.662	2.662	2.664	2.663	2.670	2.668
5	2.664	2.662	2.663	2.668	2.663	2.661
6	2.662	2.661	2.661	2.664	2.662	2.662
7	2.662	2.664	2.665	2.667	2.662	2.668
8	2.646	2.662	2.669	2.669	2.663	2.663
9	2.678	2.677	2.669	2.667	2.669	2.662
10	2.678	2.669	2.672	2.673	2.672	2.676
desv. std	0.0429	0.0441	0.0428	0.0427	0.0420	0.0404

Los resultados obtenidos se analizaron con el software Minitab 18, arrojando los datos mostrados en la tabla 5.

TABLA 5

Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad.

Fuente	Desviación Std	% de Tolerancia
Total G R&R	0.0048368	28.45
Repetibilidad	0.0048368	28.45
Reproducibilidad	0	0
Operadores	0	0
Parte a parte	0.0445947	262.32
Variación total	0.0448563	263.86
Categorías Distintas	13	

El estudio revela una variación total del sistema de 28.45%, el cual es representado por la suma de la repetibilidad y la reproducibilidad, y un total de 13 categorías distintas que significa que el equipo puede distinguir entre diferentes grupos de piezas. Esto nos indica que el equipo puede discernir correctamente entre partes y que el sistema de medición puede ser aceptado con reservas [29]. Idealmente la variabilidad parte a parte debe

ser la contribución principal de la variación total, tal como lo vemos en este estudio. La figura 35 muestra una comparación entre la reproducibilidad de los operadores.

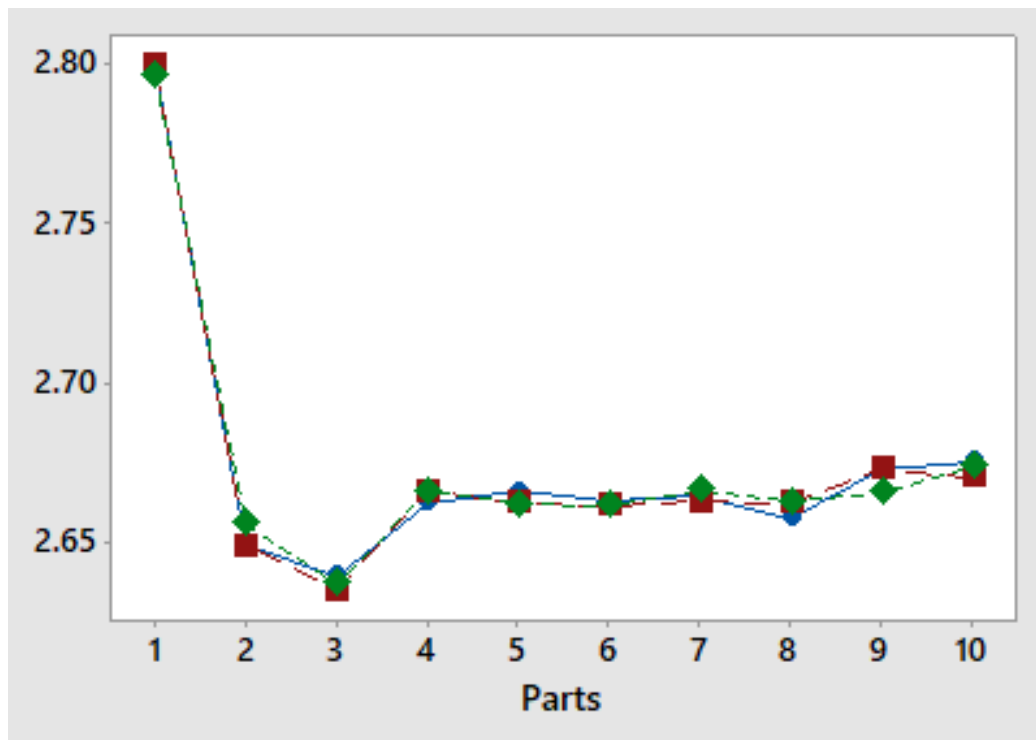


Figura 35. Gráfica de reproducibilidad entre operadores.

## 4.2 FIXTURE DE PRUEBA

El fixture de prueba fue fabricado en el taller de maquinados de Sensata Technologies Aguascalientes utilizando los planos generados y el software de diseño ya mencionado.

Los diseños utilizados para la construcción del fixture se muestran a continuación (Figs. 36-40):

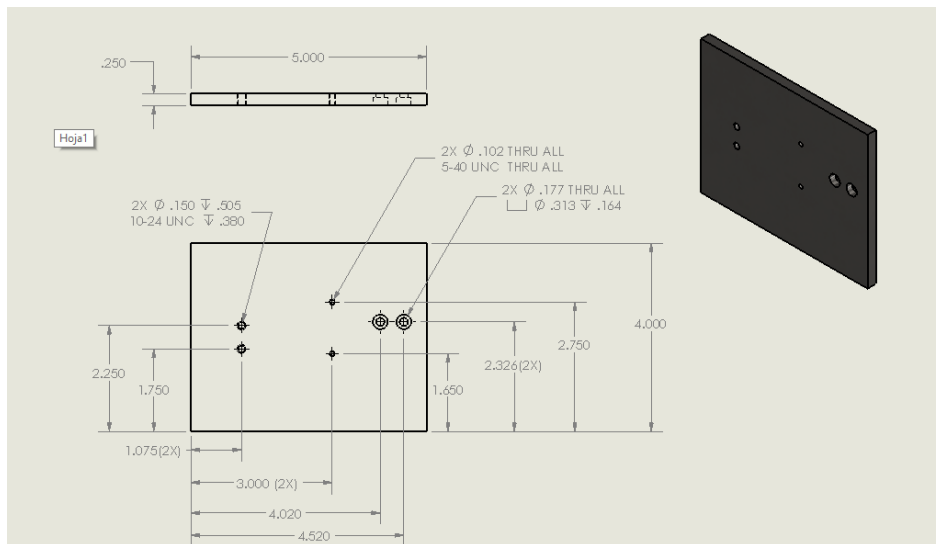


Figura 36. Placa principal de aluminio 6061.

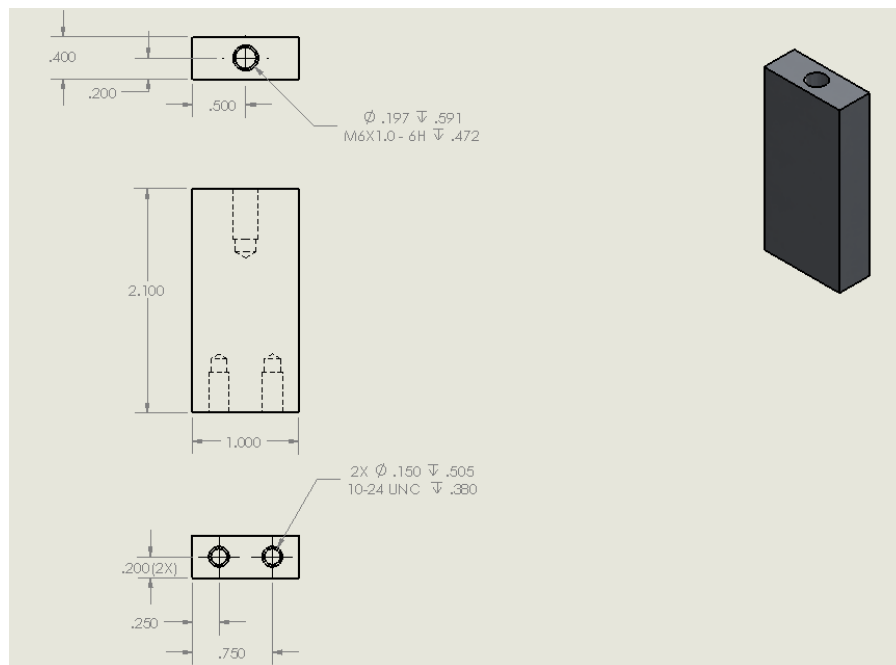


Figura 37. Soporte de microscopio digital de aluminio 6061.

