



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría En Ciencias Instrumentación y Control

“Detección de fallas en elementos de un tablero eléctrico para control de motores utilizando tecnología infrarroja.”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias

Presenta:

Ing. María de los Ángeles Herrera Arellano

Dirigido por:

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Presidente


Firma

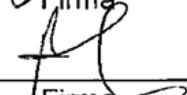
Dr. Martín Valtierra Rodríguez
Secretario


Firma

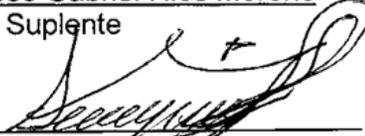
Dr. Iván Ramón Terol Villalobos
Vocal


Firma

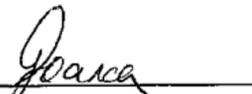
Dr. Mario Trejo Perea
Suplente


Firma

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Suplente


Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2016

RESUMEN

El análisis de fallas utilizando termografía infrarroja se ha considerado una técnica destacada debido a su principal ventaja que es la de ser no invasiva además de proporcionar un perfil de temperatura rápido, fiable y preciso de cualquier superficie de materiales. Este trabajo presenta una metodología basada en procesamiento de imágenes termográficas para la detección de fallas insipientes en equipos eléctricos que componen los Centros de Control de Motores (CCM) implementada en un sistema embebido de bajo costo. Una conclusión cualitativa se puede obtener a partir de la observación del perfil de temperatura de los equipos.

(Palabras clave: Termografía infrarroja, sistema embebido, detección de fallas, procesamiento de imágenes, morfología matemática)

SUMMARY

Failure analysis using infrared thermography has been considered a diagnosis technique with the advantage of being non-invasive. It also provides a fast, reliable, and accurate temperature profile of any material surface. This thesis presents a methodology based on thermal images processing for detection of incipient faults in electrical equipment that integrate the Motor Control Centers (MCC). It is implemented in a low-cost embedded system. A qualitative conclusion can be obtained from the observation of the equipment's temperature profile.

(Keywords: Infrared thermography, embedded system, fault detection, images processing, mathematical morphology).

DEDICATORIA

A mis padres con todo mi amor porque con su motivación, apoyo y ejemplo me inspiraron a llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi director de tesis el Dr. Luis Alberto Morales Hernández, quien con sus conocimientos y experiencia me guio para lograr completar este trabajo de investigación. Además le agradezco ampliamente por su paciencia, comprensión y su valiosa ayuda.

También me permito agradecer a los distinguidos miembros de mi comité revisor Dr. Martín Valtierra Rodríguez, Dr. Mario Trejo Perea y Dr. Gabriel Ríos Moreno por su dedicación y tiempo. Me permito dar un especial agradecimiento al Dr. Iván Terol Villalobos que fue una excelente guía en el transcurso de mi maestría y sus consejos fueron de mucha ayuda para mi superación académica y personal.

A todos mis profesores que me otorgaron la oportunidad de compartir sus conocimientos, mostrándome campos de estudios nuevos, aumentando mi capacidad de análisis.

A mis padres Carlos y Chuyita por enseñarme con su invaluable ejemplo, desde el día que nací hasta el día presente, que no existe problema tan grande que la fuerza de la familia no pueda vencer. Por velar por mi bienestar, por estar siempre dispuestos a apoyarme. No existen palabras para describir la admiración que siento por ustedes.

A mí esposo Eduardo por ser la inspiración para desear construir un futuro mejor para nosotros, por tu cariño, comprensión. Por su apoyo y compañía hicieron este camino más ameno. Te amo.

Y finalmente a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo prestado durante mi estancia en la maestría y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante la realización de la maestría, sin la cual no hubiera sido posible este trabajo.

María de los Ángeles Herrera Arellano
Universidad Autónoma de Querétaro
Octubre 2016

Índice general

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos Particulares</i>	3
1.3.3 <i>Hipótesis</i>	3
1.4 ESTADO DEL ARTE.....	4
1.4.1 <i>Monitoreo</i>	4
1.4.2 <i>Diagnóstico</i>	5
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
2.1 RADIACIÓN INFRARROJA	8
2.2 LEY DE STEFAN-BOLTZMANN	9
2.3 TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	10
2.3.1 <i>Cámara termográfica</i>	10
2.4 INTRODUCCIÓN AL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.	12
2.4.1 <i>Conceptos básicos</i>	12
2.4.2 <i>Segmentación de imágenes</i>	12
2.5 MORFOLOGÍA MATEMÁTICA.....	15
2.5.1 <i>Elemento estructural</i>	15
2.5.2 <i>Erosionado y Dilatado</i>	16
2.5.3 <i>Apertura y Cerradura</i>	18
2.5.4 <i>Gradiente morfológico</i>	21
2.5.5 <i>Transformaciones por reconstrucción</i>	22
2.5.6 <i>Dinámica morfológica</i>	24
2.6 FALLAS EN EQUIPOS ELÉCTRICOS.....	26

2.6.1	<i>Fusibles</i>	27
2.6.2	<i>Interruptores electromagnéticos</i>	27
2.6.3	<i>Aislamiento</i>	28
3.	METODOLOGÍA	31
3.1	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.	32
3.1.1	<i>Hardware</i>	32
3.1.2	<i>Software</i>	37
3.1.3	<i>Calibración</i>	38
3.2	EXPERIMENTACIÓN.....	41
3.2.1	<i>Protocolo de toma de imágenes</i>	41
3.2.2	<i>Descripción de los componentes del tablero.</i>	42
3.2.3	<i>Inducción de fallas</i>	43
3.3	SISTEMA AUTOMÁTICO DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS.	46
3.3.1	<i>Segmentación de la imagen</i>	47
3.3.2	<i>Clasificación de fallas</i>	47
3.4	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA EMBEBIDO.....	48
4.	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	50
4.1	FUNCIONAMIENTO NOMINAL.....	52
4.2	FALLAS.....	57
4.3	FALLAS EN FUSIBLES.....	59
4.3.1	<i>Prueba de sobrecarga</i>	60
4.3.2	<i>Prueba de terminales sueltas</i>	62
4.4	FALLAS EN INTERRUPTOR	64
4.4.1	<i>Terminales oxidadas</i>	64
4.4.2	<i>Terminales sueltas</i>	66
5.	CONCLUSIONES	68
	BIBLIOGRAFÍA	69
	APÉNDICES	72
	APÉNDICE A MANUAL DE OPERACIÓN INTERFAZ.....	72
	APÉNDICE B ARTÍCULO CIINDET 2016.....	75
	APÉNDICE C ARTÍCULO CONIIN 2015	82
	APÉNDICE D ARTICULO IREE	87

Índice de tablas

Tabla 1-1 Resumen de trabajos relacionados con la detección y diagnóstico de fallas.....	6
Tabla 2-1 Emisividad de elementos utilizados en equipos eléctricos.....	9
Tabla 2-2 Criterio Delta T de acuerdo al estándar NETA.....	30
Tabla 3-1 Descripción de las funciones de las terminales.....	34
Tabla 3-2 Descripción de las características del hardware utilizado.....	35
Tabla 3-3 Recopilación de los datos de la calibración.....	39
Tabla 3-4 Matriz de experimentos.....	41
Tabla 3-5 Clasificación de las condiciones de equipo eléctrico.....	48
Tabla 4-1 Reporte resultados en prueba de sobrecarga.....	60
Tabla 4-2 Reporte resultados en prueba de terminales sueltas.....	62
Tabla 4-3 Reporte resultados en pruebas de terminales oxidadas en el interruptor.	64
Tabla 4-4 Reporte resultados en pruebas de terminales sueltas en el interruptor.	66

Índice de figuras

Figura 2-1 Espectro electromagnético, rango de infrarrojos.....	8
Figura 2-2 Representación de una imagen de 16 píxeles.	12
Figura 2-3 Histograma de imágenes con diferentes intensidades de gris.	13
Figura 2-4 Umbralización (a) imagen original en niveles de grises, (b) umbral $t_{min}=100$, $t_{max}=255$, (c) umbral $t_{min}=50$, $t_{max}=255$, (d) umbral $t_{min}=0$, $t_{max}=170$, (e) umbral $t_{min}=0$, $t_{max}=125$, (f) umbral $t_{min}=35$, $t_{max}=125$	14
Figura 2-5 Ejemplos de diferentes elementos estructurales. El origen se marca con una cruz.....	15
Figura 2-6 Imagen en escala de grises (a) Dilatada, (b) Original, (c) Erosionada.	18
Figura 2-7 Dinámica del camino en un perfil de escala de grises.	24
Figura 2-8 Dinámica de mínimos.....	25
Figura 2-9 Fotografías de los componentes del tablero marcando las regiones de interés (ROI) (a) Corta corriente, (b) Fusibles, (c) Interruptor.....	26
Figura 2-10 fusible y porta fusible.	27
Figura 2-11 Componentes principales de un interruptor electromagnético.	28
Figura 2-12 Principales fallas en equipos eléctricos.....	29
Figura 3-1 Diagrama de metodología.....	31
Figura 3-2 Distribución e interconexión de los elementos del sistema.	33
Figura 3-3 FLiR Dev KIT-13233.	33
Figura 3-4 Tarjeta de desarrollo BeagleBone Black.	35

Figura 3-5 (a) Vista frontal, (b) vista posterior del sistema implementado.....	36
Figura 3-6 Interfaz de captura de imágenes.....	37
Figura 3-7 Montaje de calibración a) cámara infrarroja b) termómetro de mercurio.	38
Figura 3-8 Grafica de temperatura medida con niveles de gris.....	40
Figura 3-9 Protocolo de toma de imágenes (a) objetivo, (b) cámara.....	41
Figura 3-10 Diagrama de control de paro y arranque.....	42
Figura 3-11 Diagrama de fuerza del tablero de pruebas.	43
Figura 3-12 Diagrama de fuerza de experimento de sobrecarga con un reóstato en paralelo.	44
Figura 3-13 (a) bornes de contacto normales (b) tornillo y bornes de contacto oxidados.....	45
Figura 3-14 Sistema automático para la segmentación y diagnóstico de fallas. ...	46
Figura 3-15 Algoritmo de detección de fallas.	47
Figura 4-1 Montaje del experimento.....	50
Figura 4-2 Captura de imágenes térmicas en el interruptor.	51
Figura 4-3 (a) Imagen con falla de terminal floja, (b) Apertura por reconstrucción tamaño 1, (c) Dinámica morfológica, (d) Umbralización min=45 max=255, (e) Gradiente externo de la imagen binarizada, (f) Resta de la imagen original y la anterior.....	52
Figura 4-4 Imágenes infrarrojas de equipos en funcionamiento nominal (a) Corta corriente (b) Fusibles, c) Interruptores.	53
Figura 4-5 Implementación del algoritmo ejemplo fusible funcionamiento nominal fotografía de la pantalla del sistema embebido.	54

Figura 4-6 Implementación del algoritmo ejemplo fusible funcionamiento nominal, impresión de pantalla.	54
Figura 4-7 Gráfica del análisis del Corta Corriente (CC) en funcionamiento nominal.	55
Figura 4-8 Gráfica del análisis del Fusible (F) en funcionamiento nominal.	56
Figura 4-9 Gráfica del análisis del Interruptor (I) en funcionamiento nominal.	56
Figura 4-10 (a) Imagen con falla de terminal floja, (b) Apertura por reconstrucción tamaño 1, (c) Dinámica morfológica, (d) Umbralización min=40 max=255, (e) Gradiente externo de la imagen binarizada, (f) Resta de la imagen original y la anterior.	57
Figura 4-11 Implementación del algoritmo ejemplo interruptor con falla, fotografía del sistema embebido.	58
Figura 4-12 Implementación del algoritmo ejemplo interruptor con falla, impresión de pantalla.....	58
Figura 4-13 Experimento de sobrecarga con un reóstato en paralelo.....	59

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Debido a la creciente demanda de eficiencia y calidad en productos en conjunto con procesos automáticos de alto costo y la preocupación por la seguridad, el área de monitoreo, detección de fallas y diagnóstico de fallas juega un papel importante (Isermann 2006).

El uso de la termografía infrarroja IRT, por sus siglas en inglés (Infrared Thermography), está ganando importancia en diversos campos industriales. IRT es una de las herramientas populares de prueba y de control del estado de los equipos no destructiva, se utiliza generalmente para investigar las anomalías térmicas invisibles en la superficie de los materiales en diversas aplicaciones tales como militar, industrial, eléctrico, la estructura y medicina (Balaras y Argiriou 2002; Lahiri et al. 2012; Bagavathiappan et al. 2013; Ahmed et al. 2015). Por lo que la adquisición y procesamiento de este tipo de imágenes se ha convertido en un punto de interés en el desarrollo de nuevas tecnologías.

En este trabajo se plantea un sistema de detección y clasificación de fallas de componentes eléctricos de un tablero de control para motores utilizando IRT. La IRT presenta las ventajas de ser un sistema de no contacto, libre de interferencia electromagnética, seguro y confiable. Con este sistema se puede visualizar y verificar un perfil térmico, localizando así los incrementos de temperatura (Jadin y Taib 2012).

La temperatura es un indicador de la condición de un equipo eléctrico, el calor producido por altas resistencias eléctricas comúnmente precede a las fallas. En general, las fallas de los sistemas eléctricos muestran un sobrecalentamiento de los contactos y conectores de conductores, en conexiones flojas o en fallas de aislamiento, etc. antes de que causen una falla catastrófica o daños graves (Balaras y Argiriou 2002).

Hay dos maneras de medir la condición térmica de los equipos eléctricos. La primera es conocida como cuantitativa, que es tomar la temperatura exacta de los equipos. El segundo tipo es cualitativo, que toma los valores de temperatura relativas de una región

de interés (ROI) con respecto a otras partes del equipo en condiciones similares. Es suficiente para adquirir firmas térmicas, que son patrones característicos de las temperaturas relativas de los equipos (Epperly et al. 1997; Jadin y Taib 2012; Huda et al. 2014).

1.2 Descripción del problema

Los equipos eléctricos suelen presentar diversos tipos de fallas en su funcionamiento (Huda y Taib 2013a; Jadin et al. 2014) lo cual ocasiona el desgaste de estos y un peligro latente para los operadores o usuarios de estos equipos.

Las fallas incipientes son las fallas que se desarrollan lentamente, pero que pueden convertirse en grandes fallas si la causa no se detecta y corrige. Su detección y análisis requieren de personal capacitado, la termografía infrarroja ha resultado ser de gran utilidad para la identificación de este tipo de fallas. Este proyecto se realiza en tableros para control de motores eléctricos con el fin de diagnosticar las fallas insipientes que ocasionan pérdidas en energía eléctrica utilizando tecnología infrarroja.