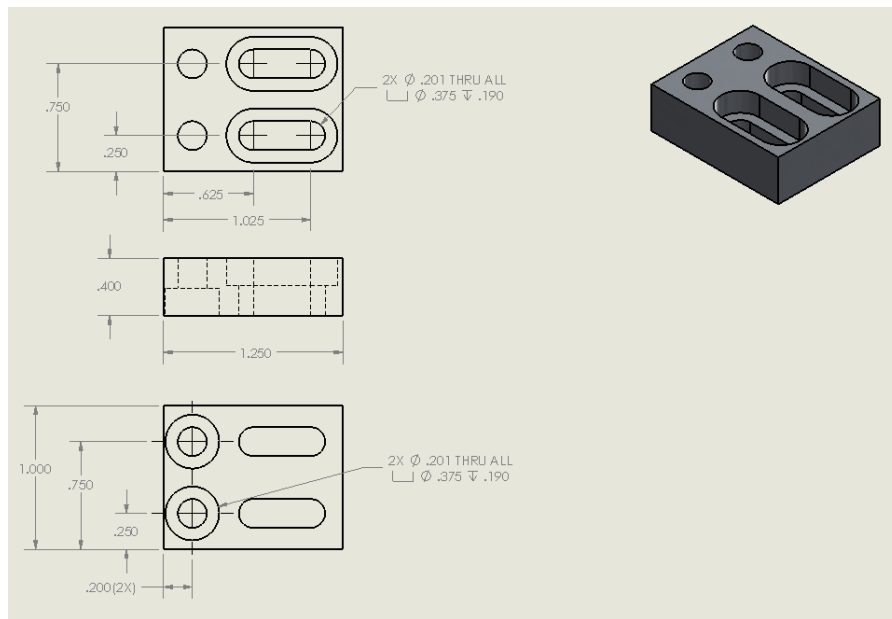


Figura 38. Soporte ajustable de aluminio 6061.

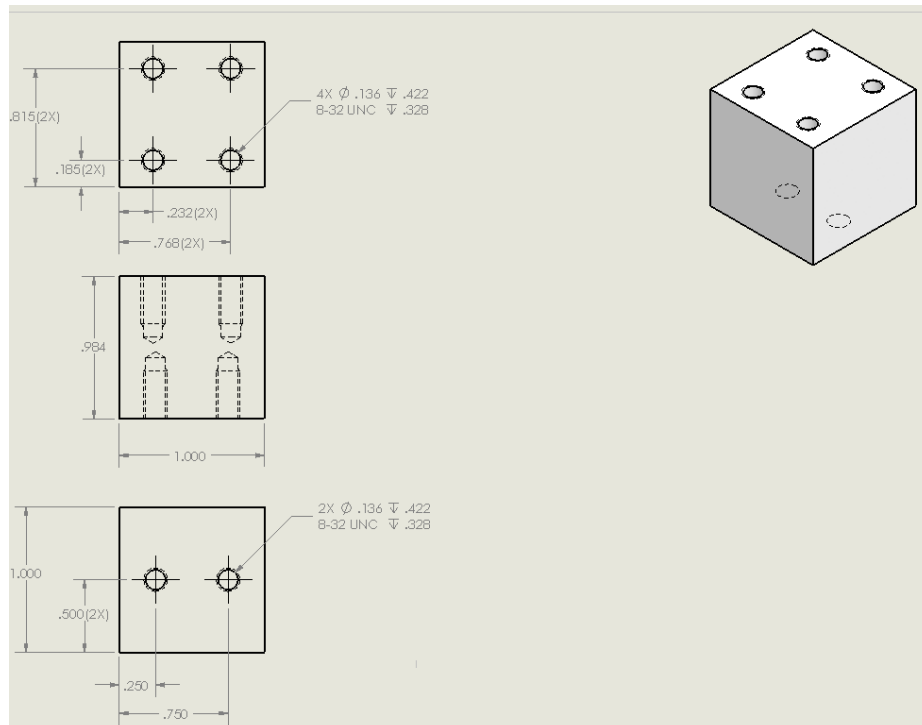


Figura 39. Soporte de nylon para clamp.

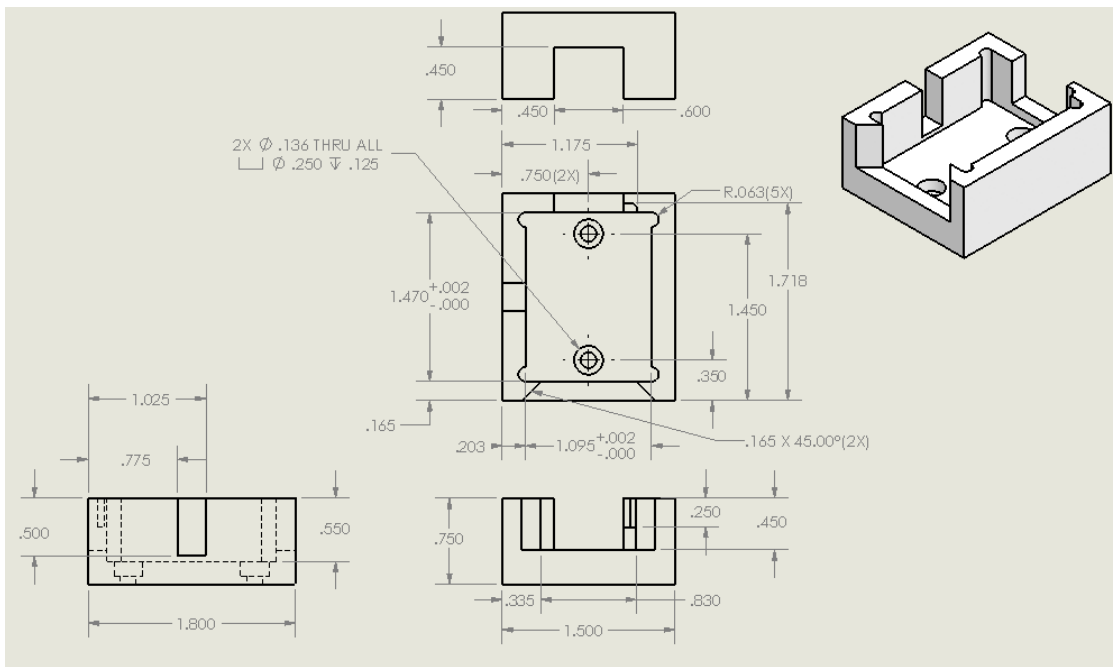


Figura 40. Nido de nylamid para disyuntor.

Una vez fabricados los componentes individuales, el fixture fue ensamblado, el microscopio digital montado y se realizó el ajuste de los componentes para asegurar el correcto centrado del microscopio (Fig. 41).



Figura 41. Fixture de prueba ensamblado.



### 4.3 PRUEBA ELÉCTRICA Y MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE BIMETAL

Diez disyuntores 3TC7-35 fueron modificados de acuerdo con las dimensiones especificadas en el apartado 3.4. (Fig 42). Las bases de éstos fueron maquinadas usando una fresadora estándar para realizar la ventana en el dispositivo.



Figura 42. Disyuntores modificados e identificados.

El detalle de la modificación realizada a cada dispositivo se muestra en la figura 43.



Figura 43. Disyuntor modificado.

Cada disyuntor fue conectado a la fuente de corriente para recibir 70 Amperes por 39.5 segundos, el cual es el promedio de apertura de calibración de 38-41 segundos mencionados en el apartado 3.1.

El disyuntor conectado a la fuente fue colocado en el fixture para poder fotografiar el movimiento del bimetálico asegurando la misma posición entre cada fotografía (Fig. 44).



Figura 44. Disyuntor conectado a fuente eléctrica.

Se tomó una fotografía del bimetálico de cada disyuntor en posición de reposo antes de estar bajo los efectos de la corriente eléctrica y posteriormente se tomó otra fotografía del bimetálico a los 39.5 segundos de estar bajo los efectos de la corriente de 70 Amperes. La figura 45 muestra un ejemplo del proceso de fotografiado. Este tiempo es medido y controlado por el software de control del equipo de suministro de corriente.

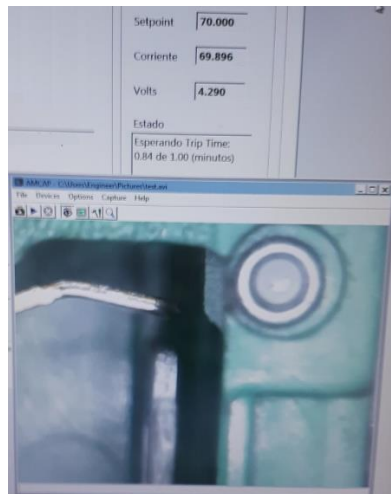


Figura 45. Bimetálico de disyuntor bajo microscopio digital mientras se le suministra corriente eléctrica.

Una vez fotografiados los bimetálicos de los disyuntores se procedió a realizar sus mediciones usando el software CoolingTech. La figura 46 muestra un diagrama de flujo con los procedimientos realizados en el experimento.

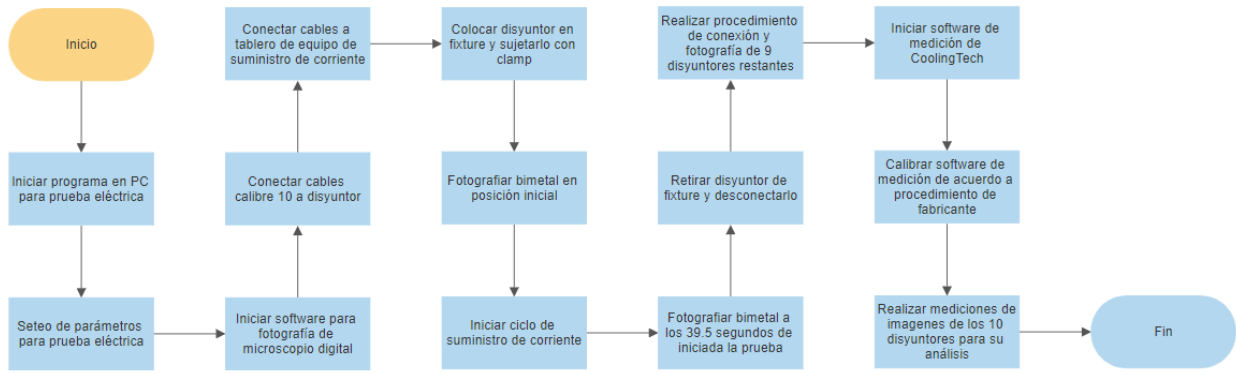


Figura 46. Diagrama de flujo del experimento.

Las mediciones de posición de cada bimetálico se realizaron utilizando el mismo punto de referencia en la base del disyuntor con el fin de conocer la distancia desplazada por el bimetálico una vez suministrados los 70 Amperes de corriente. Las siguientes imágenes muestran las mediciones iniciales y finales del bimetálico de cada disyuntor analizado (Figs. 47-56).

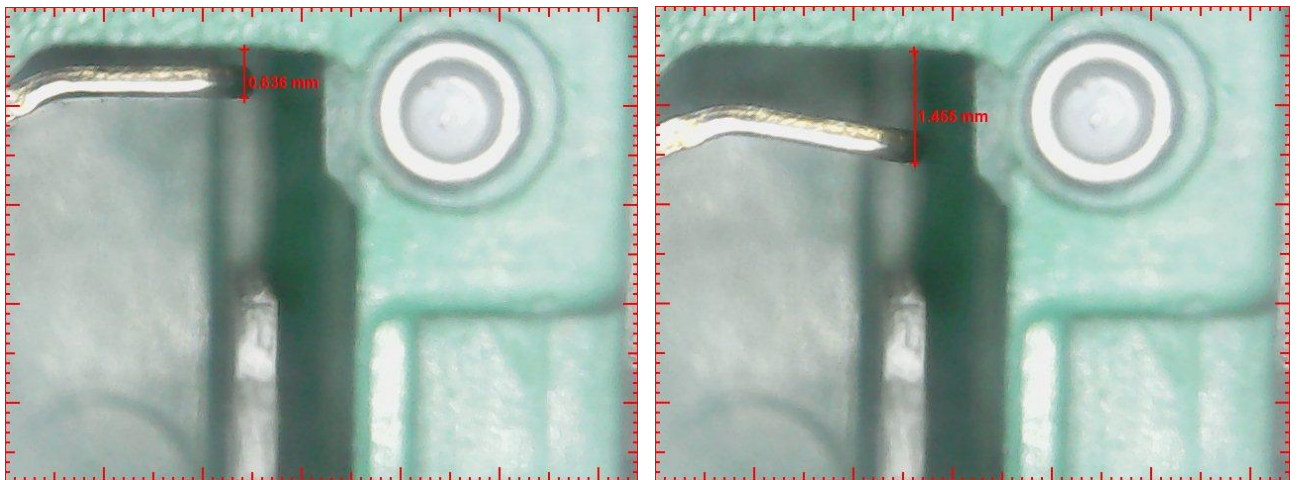


Figura 47. Mediciones de bimetálico de disyuntor 1.

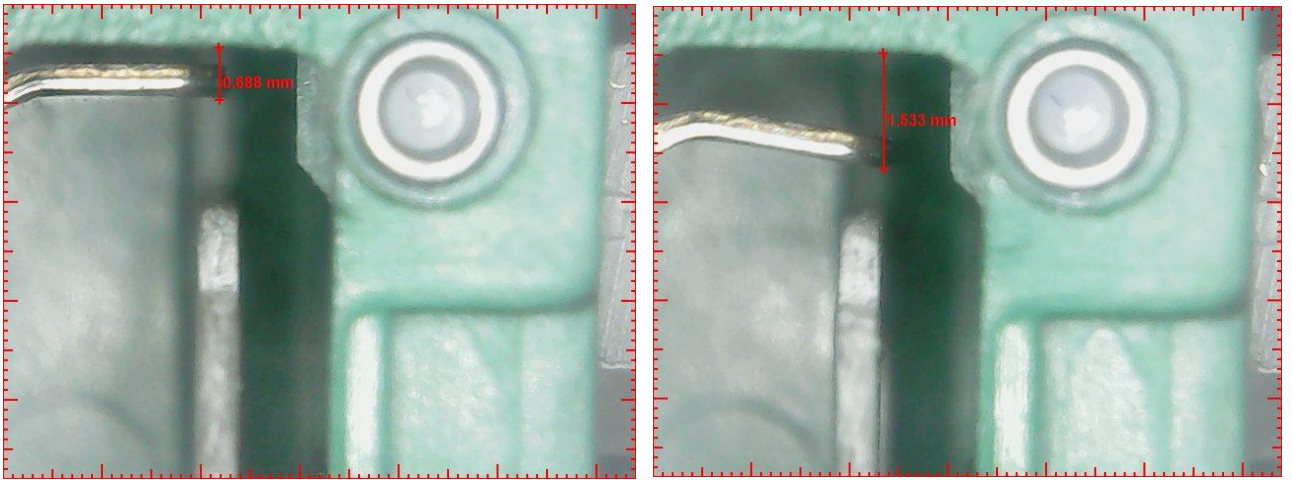


Figura 48. Mediciones de bimetalo de disyuntor 2.

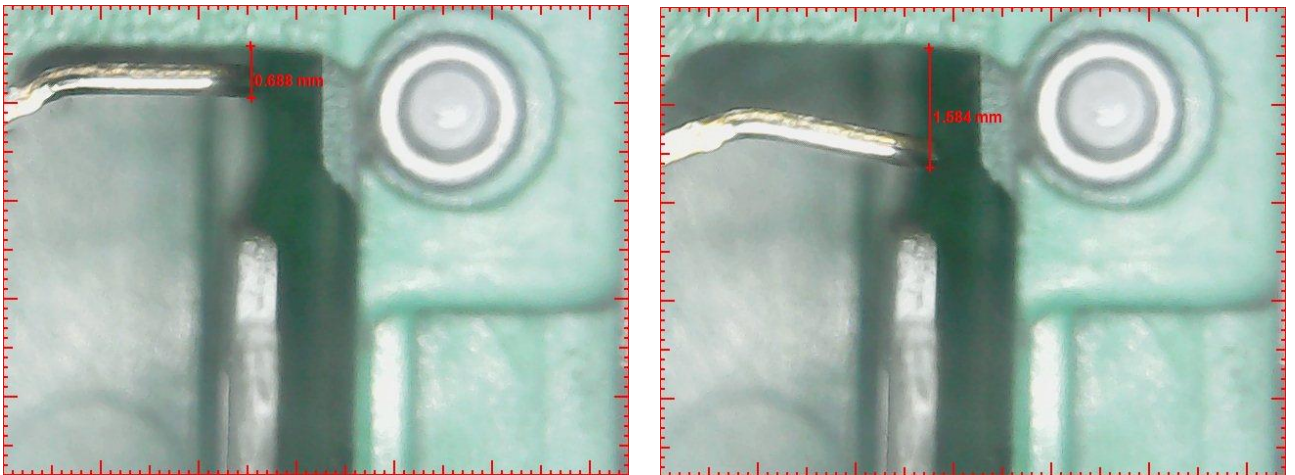


Figura 49. Mediciones de bimetalo de disyuntor 3.