En los últimos años el desarrollo de la tecnología nos permite la identificación de las fallas de una manera inteligente, en la actualidad existen equipos de venta comercial donde se puede obtener las imágenes infrarrojas *in-situ*, sin embargo el procesamiento se realiza posteriormente en un equipo independiente al de adquisición de imágenes y además requieren personal capacitado. Lo que hace surgir la necesidad de dispositivos que manejen este tipo de tecnología de una manera práctica y portátil.

Esto nos lleva a considerar un sistema embebido como una opción factible para el desarrollo de un sistema que realice las operaciones de adquisición y procesamiento de imágenes infrarrojas permitiendo la detección de fallas en equipos eléctricos de manera inteligente.

1.3 Objetivos e hipótesis

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema embebido de procesamiento digital de imágenes que utilice tecnología infrarroja para analizar termogramas y así segmentar y detectar fallas en los elementos que componen un tablero eléctrico con una exactitud mínima de 90%.

1.3.2 Objetivos Particulares

1. Desarrollar un prototipo embebido para la adquisición de imágenes infrarrojas.
2. Realizar el algoritmo para la detección y segmentación de fallas utilizando morfología matemática.
3. Validar el sistema de detección y segmentación de fallas induciendo fallas en un banco de pruebas de tablero eléctrico.

1.3.3 Hipótesis

El desarrollo de un sistema embebido de procesamiento digital de imágenes utilizando tecnología infrarroja para analizar termogramas es capaz de detectar y segmentar la ocurrencia de fallas en elementos eléctricos instalados en un tablero eléctrico con una exactitud superior al 90%.

1.4 Estado del arte.

En esta sección se muestran los trabajos relacionados con el trabajo realizado que van desde el monitoreo al diagnóstico de fallas utilizando termografía infrarroja.

El análisis para obtener un diagnóstico de fallas es un proceso sistemático que determina el origen de la falla y utiliza esta información para hacer el manejo adecuado de los equipos eléctricos. Este proceso consta de cuatro pasos básicos: monitoreo, detección de fallas, diagnóstico de fallas, manejo de la falla (Han y Song 2003; Isermann 2006; Ahmed et al. 2015).

1.4.1 Monitoreo

Monitoreo se define como la medición de variables que se comparan respecto a los valores nominales, si estos se encuentran fuera de los límites de tolerancia se generan alarmas para el operador. Después de que una alarma se activa el operador tiene que tomar las medidas apropiadas (Isermann 2006).

En los últimos años, diversas técnicas de monitoreo de temperatura se han implementado. Estas técnicas encuentran su aplicación basadas en el rango de temperatura medible y la sensibilidad (Jadin et al. 2014). Una de las principales ventajas de la técnica de monitoreo basada en IRT es que requiere instrumentación mínima. Los requisitos esenciales para la medición en los dispositivos eléctricos son una cámara térmica de infrarrojos, una base para la cámara y una unidad de salida de vídeo para visualizar las imágenes infrarrojas adquiridas.

En el año 2012 se realizó una tesis de licenciatura que por primera vez en la Universidad Autónoma de Querétaro trabajó con la tecnología infrarroja, en la cual se desarrolló una metodología para el monitoreo de sistemas eléctricos, mediante pruebas de imágenes termográficas (Alvarado, 2012).

1.4.2 Diagnóstico

La tarea de diagnóstico de fallos consiste en determinar el tipo, el tamaño y la ubicación del posible fallo, así como su momento de la detección (Isermann 2006).

Internacionalmente se han desarrollado diversos proyectos de aplicaciones que utilizan la tecnología IR para la detección y diagnóstico de fallas en elementos eléctricos de los cuales los trabajos realizados para instalaciones eléctricas se destacan el sistema de diagnóstico por imagen térmica inteligente que fue propuesto por (Laurentys Almeida et al. 2009) para el diagnóstico de fallas en los descargadores de sobretensión. El sistema utiliza la segmentación Watershed para encontrar el defecto dentro de los pararrayos y la red neuro-difusa para clasificar la condición térmica en tres clases como defectuosos, normales y sospechosos. Este sistema fue validado utilizando 100 imágenes térmicas y su precisión alcanzo el 90%.

En Shafi'i y Hamzah (2010) se desarrolló una clasificación inteligente. El sistema utiliza la red neuronal artificial para clasificar las condiciones térmicas y asigna los defectos en cuatro clases como bajo, intermedio, medio y alto. Los datos de la escala de color RGB que contienen los datos de temperatura y termograma se utilizaron como las características de entrada de Artificial Neural Network (ANN). El experimento se realizó en 336 imágenes térmicas y logra tasa de reconocimiento máximo 99.38%.

En Huda y Taib (2013a) se trabajó con la extracción de características de las imágenes para su segmentación utilizando la técnica de umbralización Kapur basado en la entropía máxima modificada. Las redes neuronales artificiales (ANN) se utilizaron para clasificar las condiciones térmicas de los equipos en dos clases a saber, normal y defectuoso. El experimento se realizó en 256 imágenes térmicas logrando un máximo 82.89% de eficiencia.

En Jadin et al. (2014) la segmentación se realiza de manera manual, la extracción de las características térmicas (temperatura máxima y mínima) de las imágenes y la clasificación de las fallas se realizó utilizando un perceptrón multicapa (MLP) y un soporte artificial de máquinas de vectores neuronal (SVM) donde analizaron 240 imágenes con una eficiencia de 99.026%

En la Tabla 1-1 se muestran trabajos de detección y diagnóstico de fallas relacionados con el trabajo realizado, con el enfoque de destacar el algoritmo de segmentación de imágenes y el algoritmo de clasificación de fallas.

Tabla 1-1 Resumen de trabajos relacionados con la detección y diagnóstico de fallas.

Artículo	Fallas	Algoritmo-metodología	Tecnología utilizada
(Laurentys Almeida et al. 2009)	Descargadores de sobretensión	La segmentación se realiza mediante Watershed. El diagnóstico se implementa por un conjunto de redes neuro-difuso. La estrategia se conoce como <i>bagging</i> .	FLIR
(Chou y Yao 2009)	Capacitores y transformadores de potencia.	Algoritmo de termografía infrarroja para la detección de anomalías (ITADA). Umbralización estadística de Otsu en histogramas a niveles de grises.	No especificado
(Shafi'i y Hamzah 2010)	No mencionada	Segmentación manual. Algoritmo de Levenberg Marquardt	Tomadas de una base de datos.
(Huda y Taib 2013b)	Fallas internas y externas del equipo, tales como conexión floja, falsos contactos y ruptura de aislamiento en un cortacorriente.	Umbralización de Kapur. Red neuronal con un perceptrón multicapa.	Fluke Ti25

(Garcia-Ramirez et al. 2014)	Fallas en motores de inducción.	Segmentación manual Delta de temperatura	FLIR A310
(Jadin et al. 2014)	Fallas en Interruptores, barras colectoras conexiones, cables, cables y fusibles en los principales tableros de distribución	Red neural MLP Máquinas de vectores neuronal soporte artificial (por sus siglas en inglés SVM)	Fluke Ti25
(Ahmed et al. 2015)	Sobrecargas, aislamiento, corrientes parásitas, falla a tierra, sobretensión y malas conexiones.	Umbralización Sistema Difuso de Construcción Recursiva (por sus siglas en inglés RCFS)	Fluke Ti25

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Radiación infrarroja

La radiación electromagnética está por todas partes y se compone de todo, se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

La radiación infrarroja (IR) se encuentra típicamente entre longitudes de onda de 2-15 micras esto es entre las partes visibles y microondas del espectro electromagnético. Este intervalo del espectro electromagnético puede subdividirse en IR cercanas que se localizan de 0,7 a 25 micras, se encuentran cerca de la luz visible, pero con una longitud de onda que es más larga que visible, y las ondas lejanas IR (25-1000 micras) están más cerca de la región de microondas (Balaras y Argiriou 2002; Bagavathiappan et al. 2013). En la Figura 2-1 se muestra el espectro electromagnético resaltando la sección de infrarrojos.

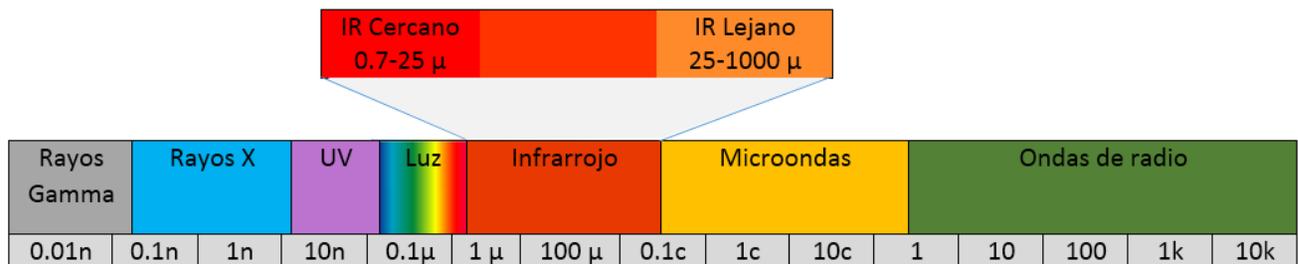


Figura 2-1 Espectro electromagnético, rango de infrarrojos.

* Imagen propuesta y adaptada por el autor de la tesis

2.2 Ley de Stefan-Boltzmann

La relación de radiación infrarroja emitida por los cuerpos está relacionada con la temperatura de la superficie de un objeto mediante la Ley de Stefan-Boltzmann la cual parte de que todos los objetos irradian energía que se transporta en forma de ondas electromagnéticas, que viajan a la velocidad de la luz, y establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$q^n = \sigma T^4 \quad (2-1)$$

Donde q^n es la potencia de emisión total (energía radiante por unidad de área w/m^2), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} w/m^2K$) y T es la temperatura absoluta de la superficie en Kelvin (K).

La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$q^n = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2-2)$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad total de la superficie con valores en el rango ($0 < \varepsilon < 1$) (Balaras y Argiriou 2002; Bagavathiappan et al. 2013).

La Tabla 2-1 muestra la emisividad de diferentes materiales que se utilizan para equipos eléctricos.

Tabla 2-1 Emisividad de elementos utilizados en equipos eléctricos.

Material	Temperatura (K)	Emisividad
Aluminio	290	0.83–0.94
Latón(Pulido)	301	0.03
Cobre (oxidado)	311	0.87
Hierro fundido (oxidación fuerte)	377	0.95
Níquel (pulido)	298	0.05
Hierro templado (pulido)	313–523	0.28

2.3 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica de inspección no destructiva que mide la temperatura de un cuerpo de forma remota y proporciona una imagen térmica del componente o de la maquinaria (Bagavathiappan et al. 2013). Para esto utiliza sensores infrarrojos y lentes ópticas construidas en un sistema eléctrico para capturar imágenes térmicas de los objetos basados en la variación de la temperatura.

2.3.1 Cámara termográfica

Ahora bien, una cámara térmica es un dispositivo que hace una imagen de patrones térmicos y está calibrada para medir la potencia de emisión de las superficies en un área en varios rangos de temperatura. Las cámaras utilizan una lente para enfocar la radiación IR emitida a un detector y la señal de respuesta eléctrica se convierte en la representación visual (imagen digital) en la que los diferentes colores corresponden a diferentes niveles de temperatura de la superficie (objetivo) en los que se centra. Las cámaras infrarrojas guardan imágenes que el ojo humano puede ver para entender las condiciones internas de los objetos (Epperly et al. 1997; Chou y Yao 2009). Existen dos tipos de sensores térmicos utilizados en las cámaras termográficas, los refrigerados y los no refrigerados.

Sensores refrigerados

Son sensores que emplean semiconductores exóticos extremadamente sensibles a los cambios de temperatura los cuales se encuentran al vacío refrigerados para aumentar su sensibilidad, pues el ruido del sensor sin refrigeración sería más grande que la señal detectada, los materiales más comunes son el telurio de cadmio y mercurio (CdHgTe) y el antimonio de indio (InSb).

Sensores no refrigerados

Son equipos que funcionan a temperatura ambiente, son más baratos y de menor consumo que los refrigerados, utilizan semiconductores como el silicio amorfo y los óxidos de vanadio, donde sus valores de corriente, voltaje o resistencia son monitoreados para inferir la temperatura del objeto bajo a estudio, se denomina también micro bolómetro al sensor térmico.

De acuerdo con Venkataraman et al. (2000) para la elección de la cámara infrarroja se deben de considerar diversos parámetros. Se enlistan algunos de ellos:

- a. Rango espectral: es definido como la porción del espectro infrarrojo en el cual la cámara infrarroja va a trabajar de manera activa.
- b. Resolución espacial: se define como la habilidad de la cámara para distinguir entre dos objetos dentro del campo de visión. Una mejor resolución espacial dará como resultado una calidad de imagen superior.
- c. Resolución de la temperatura: Se define como la diferencia más pequeña de la temperatura en el campo de visión que puede ser medido por la cámara infrarroja. La resolución de la temperatura depende de varios parámetros experimentales como la temperatura del objeto, la temperatura del medio ambiente, la distancia del objeto a la cámara, presencia de filtros, etc.

2.4 Introducción al procesamiento de imágenes.

El procesamiento digital de imágenes nos permite extraer información considerada relevante, o modificarla para darle un uso, empleando para ello herramientas diversas. Para realizar una mejora a la imagen se presentan una serie de métodos que están basadas en el dominio espacial o en el dominio de la frecuencia.

2.4.1 Conceptos básicos

Imagen.- Matemáticamente una imagen es la representación de una función de $f(x, y)$, con (x, y) las coordenadas de los píxeles (elementos de la imagen) dentro de la imagen (Gonzalez y Woods 2002). La función de salida de la imagen es el valor del píxel de la imagen, el cual es un valor lógico de 0 o 1 para imágenes binarias, mientras que para imágenes en niveles de gris la función tiene valores entre 0 y 255 (0, ..., 255).

También se expresa como un arreglo bidimensional de píxeles con diferente intensidad luminosa (escala de gris) como se muestra en la Figura 2-2.

El diagrama muestra una cuadrícula de 4x4 píxeles. El eje horizontal superior está etiquetado con 'x' y una flecha que apunta a la derecha. El eje vertical izquierdo está etiquetado con 'y' y una flecha que apunta hacia abajo. La cuadrícula contiene los siguientes valores:

0	1	1	2
7	6	6	5
6	0	4	0
5	5	1	2

Figura 2-2 Representación de una imagen de 16 píxeles.

* Ejemplo propuesto y adaptado por el autor de la tesis.

Región de interés.- Región de interés (ROI) que es un subconjunto de píxeles de una imagen o un conjunto de datos identificado para un propósito particular.

2.4.2 Segmentación de imágenes

La segmentación es un concepto clave en el tratamiento de las imágenes. La segmentación de una imagen implica la detección, mediante procedimientos de etiquetado deterministas o estocásticos, de los contornos o regiones de la imagen, basándose en la información de intensidad o/y la información espacial.