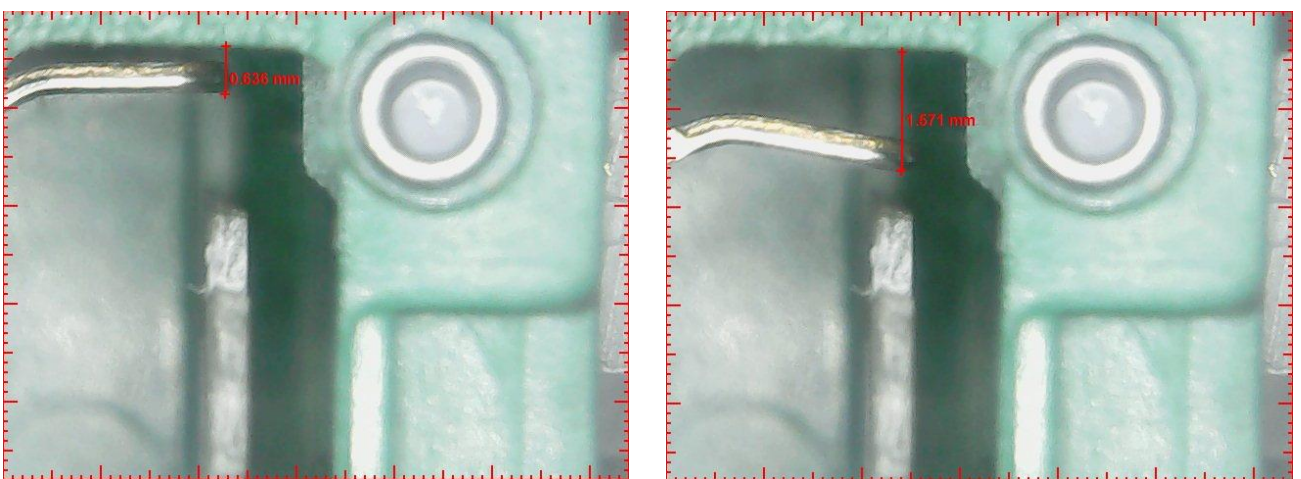


Figura 50. Mediciones de bimetalo de disyuntor 4.

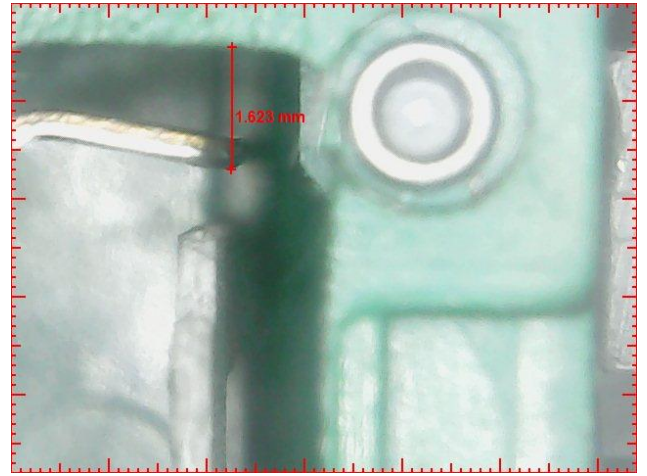
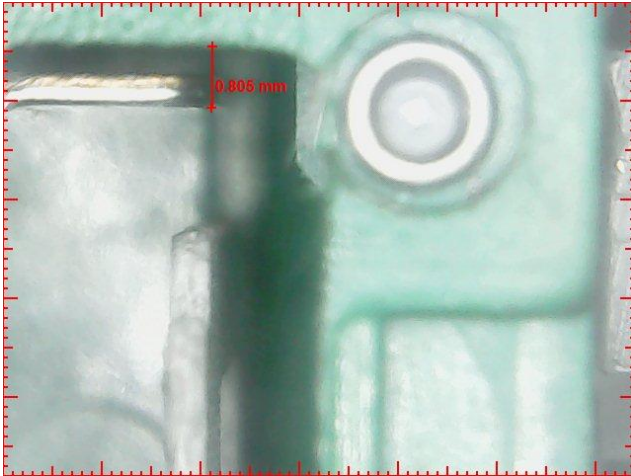


Figura 51. Mediciones de bimetálico de disyuntor 5.

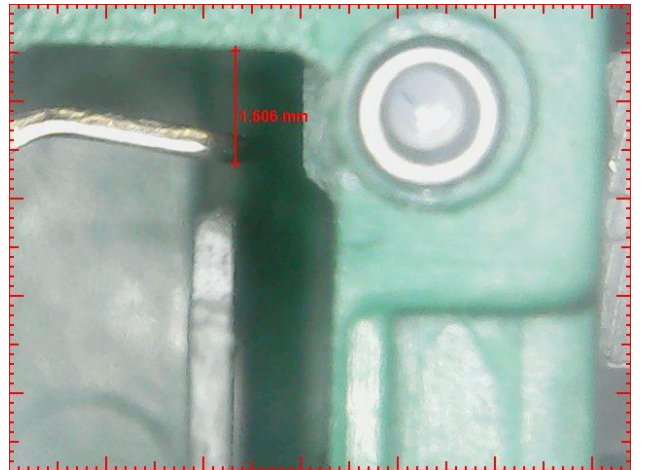
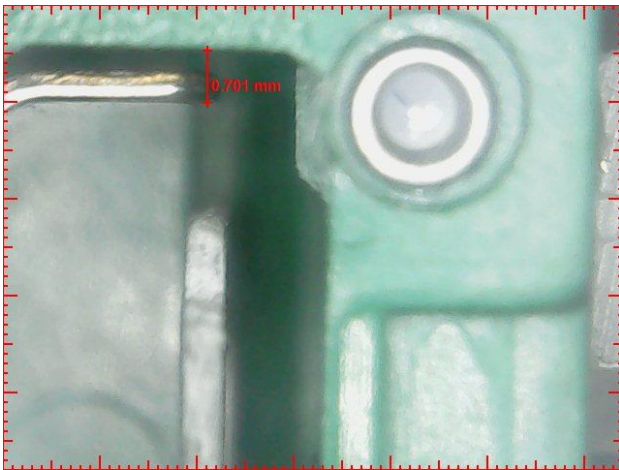


Figura 52. Mediciones de bimetálico de disyuntor 6.

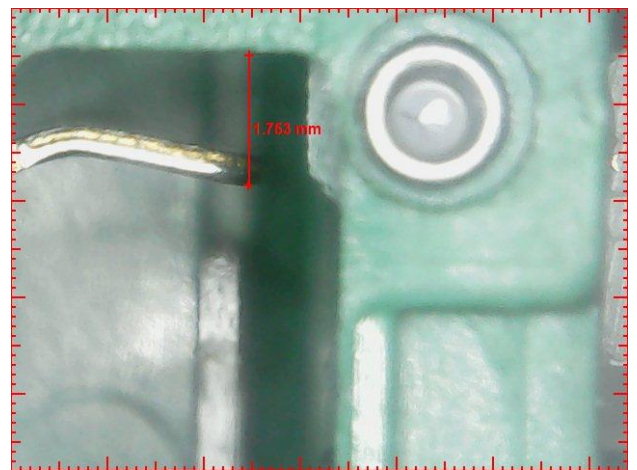
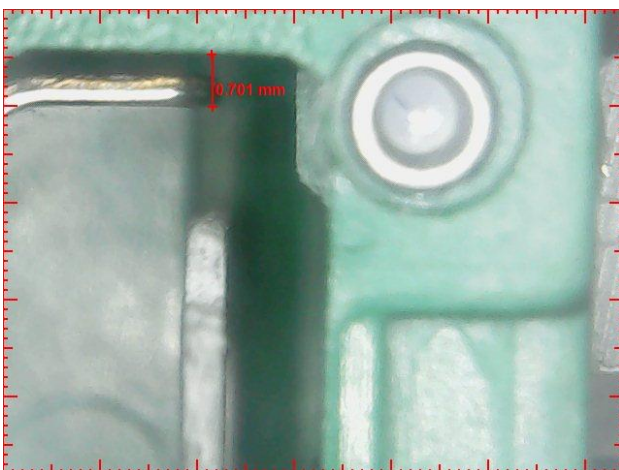


Figura 53. Mediciones de bimetálico de disyuntor 7.

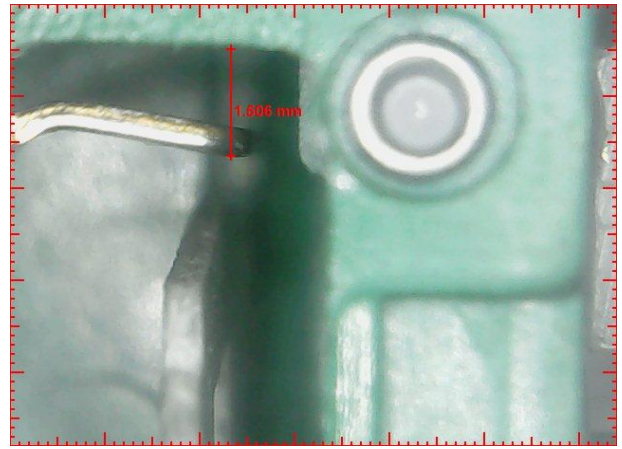
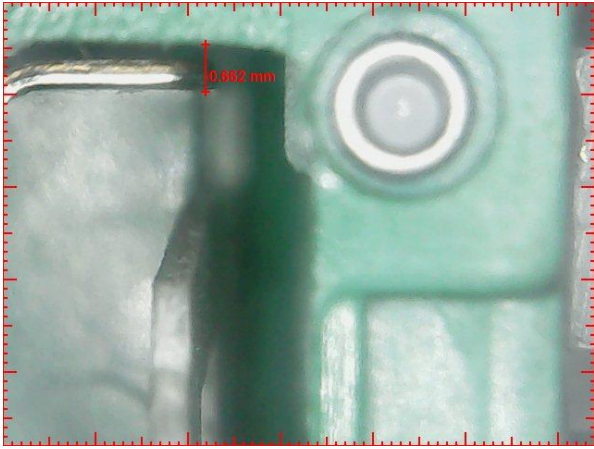


Figura 54. Mediciones de bimetálico de disyuntor 8.

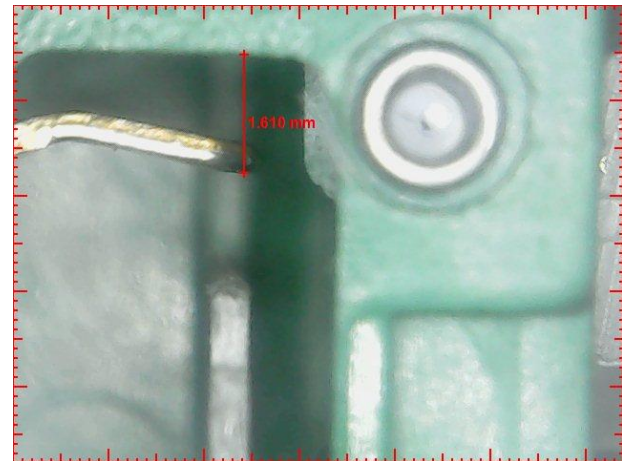
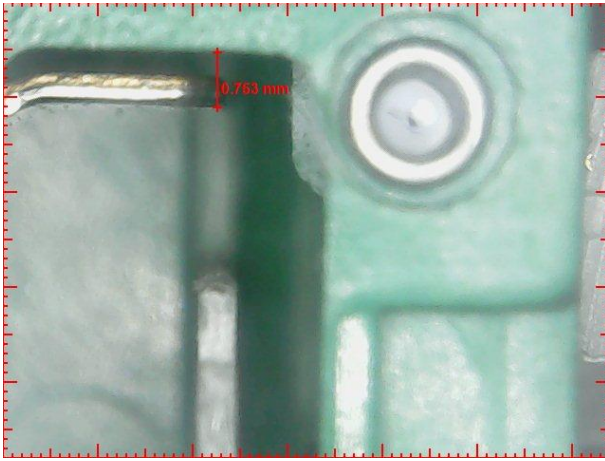


Figura 55. Mediciones de bimetálico de disyuntor 9.

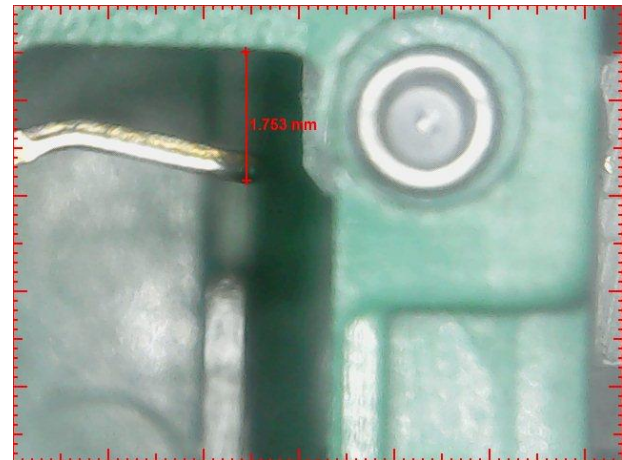
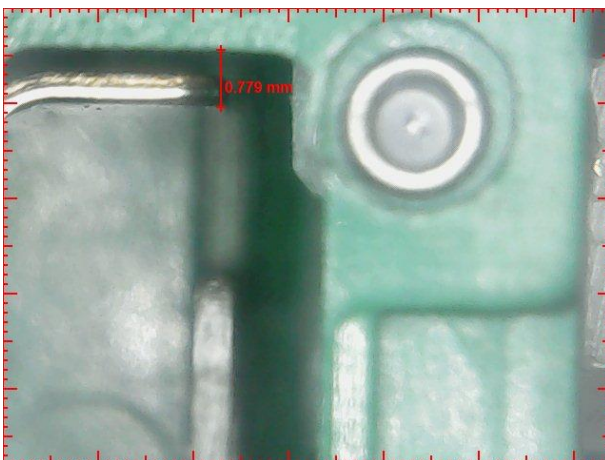


Figura 56. Mediciones de bimetálico de disyuntor 10.

El software de medición arroja los resultados mostrados en la tabla 6:

TABLA 6  
Desplazamiento de bimetales al ser sometidos a 70 Amperes por 39.5 segundos en cada uno de los 10 disyuntores

Disyuntor	Posición inicial de bimetel (mm)	Posición final de bimetel (mm)	Desplazamiento (mm)
1	0.636	1.455	0.819
2	0.688	1.533	0.845
3	0.688	1.584	0.896
4	0.636	1.571	0.935
5	0.805	1.623	0.818
6	0.701	1.506	0.805
7	0.701	1.753	1.052
8	0.662	1.506	0.844
9	0.753	1.61	0.857
10	0.779	1.753	0.974
Desv std	0.0545	0.0951	0.0759

De acuerdo con los resultados se obtiene una media de 0.8845 mm o 0.0348" de desplazamiento a los 39.5 segundos de funcionamiento a 70 Amperes de corriente. Este desplazamiento del bimetel fue usado para calcular el reposicionamiento de éste usando los tornillos de calibración con el fin de desplazar el componente que actúa el mecanismo de apertura del botón, conocido como connecting plate, y consiguiente apertura del circuito eléctrico tal como se describe en el apartado 1.2.1. Adicionalmente al desplazamiento requerido a 70 Amperes, se realizó la medición del desplazamiento del bimetel a los 10, 20, 30, 40, 50 y 60 amperes, obteniendo los desplazamientos en milímetros mostrados en la tabla 7.

TABLA 7  
Desplazamiento de bimetales al ser sometidos a corriente de 0 a 70 Amperes

	0	20	30	40	50	60	70
1	0	0.151	0.274	0.561	0.959	1.356	1.539
2	0	0.096	0.288	0.534	0.932	1.411	1.568
3	0	0.096	0.274	0.575	1	1.411	1.619
4	0	0.082	0.288	0.562	1.014	1.411	1.71
5	0	0.137	0.343	0.576	1.028	1.288	1.301
6	0	0.082	0.279	0.53	1.014	1.425	1.529
7	0	0.11	0.315	0.589	1.041	1.439	1.79
8	0	0.096	0.261	0.548	0.918	1.37	1.552
9	0	0.151	0.315	0.548	1.068	1.52	1.624
10	0	0.123	0.342	0.616	1.013	1.342	1.537

La figura 57 muestra el desplazamiento total de los 10 bimetales a los 39.5 segundos bajo corriente eléctrica desde 10 hasta 70 Amperes.