2.4.2.1 Histograma

El histograma de una imagen es la ocurrencia de los niveles de gris de la imagen y consiste en graficar el número de píxeles de cada nivel de gris. En la Figura 2-3 podemos ver tres imágenes con sus correspondientes histogramas.

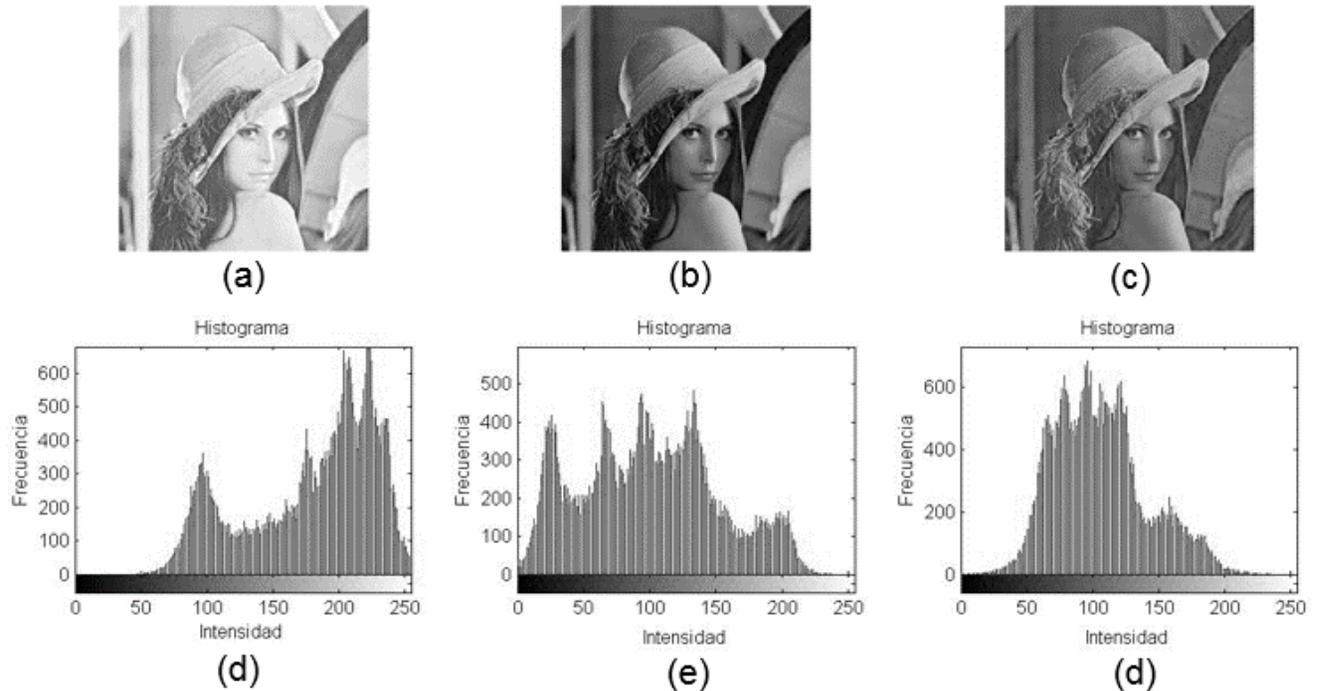


Figura 2-3 Histograma de imágenes con diferentes intensidades de gris.

* Ejemplo propuesto y adaptado por el autor de la tesis

2.4.2.2 Umbralización

La umbralización o *threshold* $T(i, j)$ de una imagen consiste en comparar los niveles de gris presentes en la imagen $g(i, j)$ con un valor umbral t predeterminado. Si el nivel de gris de la imagen es menor que el umbral predeterminado, se le asigna al píxel de la imagen el valor 0 (negro), y si es mayor o igual, se le asigna un 1 (blanco).

$$T(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{si } g(i, j) < t \\ 1 & \text{si } g(i, j) \geq t \end{cases} \quad (2-3)$$

De esta forma se obtiene una imagen donde se separan el fondo de la imagen y los objetos buscados. Los métodos de umbralización son métodos de segmentación

completos, en los cuales cada pixel pertenece obligatoriamente a un segmento y sólo uno (Gonzalez y Woods 2002).

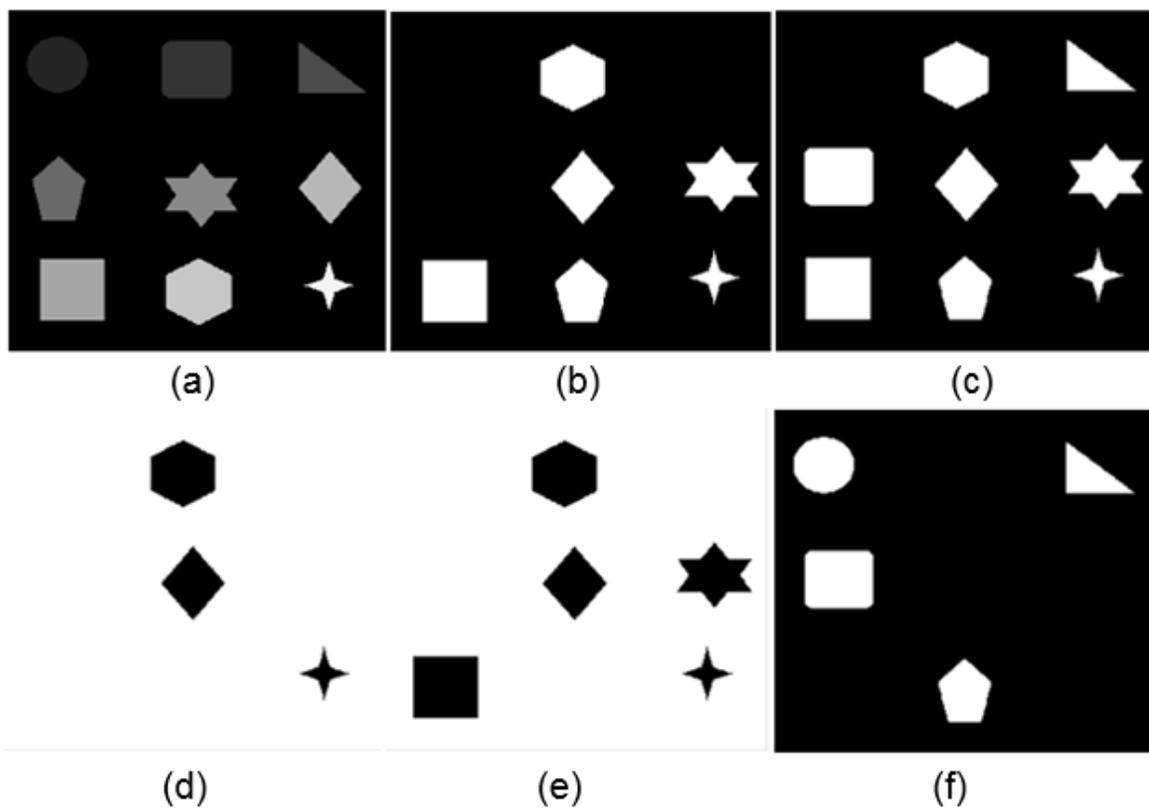


Figura 2-4 Umbralización (a) imagen original en niveles de grises, (b) umbral $t_{\min}=100$, $t_{\max}=255$, (c) umbral $t_{\min}=50$, $t_{\max}=255$, (d) umbral $t_{\min}=0$, $t_{\max}=170$, (e) umbral $t_{\min}=0$, $t_{\max}=125$, (f) umbral $t_{\min}=35$, $t_{\max}=125$.

* Ejemplo propuesto y adaptado por el autor de la tesis.

2.5 Morfología matemática

El origen del algoritmo propuesto en este trabajo se basa en el procesamiento de imágenes utilizando morfología matemática por lo que implica la explicación de algunos conceptos básicos para el mejor entendimiento de este tema. En esta sección se presenta la morfología matemática en imágenes de niveles de gris.

La morfología matemática, que comenzó a desarrollarse a finales de los años sesenta, permanece hoy en día como una parte separada del análisis de imágenes. Esta técnica está basada en la geometría y la forma.

2.5.1 Elemento estructural

El elemento estructural es un conjunto de prueba que escanea la imagen y modifica los píxeles en la base al contenido de la imagen. Al igual que la imagen de entrada, este es binario. La tarea del elemento estructural es modificar la imagen de entrada de cierta manera, y esto toma en cuenta la información local. El elemento estructural es por tanto en muchos de los casos es un conjunto muy pequeño con respecto a la imagen de entrada. Un elemento estructural discreto consiste en pocos píxeles (a menudo menos de 10) que son conectados uno con otro. Una imagen discreta tiene cientos o miles de píxeles. Cuando se trabaja con imágenes discretas, el elemento estructural es una pequeña ventana con un conjunto de píxeles con valores puestos a 1 y otros a 0. En la Figura 2-5 se muestran diferentes elementos estructurales.

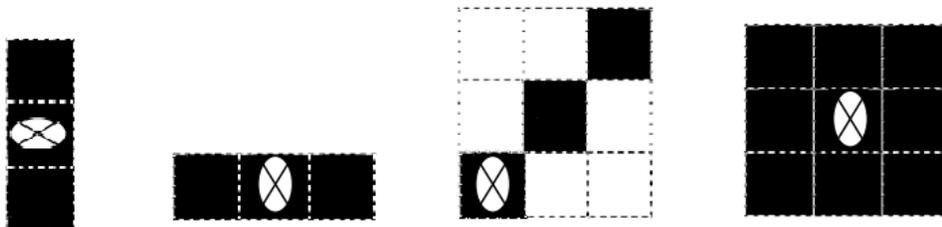


Figura 2-5 Ejemplos de diferentes elementos estructurales. El origen se marca con una cruz.

2.5.2 Erosionado y Dilatado

La morfología matemática está basada en dos operadores básicos: erosionado y dilatado los cuales se explican a continuación.

En el caso de funciones o imágenes de niveles de gris, si B es el elemento estructural plano, las transformaciones morfológicas de la función f dentro de la ventana de observación definida por el elemento estructural B desplazado de manera que el origen de B está centrado en x se definen en los siguientes párrafos.

2.5.2.1 Dilatado

La dilatación está definida como:

$$\delta_B(f)(x) = \max\{f(y) : y \in B_x\} \quad (2-4)$$

Donde x_k es el valor que toma la imagen en el punto $x + k$, es decir $f(x + k)$.

2.5.2.2 Erosionado

$$\varepsilon_B(f)(x) = \min\{f(y) : y \in B_x\} \quad (2-5)$$

Las propiedades más importantes de la dilatación y la erosión son que ambas transformaciones son crecientes y que si el origen del elemento estructural está contenido en él mismo, entonces, son extensivas y antiextensivas respectivamente. Ambas funciones son además duales, de manera que:

$$\delta_B(f)^c = \varepsilon_B(f^c) \quad (2-6)$$

Tanto la erosión como la dilatación no cumplen con la propiedad de idempotencia. Al aplicar sucesivamente la erosión el nivel de gris de la imagen disminuye.

2.5.2.3 Propiedades de las operaciones básicas de dilatación y erosión.

Dualidad

Estas dos operaciones son duales con respecto a su complemento. En otras palabras una erosión es equivalente al complemento de la dilatación de la imagen que ha sido complementada con el mismo elemento estructural y viceversa:

$$\varepsilon_B = C\delta_B C \quad (2-7)$$

Crecientes

Estas dos operaciones son crecientes, respetan el orden presente en la estructura del retículo. Para dos imágenes f y g :

$$\text{Si } f \leq g \Rightarrow \varepsilon(f) \leq \varepsilon(g) \quad (2-8)$$

$$\text{Si } f \leq g \Rightarrow \delta(f) \leq \delta(g) \quad (2-9)$$

Gracias a esta propiedad, las operaciones morfológicas se extienden del caso binario a la escala de los grises.

Extensividad y antiextensividad

La dilatación es una operación extensiva:

$$f \leq \delta(f) \quad (2-10)$$

y la erosión es una operación antiextensiva:

$$\varepsilon(f) \leq f \quad (2-11)$$

Para los elementos estructurantes que contienen su origen se cumple lo siguiente:

$$\varepsilon(f) \leq f \leq \delta(f) \quad (2-12)$$

En la Figura 2-6 se muestra el comportamiento de las operaciones erosión y dilatación efectuadas en una imagen en escala de grises con un elemento estructural tamaño 1.



Figura 2-6 Imagen en escala de grises (a) Dilatada, (b) Original, (c) Erosionada.

* Ejemplo propuesto y adaptado por el autor de la tesis.

2.5.3 Apertura y Cerradura

2.5.3.1 Apertura

Representaremos la apertura de una señal f por un elemento estructurante B como $\gamma_B(f)$. La apertura es la erosión de f por B , y enseguida la aplicación de la dilatación de f por B .

$$\gamma_B(f) = \delta_B(\varepsilon_B(f)) \quad (2-13)$$

Para los conjuntos de manera general definiremos la apertura como la unión de los elementos estructurantes B que se encuentran totalmente dentro del conjunto X :

$$\gamma_B(X) = \cup(B|B \subseteq X) \quad (2-14)$$

2.5.3.2 Cerradura

Representaremos la cerradura de una imagen f por un elemento estructurante B como $\varphi_B(f)$. La cerradura es la dilatación de f por B , y enseguida la aplicación de la erosión de f por B .

$$\varphi_B(f) = \varepsilon_B(\delta_B(f)) \quad (2-15)$$

Para los conjuntos de manera general definiremos la cerradura como la intersección de los elementos estructurantes B que se encuentran totalmente dentro del conjunto X :

$$\varphi_B(X) = \bigcap \{B^c \mid X \subseteq B^c\} \quad (2-16)$$

2.5.3.3 Propiedades de la apertura y cerradura morfológica

Idempotentes y crecientes

La erosión de una apertura es igual a la erosión del conjunto o imagen original. La operación cerradura presenta esta propiedad de manera similar.

$$\varepsilon(\delta\varepsilon) = \varepsilon \quad (2-17)$$

$$\delta(\varepsilon\delta) = \delta \quad (2-18)$$

Por operaciones:

$$\delta\varepsilon(\delta\varepsilon) = \delta\varepsilon \quad (2-19)$$

$$\varepsilon\delta(\varepsilon\delta) = \varepsilon\delta \quad (2-20)$$

Esto significa que las transformaciones de apertura y cerradura son idempotentes:

$$\gamma = \gamma\gamma\gamma, \varphi = \varphi\varphi\varphi \quad (2-21)$$

Esta propiedad asegura que la imagen no se modificará después de varias iteraciones al utilizar la operación mencionada.