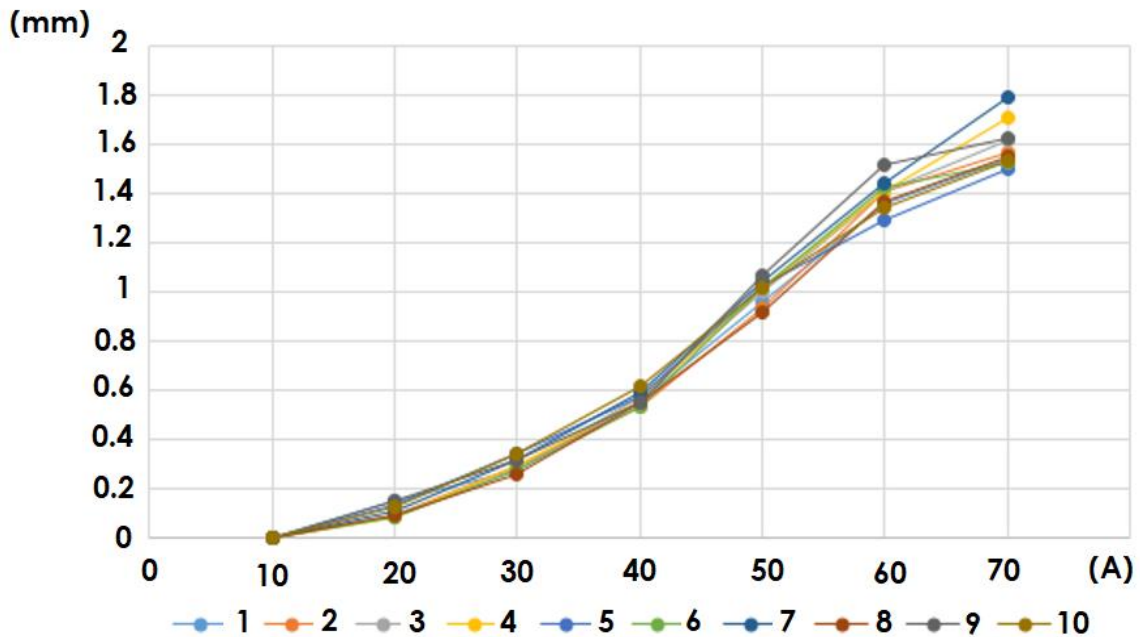


Figura 57. Desplazamiento de bimetales a los 39.5 s.

Caliskan [30] propone que el desempeño de un elemento termostático es determinado por una gran cantidad de variables. Éstas pueden clasificarse en dos grupos: Variables geométricas y variables de materiales. Para optimizar la manera en la que el elemento



trabaja es necesario definir y comprender estas variables e identificar el papel que juega cada una. Caliskan identifica al proceso de formado de los elementos termostáticos, a las propiedades de los materiales de éstos y al tratamiento térmico aplicado como las variables clave en cuanto a la estabilidad de un bimetal.

Dicho lo anterior es importante que los bimetales usados para la producción de disyuntores tengan tolerancias dimensionales cerradas y los porcentajes exactos en las aleaciones para asegurar su estabilidad. Las tolerancias dimensionales para el bimetal estudiado están en el rango de  $\pm 0.003''$  y  $\pm 1$  grado para ángulos, estas tolerancias aplican no solo para la fabricación del elemento termostático en sí, sino también para la posición que el elemento tiene en la terminal una vez que se han soldado juntos en la línea de producción. La tolerancia para el espesor del bimetal es aún más cerrada con  $\pm 0.0003''$ .

Además, un proceso de tratamiento térmico es realizado en la línea de producción antes de proceder al ensamble de los bimetales. Los bimetales son sometidos a  $315\text{ }^{\circ}\text{C}$  por una hora y luego enfriados a temperatura ambiente lo que elimina esfuerzos en éstos que podrían afectar su funcionamiento. Esto es muy importante sobre todo si la forma del bimetal es complicada [31] como es el caso del bimetal usado en los disyuntores estudiados.

Los factores mencionados logran un comportamiento estable de los bimetales una vez son ensamblados en el disyuntor, por lo que se puede asegurar que si éstos se cumplen la metodología propuesta es viable para cualquier bimetal usado en los disyuntores de Sensata Technologies, aunque su composición sea diferente.

#### **4.4. MEDICIÓN DE POSICIÓN DE CONNECTING PLATE**

Para conocer la posición inicial del connecting plate dentro del disyuntor, se midió la separación entre éste y el bimetal de cada uno de los 10 dispositivos usando un cabezal de medición programable Keyence IM6225 con una precisión de  $\pm 0.5\mu\text{m}$ , éste se muestra en la figura 58. Al conocer la separación entre el bimetal y el connecting plate, el cual

es el componente que al ser empujado por el bimetal libera el mecanismo de apertura del botón, se sabrá el acercamiento necesario que hay que realizar.



Figura 58. Cabezal de medición Keyence IM6225.

Las mediciones obtenidas en el cabezal Keyence arrojan las separaciones mostradas en la tabla 8.

TABLA 8  
Separación entre bimetal y connecting plate medida en cabezal Keyence IM6225.

Disyuntor	Separación entre bimetal y connecting plate (in)
1	0.1106
2	0.1141
3	0.11
4	0.1107
5	0.1074
6	0.0994
7	0.1107
8	0.099
9	0.0971
10	0.103

Las mediciones obtenidas fueron las siguientes (Fig. 59):



Figura 59. Dispositivos medidos en cabezal de medición Keyence IM6225.

#### 4.5. AJUSTE DE TORNILLOS DE CALIBRACIÓN

Los tornillos de calibración son opresores ranurados con una longitud de 0.182" a 0.192" y una cuerda 0-80-UNF2A que son insertados a un costado del disyuntor de tal forma que pueda ajustarse la separación entre el bimetálico y el connecting plate.

Gracias a las mediciones realizadas se obtuvo la distancia necesaria que se debe acercar el bimetálico para hacer que éste una vez flexionado pueda empujar el

connecting plate y accionar el mecanismo de apertura del botón sustrayendo el desplazamiento total a la separación entre el bimetálico y el connecting plate, con lo que se obtienen en condiciones ideales los valores mostrados en la tabla 9:

TABLA 9  
*Cálculo de ajuste requerido para acercar bimetálico a connecting plate.*

Disyuntor	Desplazamiento de bimetálico (mm)	Separación con connecting plate (mm)	Ajuste requerido (mm)	Ajuste requerido (in)
1	0.819	2.80924	1.99024	0.0784
2	0.845	2.89814	2.05314	0.0808
3	0.896	2.794	1.8767	0.0739
4	0.935	2.8117	1.92728	0.0759
5	0.818	2.72796	1.90996	0.0752
6	0.805	2.5248	1.71976	0.0677
7	1.052	2.81178	1.75978	0.0693
8	0.844	2.5146	1.6706	0.0658
9	0.857	2.46634	1.60934	0.0634
10	0.974	2.6162	1.6422	0.0647

Pero, ya que no habrá manera de conocer el desplazamiento final del bimetálico al ensamblar los disyuntores en la línea de producción, se consideró el promedio de desplazamiento obtenido en las mediciones con el microscopio digital de 0.8845 mm o lo que es igual a 0.0348". Por lo que el ajuste final queda de la forma mostrada en la tabla 10:

TABLA 10

Cálculo de ajuste requerido para acercar bimetel a connecting plate con desplazamiento promedio.

Disyuntor	Desplazamiento promedio de bimetel (mm)	Separación con connecting plate (mm)	Ajuste requerido (mm)	Ajuste requerido (in)
1	0.8845	2.80924	1.92474	0.0758
2	0.8845	2.89814	2.01364	0.0793
3	0.8845	2.794	1.9095	0.0752
4	0.8845	2.8117	1.92728	0.0759
5	0.8845	2.72796	1.84346	0.0726
6	0.8845	2.5248	1.64026	0.0646
7	0.8845	2.81178	1.92728	0.0759
8	0.8845	2.5146	1.6301	0.0642
9	0.8845	2.46634	1.58184	0.0623
10	0.8845	2.6162	1.7317	0.0682

Como se mencionó anteriormente, los disyuntores cuentan con otro bimetel conocido como compensador el cual se alejará del connecting plate al aumentar su temperatura. Es por eso que se debe calcular la distancia que el compensador se flexionará al calentarse debido a la acción de la corriente eléctrica y restar esta distancia al ajuste requerido.

De la ecuación 21 para calcular la deflexión térmica de un bimetel en cantiléver del apartado 2.8.1 se tiene:

$$B = \frac{0.53 F (T_2 - T_1)L^2}{t}$$

Donde F es una flexividad de  $217 \times 10^{-7}$  de acuerdo a las propiedades mostradas en el apartado 4.1. L es una longitud activa de 0.4925" y t es un espesor de 0.023" de acuerdo al dibujo de ingeniería del compensador. La temperatura inicial fue la temperatura ambiente de 75 °F y la temperatura final fue de 210 °F. Para obtener la temperatura final de trabajo, se midió la temperatura a los 39.5 segundos de operación a 70 Amperes de los 10 disyuntores usando el termómetro infrarrojo Amprobe IR-730. Obteniendo un promedio de 210 °F.

Por lo tanto:

$$B = \frac{0.53 (0.0000217)(210 - 75)(0.4925)^2}{0.023}$$

$$B = 0.0163''$$

Experimentalmente se determinó que una vuelta del tornillo equivale a un desplazamiento de 0.046'' en el bimetal. Esto se validó midiendo con el cabezal Keyence IM6225 el aumento de separación entre el bimetal y la base al girar el tornillo 0.5, 1, 1.5 y 2 vueltas. La figura 60 muestra el desplazamiento medido del bimetal.



Figura 60. Desplazamiento del bimetal vs giros de tornillo de calibración.

Conociendo este desplazamiento se calcularon las vueltas necesarias en los tornillos de calibración de cada disyuntor para lograr el ajuste final como se muestra en la tabla 11.

TABLA 11  
Cálculo de vueltas requeridas para lograr ajuste de bimetal.

Disyuntor	Ajuste requerido sin compensar (in)	Desplazamiento del compensador	Ajuste requerido final (in)	Vueltas requeridas en tornillos de calibración
1	0.0758	0.016	0.0598	1.3
2	0.0793	0.016	0.0633	1.4
3	0.0752	0.016	0.0592	1.3
4	0.0759	0.016	0.0599	1.3
5	0.0726	0.016	0.0566	1.2
6	0.0646	0.016	0.0486	1.1
7	0.0759	0.016	0.0599	1.3
8	0.0642	0.016	0.0482	1.1
9	0.0623	0.016	0.0463	1
10	0.0682	0.016	0.0522	1.1

#### 4.6. VALIDACIÓN DE AJUSTE DE TORNILLOS DE CALIBRACIÓN

Los tornillos fueron insertados en los disyuntores contando el número de vueltas necesarias para lograr el acercamiento necesario. Para constatar que los tornillos estuvieran en la posición inicial correcta, que es apenas haciendo contacto con el bimetálico, se utilizó un desarmador verificador de continuidad. Este desarmador se sujeta a la terminal del disyuntor con una pinza caimán y enciende un led al cerrar el circuito entre el tornillo y el bimetálico tal como muestra la figura 61.



Figura 61. Desarmador verificador de posición de tornillo de calibración.

Una vez ajustada la distancia, ésta fue validada usando el cabezal de medición Keyence IM6225 (Tabla 12). Debido a la dificultad de realizar giros exactos en los tornillos se requirieron ajustes manuales para lograr la distancia requerida.

TABLA 12  
Comparativa de valores de ajuste calculados y reales.

Disyuntor	Ajuste requerido final calculado (in)	Ajuste requerido final real (in)
1	0.0598	0.05946
2	0.0633	0.06402
3	0.0592	0.05913
4	0.0599	0.05954
5	0.0566	0.05671
6	0.0486	0.04848
7	0.0599	0.05929
8	0.0482	0.04806
9	0.0463	0.04697
10	0.0522	0.05232

A continuación, se muestran las imágenes utilizadas para obtener estos resultados (Fig. 62).



Figura 62. Medición de separación entre bimetal y connecting plate una vez colocados los tornillos de calibración.

#### 4.7. PRUEBA ELÉCTRICA

Los disyuntores ajustados fueron sometidos a una prueba funcional al recibir 200% de corriente nominal, 70 Amperes y verificando su tiempo de apertura. Los resultados se muestran en la tabla 13:



TABLA 13

Tiempos de apertura de disyuntores una vez ajustados.

Disyuntor	Tiempo de apertura
1	39.11
2	36.17
3	41.4
4	39.88
5	39.19
6	40.64
7	39.13
8	40.32
9	33.61
10	39.22

La figura 63 muestra apertura de los 10 disyuntores comparados contra tiempo mínimo y máximo.

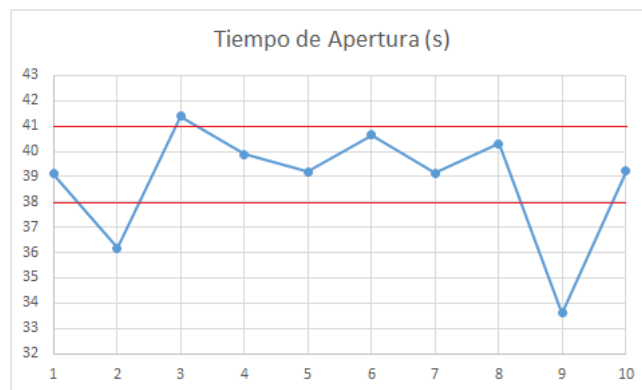


Figura 63. Apertura de los 10 disyuntores comparados contra tiempo mínimo y máximo.

Como se puede observar, se obtuvieron 2 piezas (disyuntores 2 y 9) por debajo del tiempo mínimo de 38 segundos y uno (disyuntor 3) marginalmente por encima del tiempo máximo de 41 segundos.

Tal como se mencionó en la sección 4.3 el proceso de formado de los elementos termostáticos, las propiedades de los materiales de éstos y el tratamiento térmico

aplicado son las variables principales que afectan la estabilidad y desempeño de un elemento termostático; y ya que los bimetales usados para éste estudio no fueron fabricados especialmente en condiciones ideales si no que fueron tomados de lotes de producción normal, las fallas pueden atribuirse principalmente a alguna dimensión fuera de especificación ya sea en el bimetel como en el ensamble final de soldadura o a un tratamiento térmico no realizado satisfactoriamente ya sea por alguna variación de temperatura del horno o por que los bimetales no fueron acomodados uniformemente como lo pide la instrucción de trabajo de la operación. No hay que descartar tampoco una posible variación en los porcentajes de la aleación de los bimetales que fallaron.

## CONCLUSIONES

Las pruebas eléctricas realizadas a los 10 disyuntores modificados muestran resultados prometedores en cuanto a la posibilidad que poder calibrar estos dispositivos sin el uso de corriente eléctrica. Se requieren más investigaciones para encontrar las posibles causas en la variación del desplazamiento de los bimetales y encontrar una forma confiable de ajustar los tornillos de calibración.

Los resultados nos arrojan un 70% de dispositivos dentro de especificación por lo que podemos rechazar la hipótesis nula.

Los conocimientos adquiridos en esta investigación pueden ser usados para reducir los tiempos de operación y por lo tanto conseguir importantes ahorros de mano de obra y tiempo máquina en la línea de ensamble.

## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

Este trabajo de investigación sienta las bases para el diseño y fabricación de equipos de medición y calibración que reduzcan significativamente el tiempo de proceso y la cantidad de scrap en la línea de producción. Los conocimientos obtenidos pueden aplicarse midiendo la posición inicial del bimetálico al momento de ser ensamblado en la base del disyuntor antes de remacharla y midiendo también la posición del connecting plate, y de esta manera ajustar los tornillos de calibración de modo que el elemento termostático quede en una posición final adecuada para abrir el disyuntor en los tiempos de funcionamiento establecidos. Esto conseguiría reducir el tiempo en la operación de calibración en la línea de producción de disyuntores de Sensata Technologies al lograr que al menos el 70% de los disyuntores queden calibrados al primer intento.

## CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante tener en cuenta que los tornillos de calibración fueron colocados a mano por lo que el número de vueltas requeridas no fueron exactas al momento de realizar el ensamble, por lo que la distancia de separación entre el bimetálico y el connecting plate tuvo que ser validada realizando los ajustes necesarios en los tornillos. Una investigación más profunda sobre el método de ensamble de los tornillos que asegure la distancia requerida es necesaria.

Tal como el estudio GR&R del microscopio digital mostró, el equipo puede usarse con reservas por lo que se pudieran tener resultados más exactos con otros equipos. Se sugieren equipos de medición 3D Cognex.<sup>12</sup>

Una muestra mayor a los 10 disyuntores analizados puede ser necesaria para obtener valores de mejora más exactos al comparar el desempeño contra el método tradicional de calibración. Muestras de diferentes lotes de bimetálico pudieran ser más representativas.