Son operaciones crecientes. Sean f y g , dos imágenes:

$$Si \quad f \leq g \Rightarrow \gamma(f) \leq \gamma(g) \quad (2-22)$$

$$Si \quad f \leq g \Rightarrow \varphi(f) \leq \varphi(g) \quad (2-23)$$

Relaciones de orden

La apertura morfológica γ es una operación antiextensiva, mientras que la cerradura morfológica φ es una operación extensiva, esto nos permite presentar la siguiente relación de orden entre la imagen original, la apertura y la cerradura:

$$\gamma \leq I \leq \varphi \quad (2-24)$$

Dualidad

La operación apertura de una imagen equivale a la operación resultante del complemento de la operación cerradura del complemento de la imagen. Por lo tanto, la apertura y cerradura son operaciones duales con respecto a la operación complemento:

$$\gamma_B = C\varphi_B C \quad (2-25)$$

2.5.4 Gradiente morfológico

Un gradiente morfológico puede detectar los contornos de una imagen. Si los objetos son regiones de niveles de gris bastante homogéneas, entonces los límites son localizados en la diferencia de altos niveles de gris.

Se define como el residuo obtenido por la acción de dos operaciones elementales X y ξ es la diferencia, tomando como base los conjuntos, podemos definir la diferencia de la siguiente manera:

$$\rho_{\psi\xi}(X) = \psi(X) / \xi(X) \quad (2-26)$$

Y para funciones:

$$\rho_{\psi\xi}(X) = \psi(X) - \xi(X) \quad (2-27)$$

El primer residuo que se puede definir en morfología matemática es el gradiente morfológico. Este gradiente lo interpretamos como la aproximación de la segmentación morfológica. El residuo gradiente, conocido como gradiente de Beucher es la diferencia entre la dilatación y la erosión, o bien la dilatación con respecto a una imagen original, o bien la diferencia entre la imagen original y la operación de erosión.

2.5.5 Transformaciones por reconstrucción

2.5.5.1 Apertura y cerradura por reconstrucción

Una clase filtros está compuesto por aperturas y cerraduras por reconstrucción. Cuando lo filtros por reconstrucción son construidos, las transformaciones básicas geodésicas, dilatación y erosión geodésicas de tamaño uno, son iteradas hasta que se alcanza la idempotencia. La dilatación y erosión geodésicas de tamaño uno están dadas por:

$$\delta_f^1(g) = f \wedge \delta_B(g) \quad (2-28)$$

Con $f \geq g$ y por:

$$\varepsilon_f^1(g) = f \vee \varepsilon_B(g) \quad (2-29)$$

Con $f \leq g$.

A partir de la dilatación geodésica y la erosión geodésica se define la transformación por reconstrucción y la reconstrucción dual.

$$\rho_f(g) = R(f, g) = \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_f^n(g) = \delta_f^1 \delta_f^1 \dots \delta_f^1(g) \quad (2-30)$$

hasta estabilidad

$$\rho_f^*(g) = R^*(f, g) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varepsilon_f^n(g) = \varepsilon_f^1 \varepsilon_f^1 \dots \varepsilon_f^1(g) \quad (2-31)$$

hasta estabilidad

Cuando la función g (el marcador) es equivalente a la dilatación o a la erosión de la función original por un elemento estructural dado, se considera que la cerradura y apertura por reconstrucción ha sido obtenida.

La apertura por reconstrucción está dada por la ecuación (2-32) y la cerradura por reconstrucción (2-33).

$$\tilde{\gamma}_{\lambda B}(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_f^n(\varepsilon_{\lambda B}(f)) = \underset{\text{hasta estabilidad}}{\delta_f^1 \delta_f^1 \cdots \delta_f^1}(\varepsilon_{\lambda B}(f)) \quad (2-32)$$

$$\tilde{\varphi}_{\lambda B}(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varepsilon_f^n(\delta_{\lambda B}(f)) = \underset{\text{hasta estabilidad}}{\varepsilon_f^1 \varepsilon_f^1 \cdots \varepsilon_f^1}(\delta_{\lambda B}(f)) \quad (2-33)$$

2.5.6 Dinámica morfológica

2.5.6.1 Dinámica de un camino

La dinámica de un camino $p(x, y)$ que une dos píxeles x e y en una imagen es la diferencia de altura entre los puntos de mayor y menor altitud de la ruta (Grimaud Michel 1992).

$$Dyn_f(P(x, y)) = \sup(\text{abs}(f(x_i) - f(x_j))) \quad (2-34)$$

Donde x_i y $x_j \in P(x, y)$.

La dinámica de un camino se ilustra en la Figura 2-7.

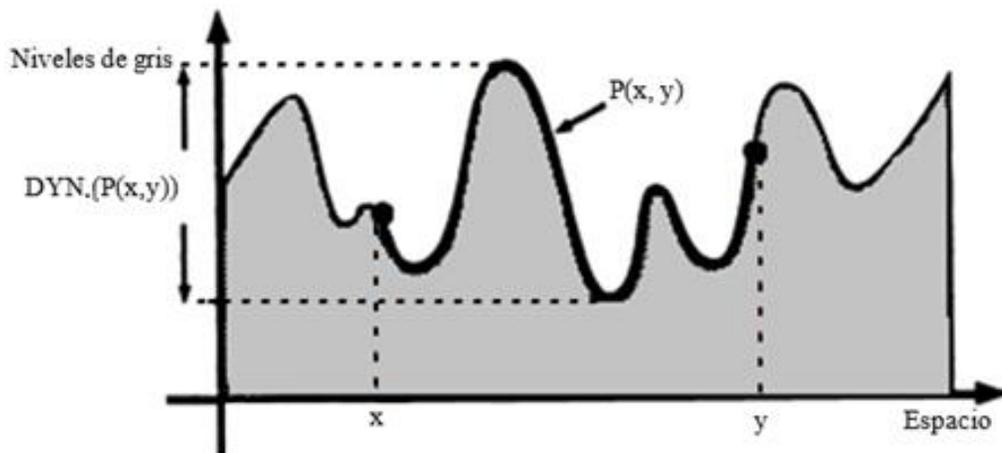


Figura 2-7 Dinámica del camino en un perfil de escala de grises.

*Ejemplo adaptado de Grimaud Michel (1992), pag.4

2.5.6.2 Dinámica de un mínimo (*Profundidad de un mínimo de f*).

La dinámica de un mínimo M de f es igual a la dinámica de un camino de más débil dinámica permitiendo alcanzar una vertiente V cuyo mínimo tiene una altitud menor a la de M

$$\text{Prof}(M) = \text{Dinámica}_f(M) = \left\{ \inf \left(\text{Dinámica}_f(x, V_i) \right), x \in M \text{ y } \text{altura}(M) > \text{altura}(\text{Min}(V_i)) \right\} \quad (2-35)$$

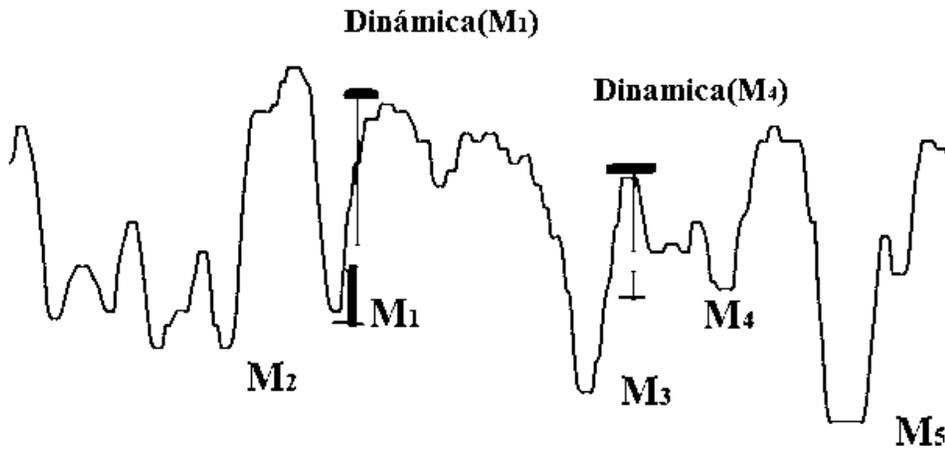


Figura 2-8 Dinámica de mínimos

*Ejemplo tomado del curso *Morfología matemática UAQ 2015* impartido por el Dr. Iván Terol Villalobos.

2.6 Fallas en equipos eléctricos

A uno o varios circuitos eléctricos destinados a un uso específico y que cuentan con los equipos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento de ellos y los aparatos eléctricos conectados a los mismos se le conoce como instalación eléctrica.

Los Centros de Control para Motores (CCM) se componen básicamente de fusibles, interruptores termomagnéticos, cortacorrientes, etc. La corrosión, conexión suelta, contactos dañados, cables desgastados, sobre carga o desbalance de carga son los principales tipos de fallas en los elementos eléctricos que causa aumento anormal de la temperatura que puede ser fácilmente detectados por IRT (Balaras y Argiriou 2002; Cao et al. 2008; Jadin y Taib 2012; Huda y Taib 2013a). En la Figura 2-9 se muestran los componentes del tablero de control para motores que se va a analizar remarcando las regiones de interés. Las fallas se encuentran en forma de puntos calientes en las terminales de contacto que puede ser a causa de un contacto flojo, tuercas y tornillos oxidados o sucios, conductores rotos, entre otros.

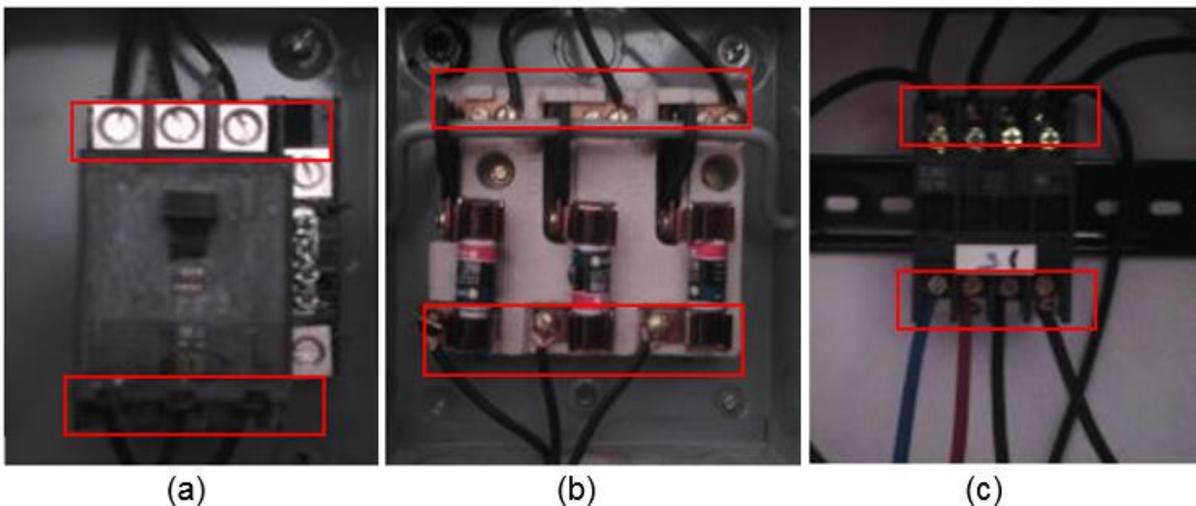


Figura 2-9 Fotografías de los componentes del tablero marcando las regiones de interés (ROI) (a) Corta corriente, (b) Fusibles, (c) Interruptor.

2.6.1 Fusibles

Los fusibles (Figura 2-10) se utilizan para proteger el sistema contra condiciones de sobrecargas. La condición de sobrecarga en la que un sistema puede aumentar la temperatura de las conexiones de los fusibles y, además, los clips de fusibles o porta fusibles pueden presentar un sobrecalentamiento debido a las conexiones sueltas y sucias (Huda y Taib 2013a). La condición de sobrecarga suele mostrar un patrón de calor uniformado que aparece a través de todo el circuito. El calor total generado por los equipos depende de la carga y la temperatura ambiente de funcionamiento de los equipos (Jadin y Taib 2012).

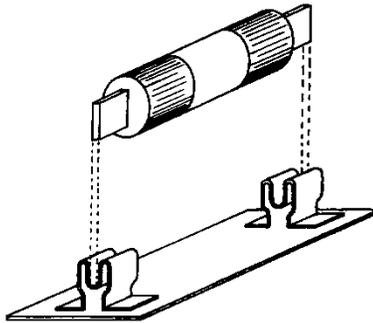


Figura 2-10 fusible y porta fusible.

2.6.2 Interruptores electromagnéticos.

Un interruptor de circuito o corta corriente siempre detecta el calor producido por la corriente. Si encuentra la anomalía de calor, al instante se abre el circuito automáticamente y protege los equipos eléctricos de los daños. La inspección termográfica tiene las ventajas de encontrar las anomalías mediante el análisis de la variación de temperatura de la superficie del circuito interruptor y puede prevenir estas anomalías anticipadamente (Huda y Taib 2013b).

Los corta corrientes, interruptores y otros dispositivos de reenganche operan con contactos. Si estos contactos se aflojan, se oxidan o ensucian aumentan la resistencia, entonces el fallo puede ocurrir.

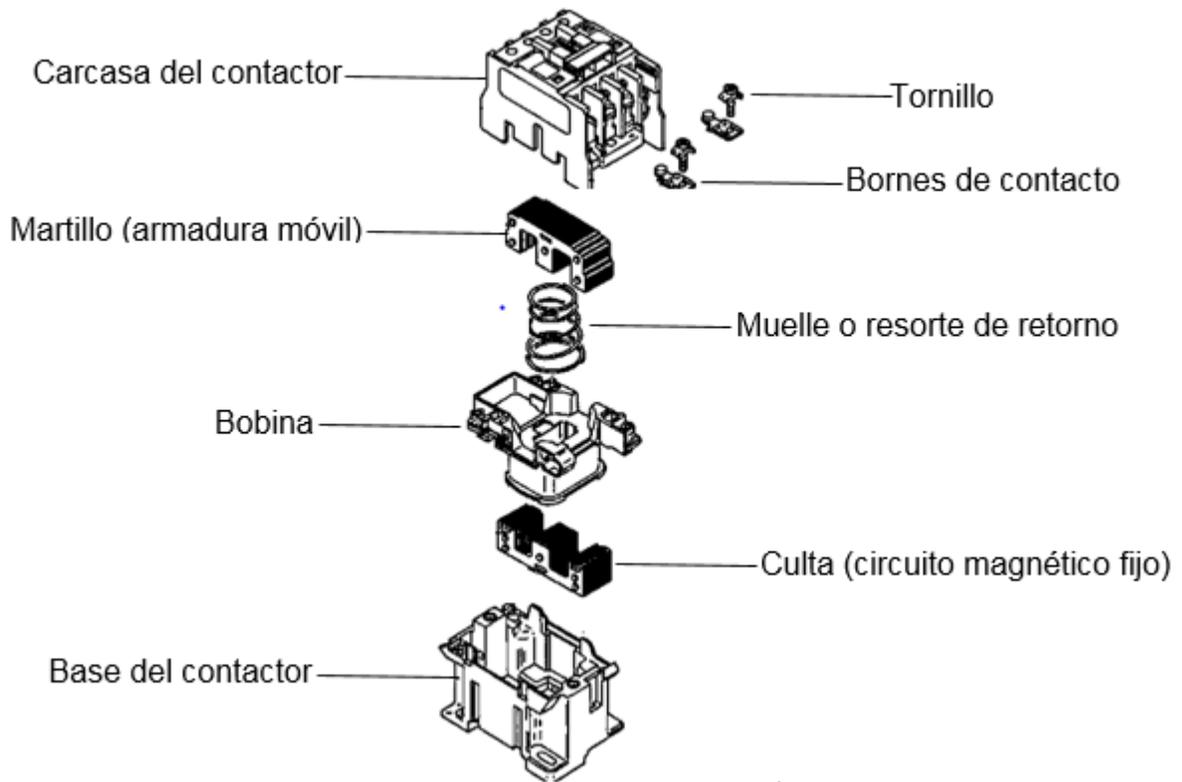


Figura 2-11 Componentes principales de un interruptor electromagnético.

**Imagen adaptada de internet, se localizan en la siguiente dirección electrónica http://temporizadoressebastian.blogspot.mx/2011_06_01_archive.html*

2.6.3 Aislamiento

Fallo de aislamiento puede causar una corriente de cortocircuito entre dos conductores. Sobre corriente genera sobrecalentamiento y permite que el interruptor de circuito o fusible para abrir. Un mal aislamiento también puede causar un sobrecalentamiento (Huda y Taib 2013a).

En la Figura 2-12 se muestra un diagrama de las principales fallas en los CCM.

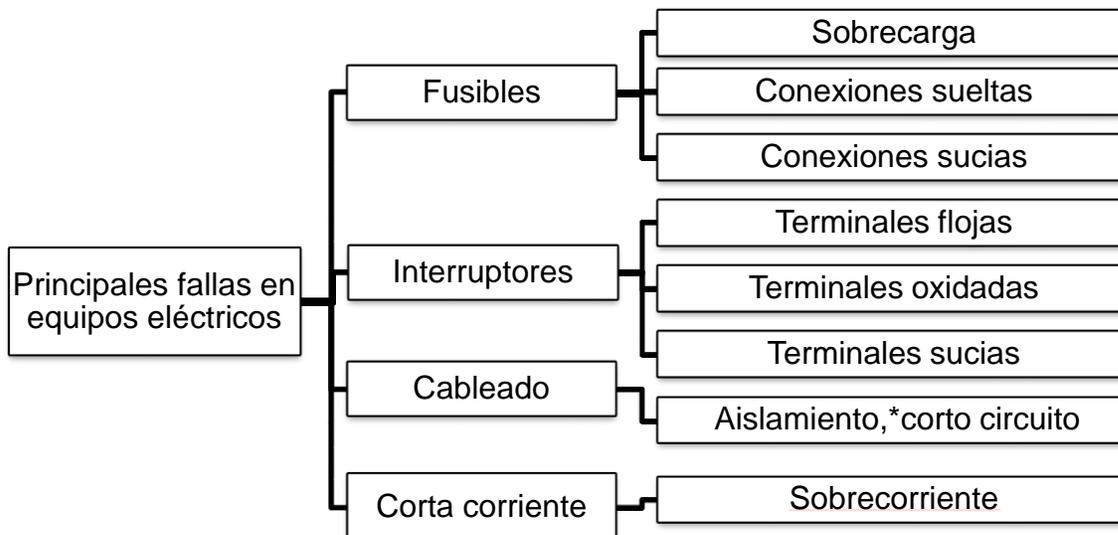


Figura 2-12 Principales fallas en equipos eléctricos.

Las imágenes infrarrojas permiten obtener información de los equipos que no puede ser vista en una imagen digital. En la Figura 2-13 se muestra la fotografía del interruptor con su respectiva imagen infrarroja.

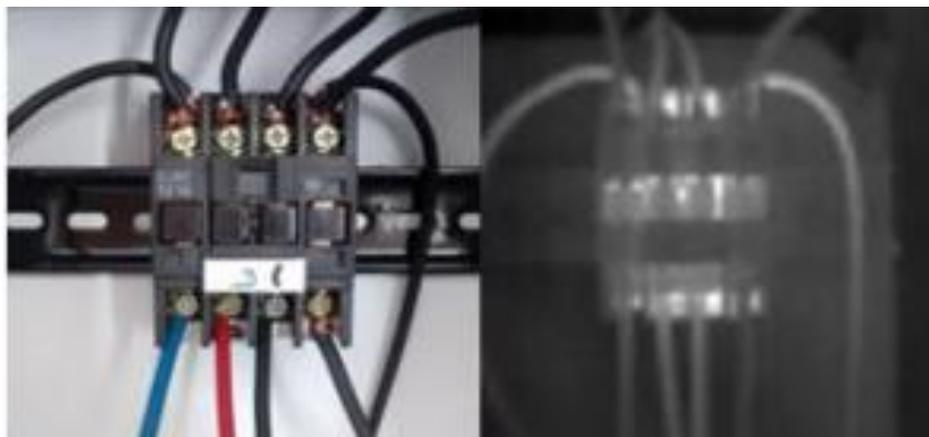


Figura 2-13 Imagen del equipo con su respectiva imagen infrarroja.

Por lo general, una vez extraídas las regiones de interés se trabaja con la clasificación de la falla en el componente eléctrico y el nivel de defecto que se identifica mediante el control de su *Delta T* (ΔT).

Para evaluar el nivel de gravedad de una falla, existe el estándar dado por la Asociación Internacional de Pruebas Eléctricas (NETA), el cual es ampliamente utilizado en referencia de las especificaciones de los equipos eléctricos utilizando el criterio *Delta T* como se muestra la Tabla 2-2. El criterio ΔT de un componente se define como un aumento en el valor de la temperatura por encima de la temperatura de un valor de referencia, que es típicamente la temperatura ambiente, la temperatura de un componente similar bajo la misma condición o la temperatura máxima admisible del componente. De acuerdo con Jadin et al. 2014 este estándar es uno de los más recomendables.

Sin embargo, algunos termografistas prefieren hacer su propia tabla de especificaciones de pruebas basado en sus experiencias en lugar de utilizar los estándares disponibles como lo es el caso de (Balaras y Argiriou 2002; Huda y Taib 2013b).

Tabla 2-2 Criterio Delta T de acuerdo al estándar NETA.

Prioridad	ΔT entre componentes similares (°C).	ΔT arriba de la temperatura ambiente.	Acción recomendada
4	1-3	1-10	Posible deficiencia
3	4-15	11-20	Indica deficiencia probable, reparar cuando el tiempo lo permita
2	-	21-40	Monitorear hasta que se realice la corrección
1	>15	>40	Discrepancia importante; reparar inmediatamente

3. METODOLOGÍA

Esta sección muestra la metodología que se utiliza para la detección y clasificación de las fallas. En primer lugar se describe la construcción del prototipo para la adquisición de imágenes y su calibración. Posteriormente se describe el tablero donde se realizan las pruebas y el protocolo de experimentación, finalmente se explica el algoritmo de detección de fallas utilizado para la segmentación y clasificación de las mismas. El desarrollo de esta investigación se resume en 5 etapas, dichas etapas se muestran en el diagrama de la Figura 3-1.

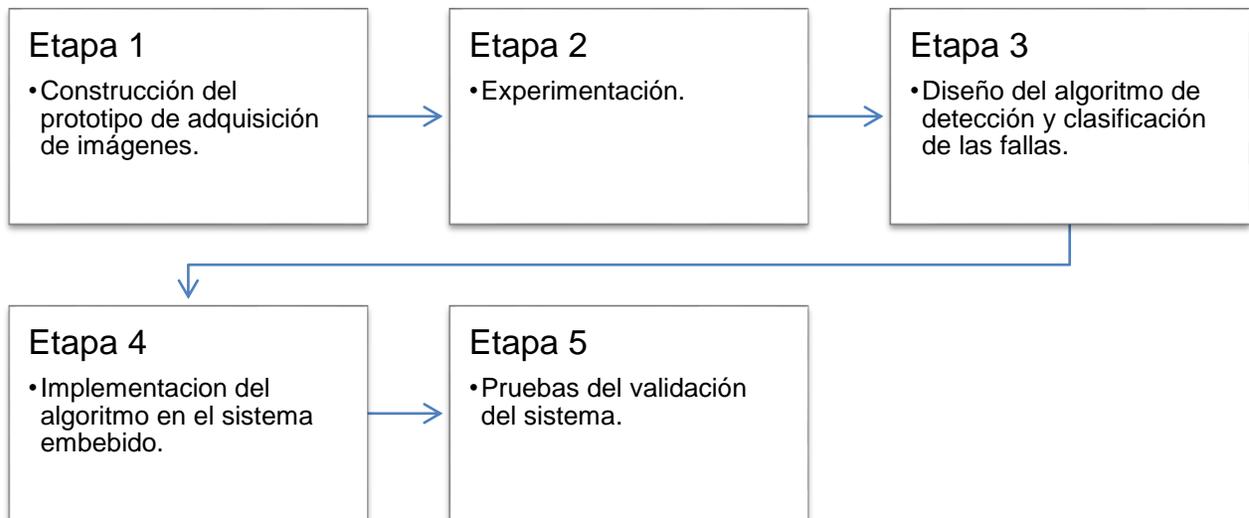


Figura 3-1 Diagrama de metodología.

3.1 Construcción del prototipo de adquisición de imágenes.

La definición de sistema embebido consiste en un sistema electrónico de procesamiento programado para realizar funciones o tareas para un objetivo específico (Aceves y Ramos 2012).

En prototipo propuesto se utiliza un sistema embebido para la adquisición de imágenes, realización de las operaciones de adquisición y procesamiento de imágenes infrarrojas en mismo dispositivo.

Los componentes principales para este proyecto son tres:

- 1) El sistema embebido, se trabajó con una tarjeta de desarrollo Beaglebone Black (BBB).
- 2) La cámara térmica (IR).
- 3) La pantalla de cristal líquido LCD (por sus siglas en inglés *Liquid Crystal Display*) para la visualización de la interfaz del procesamiento.

Los requerimientos de este sistema son la captura de la imagen infrarroja, procesamiento y visualización de los resultados obtenidos en el procesamiento.

3.1.1 Hardware

En la Figura 3-2 se visualiza la distribución e interconexión de los elementos del sistema. Para este prototipo la primera etapa consiste en la adquisición de la imagen mediante el sensor de infrarrojos FLiR Dev KIT-13233 que envía datos a la tarjeta embebida BBB, una vez que la información se encuentra en la tarjeta se organiza en forma matricial para desplegarse como imagen en la pantalla LCD. La siguiente etapa consiste en la captura de la imagen a analizar, por lo que el usuario utilizando la pantalla LCD indica la toma de la imagen que se desea procesar y esta se guarda en la BBB. Por lo que en la figura mencionada anteriormente se puede ver una flecha bidireccional entre la pantalla LCD y la BBB, ya que la transferencia de datos se realiza desde la pantalla LCD a la BBB y viceversa.

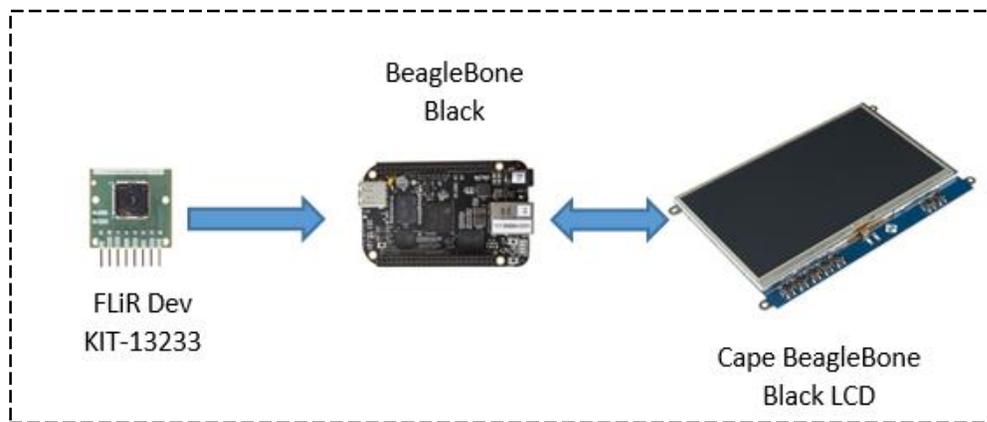


Figura 3-2 Distribución e interconexión de los elementos del sistema.

El sistema que se propuso fue implementado sobre un procesador ARM Cortex A8, con frecuencia de operación de 1 GHz, que viene incluido sobre la microcomputadora BBB. La tarjeta Beaglebone Black, tiene puertos GPIO que son utilizados para la adquisición de señales desde el sensor infrarrojo. Se describe a continuación las características principales de los componentes principales.

3.1.1.1 Sensor infrarrojo FLiR Dev KIT-13233

El FLiR Dev KIT-13233 incluye una cámara infrarroja de onda larga Lepton® (LWIR), se muestra en la Figura 3-3.

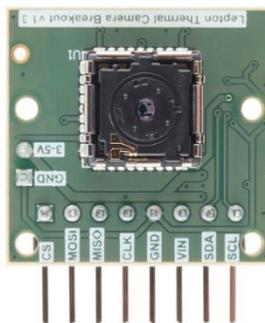


Figura 3-3 FLiR Dev KIT-13233.

El sensor dentro del FLiR Lepton utiliza una matriz de microbolómetro no refrigerado. Los microbolómetros se componen de materiales que cambian la resistencia a medida que se calienta por la radiación infrarroja. Al medir esta resistencia, se puede determinar la temperatura del objeto que emite la radiación y crear una imagen en falso color que codifica los datos. Este kit es compatible con herramientas de desarrollo basado en ARM por lo que es compatible con la tarjeta de desarrollo Beaglebone Black. En la

Tabla 3-1 se muestran las descripciones de las terminales del kit numerados de izquierda a derecha.

Tabla 3-1 Descripción de las funciones de las terminales.