---

<sup>12</sup> <https://www.cognex.com/products/machine-vision/3d-laser-profilers/3d-vision-systems>

## TRABAJO A FUTURO

Para aterrizar los conocimientos adquiridos en este trabajo se requiere realizar investigaciones para encontrar un equipo de visión y medición adecuado que pueda obtener la información de cada dispositivo y almacenarla para que cada uno sea calibrado conforme a sus características. Cada dispositivo deberá tener un método de rastreabilidad para mantener la relación de información de ellos.

Conociendo las posiciones de los componentes mencionados se procederá a colocar los tornillos de calibración con el uso de un equipo automatizado que controle la cantidad de vueltas de los tornillos con el uso de servomotores y asegurar la distancia final entre el bimetálico y el connecting plate.

El equipo actual de calibración mediante el uso de corriente eléctrica se usará únicamente con los disyuntores que presenten variación y no pasen la prueba funcional eléctrica.

Se presenta un diagrama de flujo en la figura 64 que muestra un posible proceso que reduciría el uso del equipo actual de calibración de disyuntores y por lo tanto es tiempo ciclo de cada dispositivo:

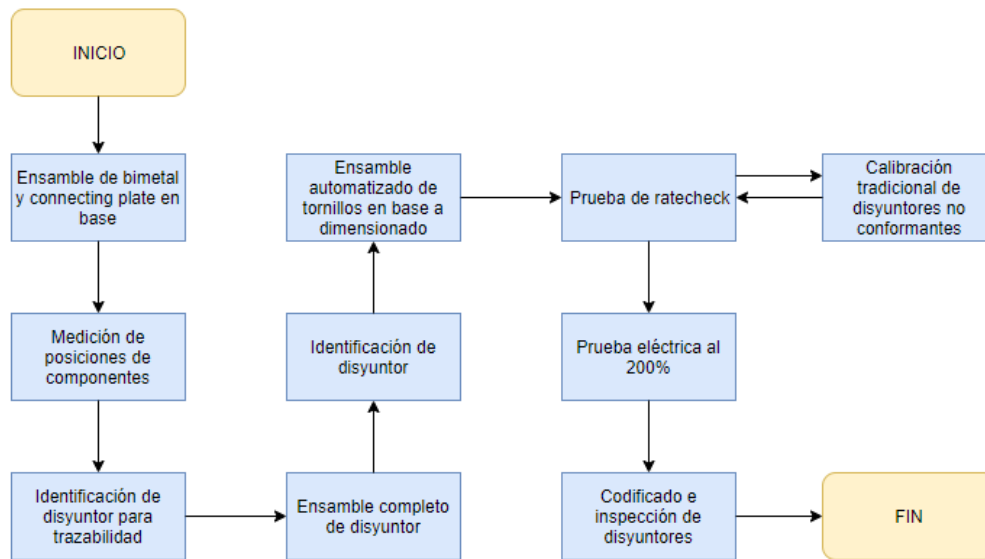


Figura 64. Diagrama de flujo de proceso de ensamble de disyuntor propuesto con calibración en frío.

Este nuevo proceso puede suponer un ahorro de hasta el 70% en los tiempos de calibración actuales, los cuales pueden llegar, como ya se mencionó, hasta a 8 minutos por dispositivo.

## **RENUNCIA**

La información confidencial, y todos los derechos a la misma que han sido divulgados al Receptor, permanecerán como propiedad de Sensata Technologies Inc. El Receptor no obtendrá derecho alguno, de ningún tipo, sobre la información, ni tampoco ningún derecho de utilizarla, excepto para el objeto del presente acuerdo. La divulgación de la Información confidencial no implica el licenciamiento de derecho de patentes o derecho de autor o ningún otro derecho por parte del Divulgador, que no sean los establecidos aquí.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GARZON, R. High Voltage Circuit Breakers Design and Applications. EE.UU.AA. Tennessee, 1997. 365 p.
- [2] Sensata Technologies, 'About Us', 2019. <https://www.sensata.com/about>
- [3] PATEL H., SHAH S. Review on cycle time reduction in manufacturing industries. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2014, Vol 1, No 7, p. 955-957
- [4] WOLFF H., ATHERTON M. Design, Performance and Application of Miniature Circuit-Breakers. North Lancashire Sub-Centre, 1954.
- [5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, "IEEE Recommended Practice for Applying Low-Voltage Circuit Breakers Used in Industrial and Commercial Power Systems", 1997, p. 1-3
- [6] Cannavo F., Peterson R., Cobb C. 1987. Circuit Protection for Advanced Aircraft – A Functional and Historical Perspective. "SAE International SAE Aerospace Avionics Equipment and Integration Conference and Exposition".
- [7] Military Specification MIL-C-5809G, Circuit Breakers, trip free aircraft general specification, 1997.
- [8] FLURSCHEIM C. H.; NOTT J. A. Aircraft Circuit Breakers.
- [9] KHADKIKAR P. The Principles and Properties of Thermostat Metals. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*; 1993, Vol. 45, No 6, p. 39-42
- [10] ENGINEERED MATERIALS SOLUTIONS, "Thermostatic Bimetal Designer's Guide", Wickeder group, Attleboro MA. EE.UU.AA. p.5
- [11] GUYER E. Handbook of Applied Thermal Design. Philadelphia, PA, EE.UU.AA. CRC Press, 1989.
- [12] ASTM B106-08, Standard Test Methods for Flexivity of Thermostat Metals, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
- [13] KHADKIKAR P. Erratum to "The Principles and Properties of Thermostat Metals" *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*;1993, Vol. 45, No 8, p. 69
- [14] CHAWLA K. On the Applicability of the Rule of Mixtures to the Strength Properties of Metal Matrix Composites. *Revista Brasileira de Física*, 1974, Vol. 4, No 3, p. 411-418
- [15] WOLFGANG U., Thermostatic Metal: Manufacture and Application Auerhammer Metallwerk GmbH, Aue, Alemania, 2007, 200 p.

- [16] SHIVALIK BIMETAL CONTROLS LTD, *Shivalik Thermostatic Bimetal Handbook*, Himachal Pradesh India, 33 p.
- [17] ASM INTERNATIONAL, *Thermal Properties of Materials*. Ohio, EE.UU.AA. The Materials Information Society, 2002.
- [18] MANSON S., HALFORD G. *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, Materials Park Ohio, EE.UU.AA, 2006.
- [19] Hosford W. 2005, *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press.
- [20] Honarpisheh M., Dehghani M., Haghiaghat E. 1999 'Investigation of Mechanical Properties of Al/Cu Strip Produced by Equal Channel Angular Rolling' 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials.
- [21] LONG L., KOTOBU N., FUXING Y. *Progress in Cold Roll Bonding of Metals. Science and Technology of Advanced Materials; 2008*, Vol. 9, No 2
- [22] Da Silva L., El-Sharif M., Chisholm C., Laidlaw S., 2014. A Review of the Cold Roll Bonding of ALSN Alloy/Steel Bimetal Strips. Glasgow Caledonian University, p.2
- [23] LUO J., ACOFF V. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering, 2004*, Vol. 379, No 1–2, p. 164-172
- [24] ABBASI M., KARIMI A., SALEHI M. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *Journal of Alloys and Compounds; 2001*, Vol. 319, No 1, p. 233-241
- [25] Sensata technologies, "Precision Products Aircraft Circuit Breakers" 2019. <http://www.flamecorp.com/PDF/Sensata/Aircraft%20Circuit%20Breakers/3TC7.pdf>
- [26] Engineered Materials Solutions, "P35R Data sheet Rev. O", Nov 2014. [https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Download/P35R\\_Specs.pdf](https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Download/P35R_Specs.pdf)
- [27] Engineered Materials Solutions, "P675R Data sheet Rev. O", Nov 2014. [https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Download/P675R\\_Specs.pdf](https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Download/P675R_Specs.pdf)
- [28] ERREDE S. American Wire Gauge (AWG) & Metric Gauge Wire Sizes. *Supplemental Handout Department of Physics*, 2015, Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, Estados Unidos de América.
- [29] LOPEZ L. Measurement System Analysis Study in R Platform. *Fairchild Semiconductor; 2014*, Cebu, Filipinas.
- [30] CALISKAN A., ONAT A. The characterisation of bimetal disks used for thermostatic control and over-temperature protection'. *The Online Journal of Science and Technology; 2017*, Vol. 7, No 4, p.206 - 213

[31] Kanthal Inc. Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook, Hallstahammar, Suecia, 2008, 130 p.