Terminales		Descripción
Nombre	Número	
SCL	8	Interfaz de control del reloj de la cámara, I2C
SDA	7	Interfaz de control de datos de la cámara, I2C
VIN	6	Entrada de alimentación 3-5 V
GND	5	Tierra común
SPI CLK	4	Video a través del puerto SPI esclavo reloj
SPI MISO	3	Video a través del puerto SPI esclavo datos de salida
SPI MOSI	2	Video a través del puerto SPI esclavo datos de entrada
SPI CS	1	Video a través del puerto SPI chip de selección, activa baja

3.1.1.2 Beaglebone Black

Beaglebone Black es una tarjeta de sistema embebido de bajo costo, de código abierto. Boot Linux en menos de 10 segundos y empezar a trabajar en el desarrollo del procesador Sitara™ ARM Cortex-A8 AM335x en menos de 5 minutos con un solo cable USB. Las capacidades de BBB pueden ampliarse usando tableros llamados "capes" que se pueden conectar en dos cabeceras de expansión de doble fila de 46 pines de la BBB. En este prototipo se utiliza esta característica para poder conectar la de pantalla LCD.



Figura 3-4 Tarjeta de desarrollo BeagleBone Black.

En la Tabla 3-2 se muestran las características técnicas de la BBB, la IR FLiR Dev Kit y la pantalla LCD utilizadas en este prototipo.

Tabla 3-2 Descripción de las características del hardware utilizado.

Hardware	Especificaciones	Costo
Beaglebone Black	CPU ARM Cortex-A8 O.S. Debian	\$1,430.33
Cámara Infrarroja	Resolución 80x60 pixeles Sensibilidad térmica <50 mK Rango espectral 8 μ m a 14 μ m Interfaces I2C/SPI	\$5,200.00
Pantalla LCD	Display: 5 pulgadas lcd, 800*480 píxeles touch: capacitiva 5 botones de usuario , 1 botón RESET , 1 botón	\$2,000.00
	Total	\$8,330.33

**El costo puede variar de acuerdo al proveedor, mostrado en pesos mexicanos, no incluye costo de envío.*

En la Figura 3-5 se muestra la imagen de los componentes que forman parte el sistema diseñado para captura y procesamiento de las imágenes termográficas.

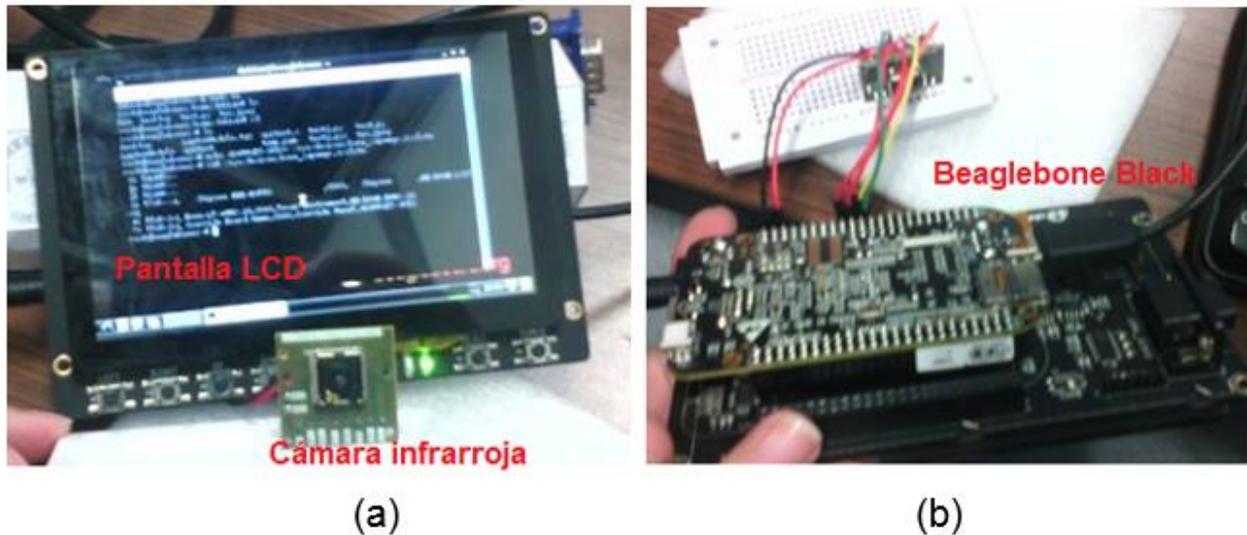


Figura 3-5 (a) Vista frontal, (b) vista posterior del sistema implementado.

Para la LCD se realiza la conexión utilizando la doble fila de 46 pines de la BBB y después se realizan las siguientes conexiones de la cámara al BBB:

- CS al pin 17 (SPI0_CS0)
- MISO al pin 21 (SPI_D0)
- CLK al pin 22 (SPI0_CLK)
- GND al pin 1 (DGND)
- VIN al pin 3 (VDD_3V3)
- SDA al pin 20 (I2C2_SDA)
- SCL al pin 19 (I2C2_SCL)

3.1.2 Software

Este sistema embebido utiliza un sistema operativo Debian basado en Linux y el proceso de captura de imágenes se desarrolla utilizando la plataforma QT con el lenguaje de programación C.

El usuario es capaz de adquirir imágenes infrarrojas para ser analizada posteriormente. Las imágenes tienen un tamaño de 60 x 80 pixeles y se guardan en un archivo extensión **.pgm**. Debido al tamaño de las imágenes se calcula guardar hasta un máximo 51,200 imágenes en la memoria.

La Figura 3-6 se muestra la interfaz de captura de imágenes, donde el usuario a través de una interfaz visualiza lo que se encuentra capturando nuestra cámara, al presionar el botón “Nuevalmagen” se guarda automáticamente y se pueden seguir capturando imágenes hasta cerrar este programa.



Figura 3-6 Interfaz de captura de imágenes.

3.1.3 Calibración

El siguiente paso fue la calibración, la cual consiste en comparar la salida del instrumento bajo prueba con la salida de un instrumento de precisión conocida, cuando la cantidad medida se aplica a ambos instrumentos (Morris y Langari 2012).

- El termómetro patrón que se va a utilizar es de mercurio con rango de -20 °C a 50 °C.

Se midieron 10 temperaturas diferentes las cuales van desde los 25 °C hasta los 35°C. Para cada temperatura se tomaron 2 medidas donde se comparan las lecturas del termómetro patrón con los pixeles extraídos de la imagen capturada.



Figura 3-7 Montaje de calibración a) cámara infrarroja b) termómetro de mercurio.

En la Tabla 3-3 se muestra la recopilación de los datos obtenidos. En la primera columna aparece la temperatura medida directamente con el termómetro de mercurio seguido de los niveles de gris extraídos de las regiones de interés. La quinta columna nos muestra el promedio de las tres extracciones. Con esto se calcula la ecuación característica y finalmente el error entre el valor obtenido y el valor calculado con la ecuación.

Tabla 3-3 Recopilación de los datos de la calibración.

Temperatura	Pixel1	Pixel2	Promedio	Desviación estándar	Calculado	Error
25	46	57	51.5	7.77	25.17	0.70
26	65	65	65	0.00	26.20	0.79
27	80	76	78	2.82	27.19	0.73
28	86	87	86.5	0.70	27.84	0.54
29	110	96	103	9.89	29.10	0.36
30	113	99	106	9.89	29.33	2.21
31	127	119	123	5.65	30.63	1.18
32	147	139	143	5.65	32.15	0.49
33	162	153	157.5	6.36	33.26	0.80
34	168	167	167.5	0.70	34.02	0.08
35	181	182	181.5	0.70	35.09	0.27

Se encontró la relación de las temperaturas medidas con el termómetro. Seguidamente se realizó entonces una gráfica con los valores y se determina la ecuación característica del comportamiento del sistema. En la Figura 3-8 se muestra la gráfica que relaciona la temperatura medida (eje y) con respecto a los niveles de grises medidos (eje x) de los datos obtenidos en la calibración denotados por la línea color roja. También se muestra la línea azul punteada de tendencia del sistema de la cual se obtuvo a partir de la ecuación de la línea de tendencia que se muestra en la ecuación (3-1).

$$y = 0.0763(x) + 21.247 \quad (3-1)$$

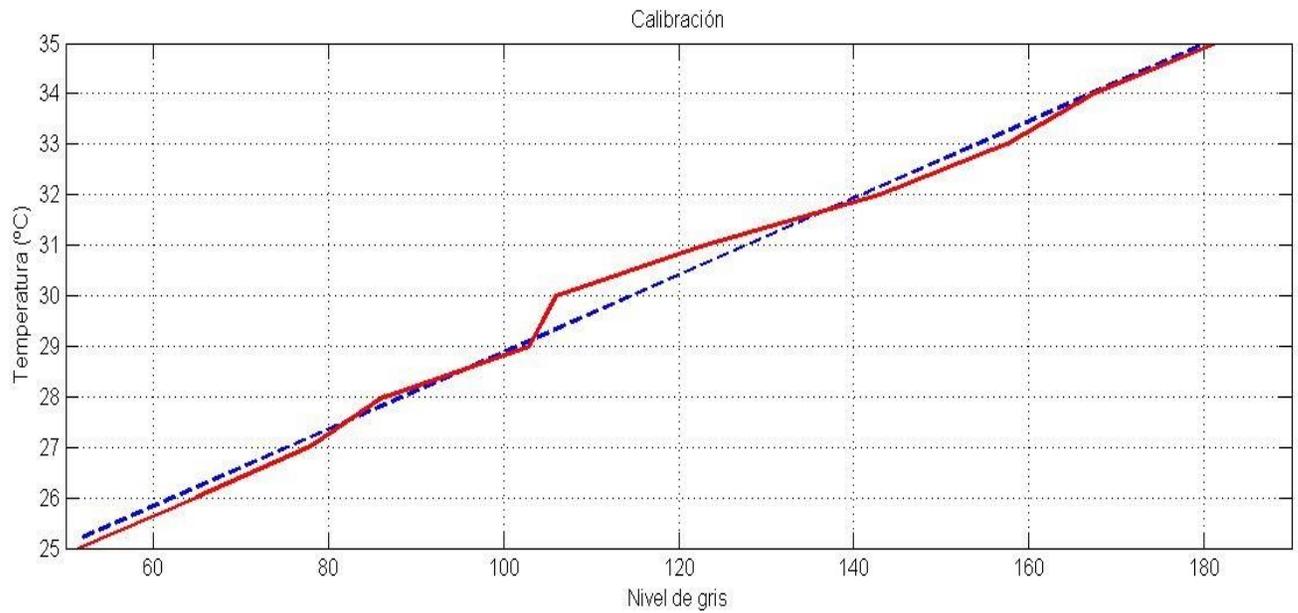


Figura 3-8 Grafica de temperatura medida con niveles de gris.

Al hacer la comparativa de los valores medidos y los valores calculados utilizando la ecuación encontrada se obtuvo un error máximo aproximado a 2.2 %. La desviación estándar máxima es de 9.8 niveles de gris lo que da un máximo en temperatura $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$. Esta ecuación sirve para asignar un valor de temperatura a cada pixel de la imagen.

3.2 Experimentación.

El tiempo para realizar cada prueba es de 45 minutos con una captura de imágenes cada 5 minutos. Se realizaron 5 pruebas por cada falla, además se realizaron las pruebas en funcionamiento nominal del equipo. En la Tabla 3-4 se muestra la matriz de experimentos realizados.

Tabla 3-4 Matriz de experimentos

Equipos	Pruebas		
Fusibles (Fu)	Nominal	Sobrecarga	Terminales sueltas
Interruptor(I)	Nominal	Terminales flojas	Terminales oxidadas
Corta corriente(CC)	Nominal	Sobrecarga	

3.2.1 Protocolo de toma de imágenes

Para asegurar la repetitividad de los experimentos se sigue el siguiente protocolo de toma de imágenes (Figura 3-9), la distancia entre las instalaciones eléctricas (objetivo) y cámara térmica de infrarrojos es de entre 0.2 m y 0.5 m. La temperatura ambiente se encuentra a $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

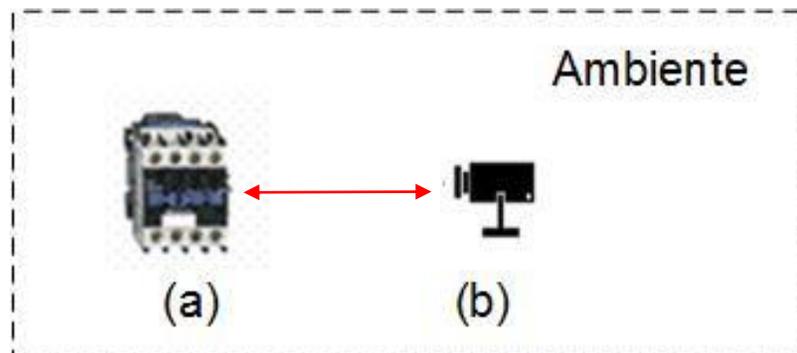


Figura 3-9 Protocolo de toma de imágenes (a) objetivo, (b) cámara.

3.2.2 Descripción de los componentes del tablero.

Los elementos del tablero de control al que se le aplican las pruebas está diseñado para un motor trifásico de 3/4 hp. Se realiza un paro y arranque de acuerdo al diagrama de control mostrado en la Figura 3-10, donde:

- L y N son las terminales de línea y neutro, respectivamente, de la toma eléctrica a 110V para el control del interruptor electromagnético.
- NC es un botón de control normalmente cerrado.
- NO es un botón de control normalmente cerrado.
- M es el contacto auxiliar del interruptor electromagnético.
- K es el contacto principal del interruptor electromagnético.

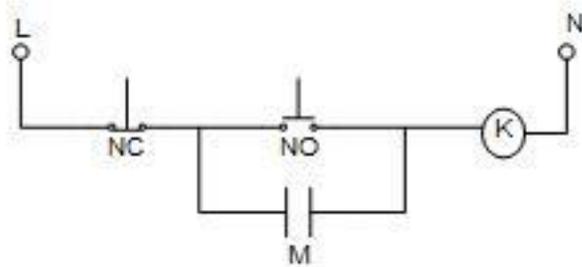


Figura 3-10 Diagrama de control de paro y arranque.

En el diagrama de fuerza mostrado en la Figura 3-11 se observa con claridad como se conectan todos los elementos de la instalación.

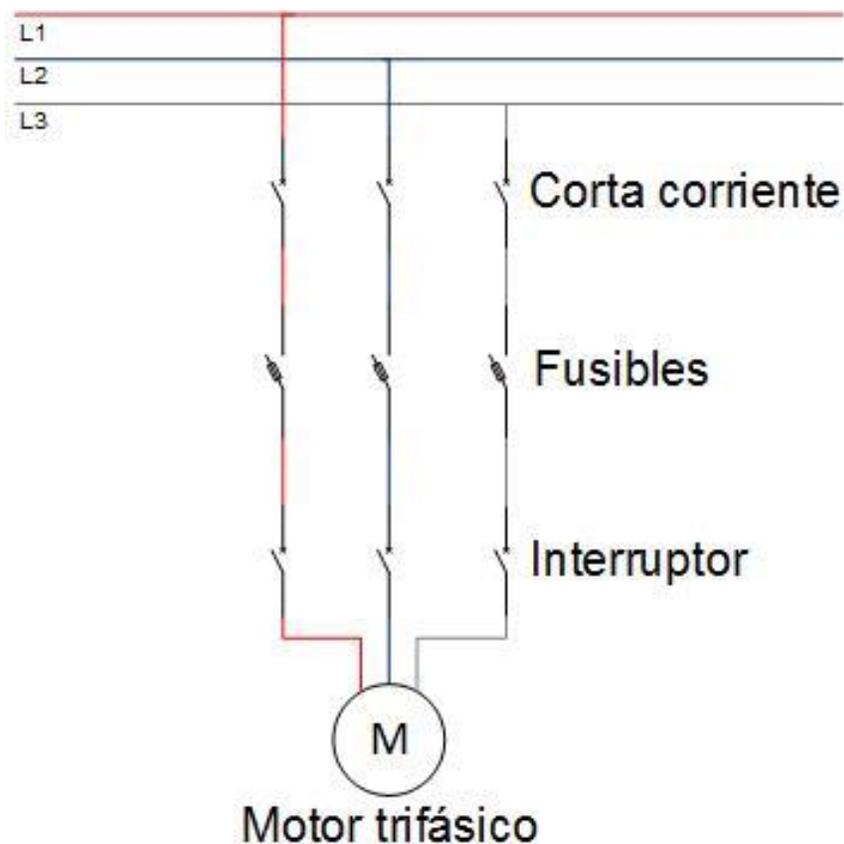


Figura 3-11 Diagrama de fuerza del tablero de pruebas.

3.2.3 Inducción de fallas

Esta parte se centra en la descripción de cómo se implementan las fallas en los componentes del CCM. Se da una descripción detallada de cómo se indujeron cada una para realizar la experimentación.

Fusibles (Fu)

- Sobrecarga: Se conectó un reóstato (resistencia variable) en paralelo para demandar más corriente, esto, desde el punto de vista de los componentes del tablero eléctrico, emularía una sobrecarga en el motor. Es decir, el motor en vacío que consume 3.2 A se conectó el reóstato y otra carga eléctrica que consumió 2.5 A extras, lo que permitió a emular un mayor consumo por parte del motor.

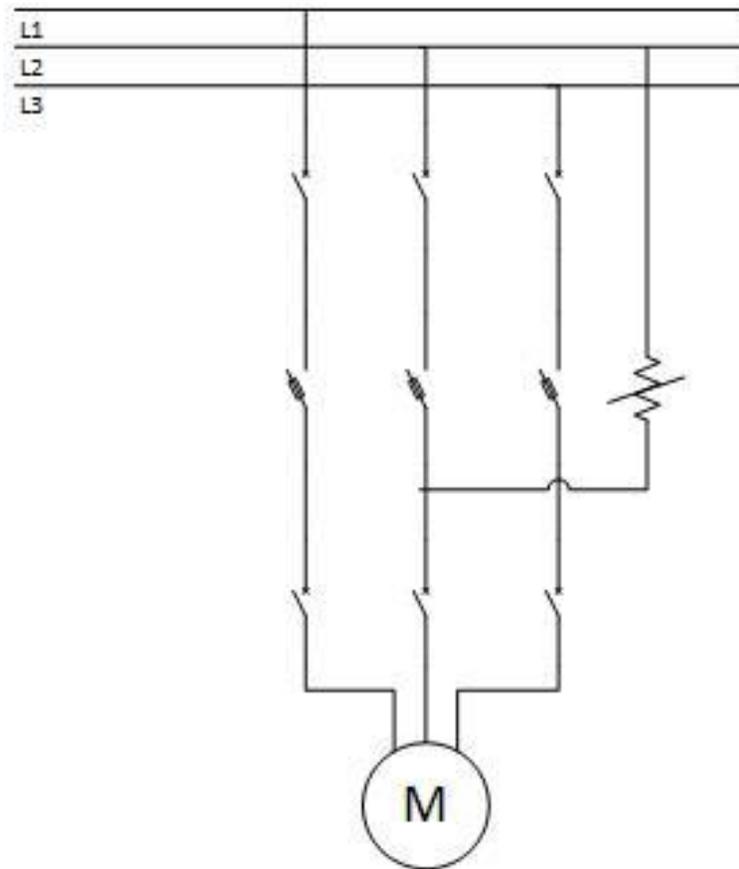


Figura 3-12 Diagrama de fuerza de experimento de sobrecarga con un reóstato en paralelo.

- Conexiones sueltas: esta prueba se realizó aflojando los tornillos que sostienen los cables que van de los fusibles a otros componentes.

Corta corriente (CC)

- Sobre corriente: para este caso se realizó la experimentación utilizando la misma metodología para generar una sobrecarga presentada en los fusibles.

Interruptores (I)

- Terminales flojas: esta prueba se realizó aflojando los tornillos que sostienen los cables que van del interruptor a otros componentes.
- Terminales oxidadas: para este caso se sumergieron los tornillos y los bornes de contacto en un contenedor con agua y sal y se dejaron oxidar por tres semanas hasta obtener el resultado mostrado en la Figura 3-13.

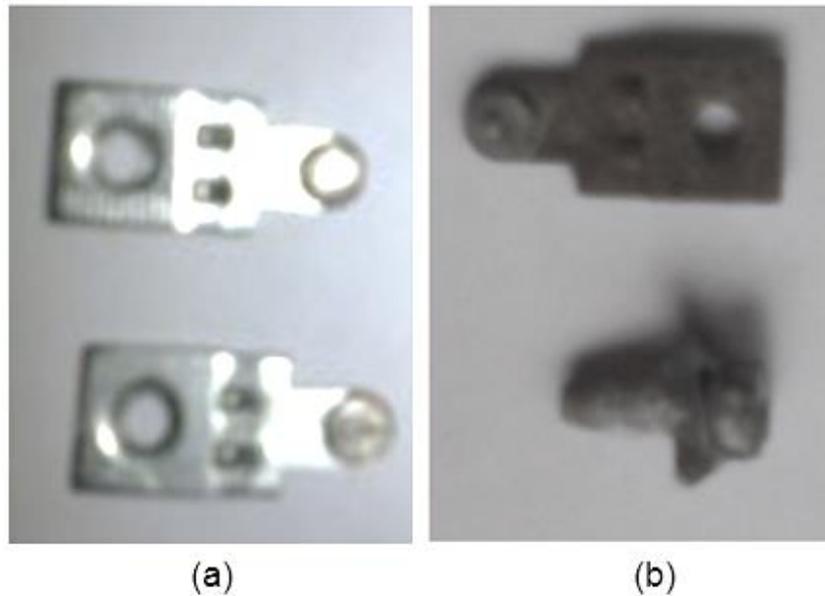


Figura 3-13 (a) bornes de contacto normales (b) tornillo y bornes de contacto oxidados.

3.3 Sistema automático de diagnóstico de fallas.

En este tercer paso de la metodología propuesta que corresponde al algoritmo de detección de fallas consiste en la segmentación de las imágenes utilizando morfología matemática. En la Figura 3-14 se muestra el diagrama de pasos generales que se utilizan para el sistema automático de segmentación y clasificación de fallas, se comienza con la captura o selección de la imagen a procesar, se encuentra la región del área de interés ROI (segmentación), después se extraen los datos específicos de esa región, en este caso la temperatura máxima de la región para posteriormente clasificar la falla.

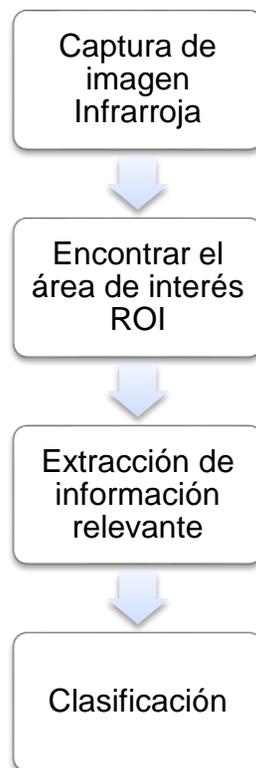


Figura 3-14 Sistema automático para la segmentación y diagnóstico de fallas.

3.3.1 Segmentación de la imagen

El propósito de la segmentación en este caso es encontrar dentro de las ROI las secciones donde se localiza la falla y aislarla de los otros componentes. Con la segmentación es posible obtener la temperatura máxima de la región con falla y su localización, la cual es necesaria para alcanzar el diagnóstico.

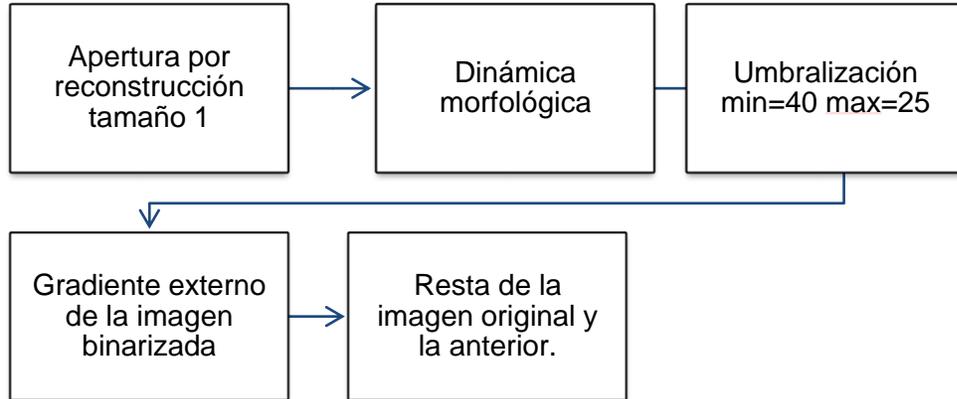


Figura 3-15 Algoritmo de detección de fallas.

En la Figura 3-15 se muestra el algoritmo de detección de fallas utilizado. Al llegar al paso de umbralización se obtiene la región de interés (segmentación) y al analizar la temperatura máxima de la ROI se puede proceder a la clasificación de Nominal o Falla de los equipos.

3.3.2 Clasificación de fallas

En este trabajo basado en la experiencia de inspección de los equipos y en concordancia con el trabajo presentado en (Huda y Taib 2013b), las condiciones de los equipos se clasifican en dos clases, nominal y falla, de acuerdo con el nivel de prioridad, que se menciona en la Tabla 3-5 con sus correspondientes acciones recomendadas. Donde los niveles de prioridad I y II se consideran como condición de falla y el nivel de prioridad III se mide como condición normal que quiere decir que el equipo se encuentra en funcionamiento nominal.

Tabla 3-5 Clasificación de las condiciones de equipo eléctrico.

Condición	Prioridad	ΔT Arriba de la temperatura ambiente.	Acción recomendada
Falla	I	$\Delta T \geq 15$	Discrepancia importante; reparar inmediatamente
	II	$5 < \Delta T < 15$	Indica deficiencia probable; reparar cuando el tiempo lo permita
Nominal	III	$\Delta T \leq 5$	Sobrecalentamiento de menor importancia; revisar en el próximo mantenimiento

3.4 Implementación del algoritmo de detección de fallas en el sistema embebido

A continuación se describen los pseudocódigos que se utilizan para la implementación del algoritmo final en el sistema embebido.

Pseudocódigo: dinámica morfológica de máximos

```
// Imagen de entrada: ime
// Imagen de trabajo: imt
// Imagen de salida: ims
```

```
Max <- Máximo valor de gris de la imagen ime
```

```
Min <- Mínimo valor de gris de la imagen ime
```

```
i=0
```

```
Mientras i < Max-Min hacer:
```

```
    i=i+1
```

```
    imt <- ime - i //Sustracción de la imagen ime por una constante i
```

```
    imt <- R(ime, imt) //Reconstrucción de imt en ime
```

```
    imt <- ime-imt // Sustracción de ime menos imt
```

```
    imt <- Thresh (imt, i,i) // Umbral de imt al valor i. El objeto queda a valor «1»
```

```
    ims <- ims + imt
```

```
Fin mientras
```

Pseudocódigo: interfaz

```
// Imagen de entrada: img  
// Imagen de trabajo: imt  
//Imagen de salida: ims
```

```
imt<-leer imagen  
imt<-apertura(img,1) //Realizar apertura por reconstrucción tamaño 1 a imt  
imt<-dinámica(imt) //Realizar dinámica morfológica de máximos imt  
temp=0.0763(Max) + 21.247 //Obtenemos la temperatura máxima del área segmentada  
imt <-Thresh (imt, 40,255) // Umbral de min=40 max=25  
imt<-gradiente(imt)//Gradiente externo de la imagen binarizada  
ims <- img-imt //Sustracción img-imt.
```

```
//Clasificación de la falla
```

```
Si temp ≤ 25 entonces:
```

```
    Imprimir funcionamiento nominal
```

```
Si no:
```

```
    Imprimir Alerta: falla
```

```
Fin si
```

```
Mostrar img ,ims
```

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En la Figura 4-1 se muestra el montaje de las pruebas experimentales que se realizaron, el sistema embebido con la cámara se trabaja de manera móvil.

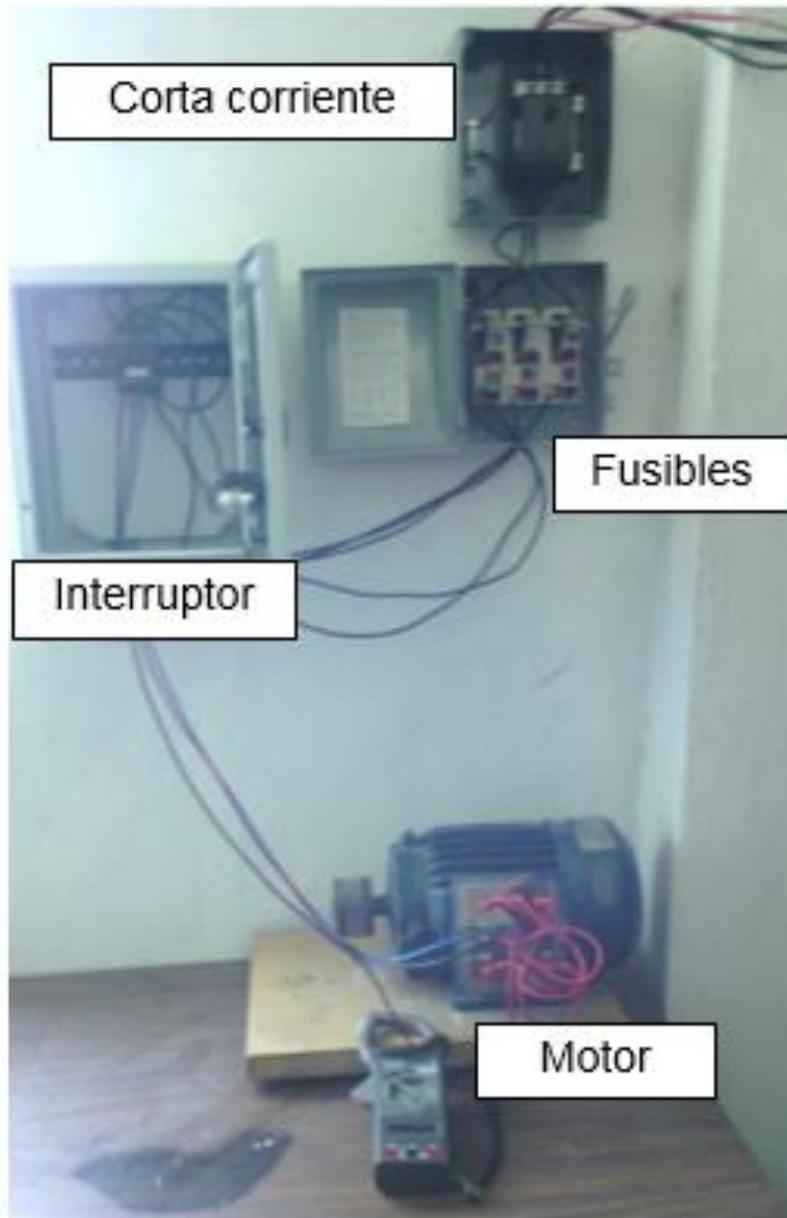


Figura 4-1 Montaje del experimento.

Siguiendo el protocolo de toma de imágenes que se menciona en la sección 3.2.1 se realiza la captura de las imágenes. En la Figura 4-2 se muestra un ejemplo de la captura de la imagen en el experimento de funcionamiento nominal del interruptor, se puede ver al operario sosteniendo el sistema de captura de imágenes térmicas a una distancia de entre 0.2 a 0.5 m.



Figura 4-2 Captura de imágenes térmicas en el interruptor.

4.1 Funcionamiento nominal.

En la Figura 4-3 se muestra un ejemplo del algoritmo de detección de fallas mostrando cada una de sus etapas en el experimento fusible nominal, los recuadros en rojo señalan las ROI con el fin de observar a detalle que sucede durante los pasos del algoritmo, el recuadro azul nos muestra regiones no relevantes.

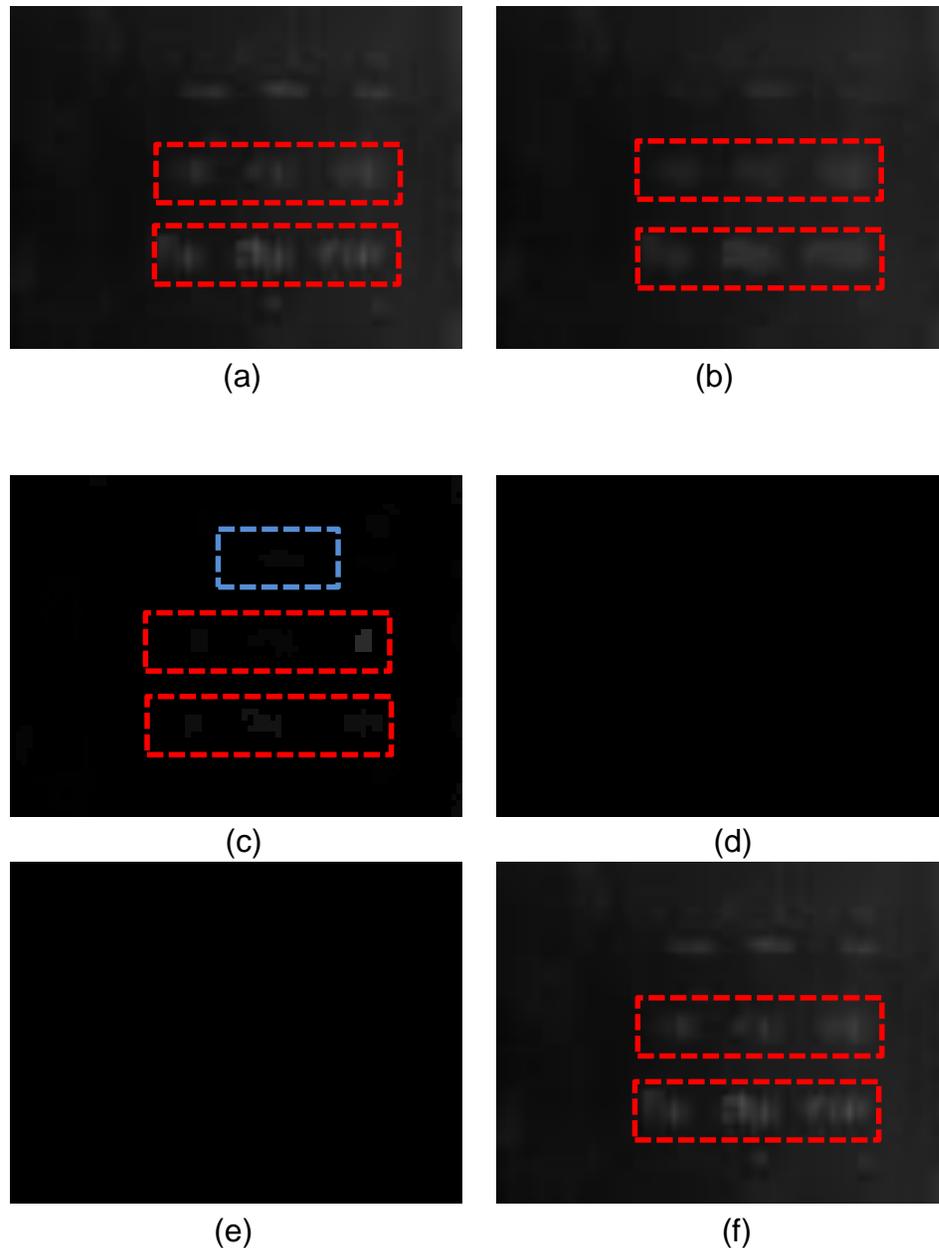


Figura 4-3 (a) Imagen con falla de terminal floja, (b) Apertura por reconstrucción tamaño 1, (c) Dinámica morfológica, (d) Umbralización min=45 max=255, (e) Gradiente externo de la imagen binarizada, (f) Resta de la imagen original y la anterior.

Las imágenes de los equipos en su funcionamiento nominal muestran una distribución homogénea de los niveles de gris en sus ROI por lo que sus temperaturas son homogéneas, por lo que al correr el algoritmo no se detecta ninguna región. En la Figura 4-4 se puede en los tres equipos en funcionamiento nominal. Se marcó con los recuadros rojos punteados las zonas de interés que se estudiarán en cada una de ellas.

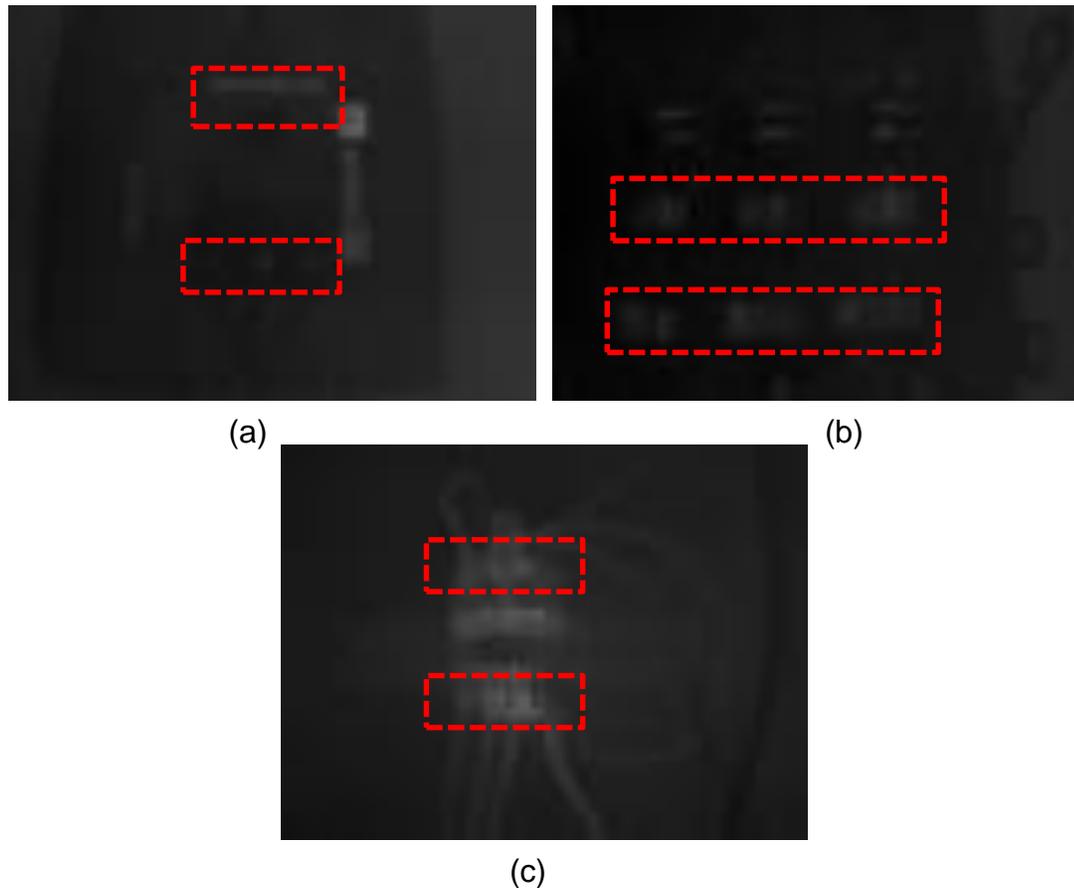


Figura 4-4 Imágenes infrarrojas de equipos en funcionamiento nominal (a) Corta corriente (b) Fusibles, (c) Interruptores.

La implementación del algoritmo realizada para fusibles en funcionamiento nominal muestra una alerta verde con el texto “Funcionamiento nominal” y la imagen procesada no muestra ninguna región segmentada. En la Figura 4-5 se muestra la fotografía del sistema embebido y en la Figura 4-6 se ve la impresión de pantalla del mismo caso.

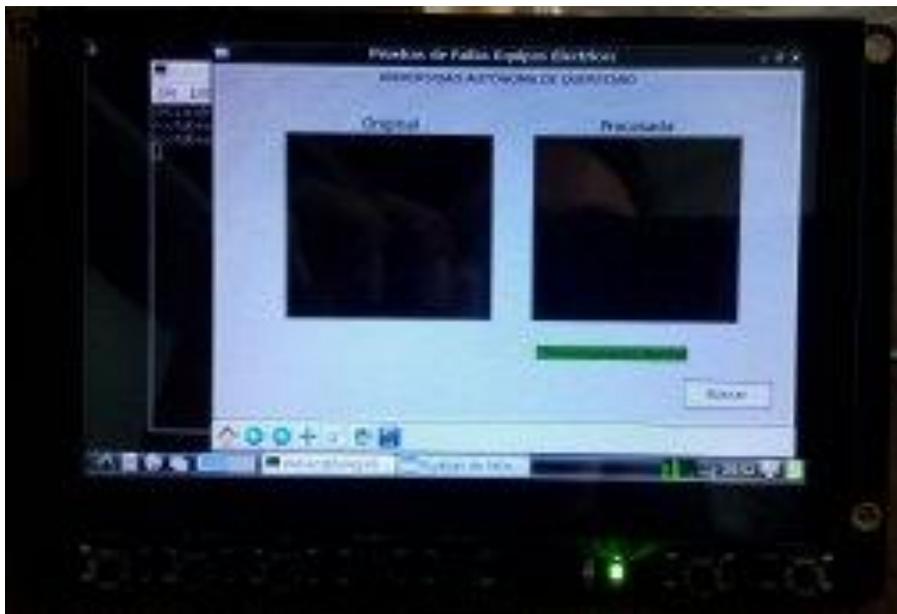


Figura 4-5 Implementación del algoritmo ejemplo fusible funcionamiento nominal fotografía de la pantalla del sistema embebido.

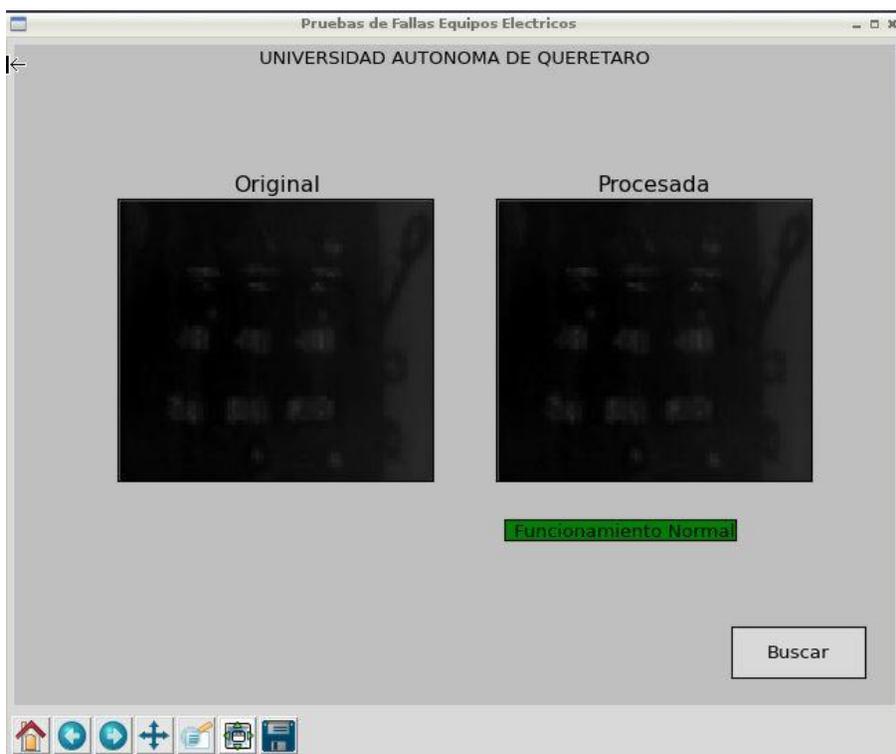


Figura 4-6 Implementación del algoritmo ejemplo fusible funcionamiento nominal, impresión de pantalla.

En las Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9 se muestran las graficas obtenidas del análisis en estado nominal de los tres equipos, en el eje horizontal representa los valores del tiempo en minutos mientras que el eje vertical tenemos la temperatura máxima de la imagen en grados centígrados (°C). El comportamiento de las tres graficas es similar, se tiene un aumento de temperatura que parte de la temperatura inicial a 21 °C hasta llegar cerca del minuto 30 que se llega a la estabilidad térmica donde la temperatura ya no aumenta más, se puede ver claramente que la temperatura en estado nominal no aumenta más de 5 °C en base a la temperatura ambiente.

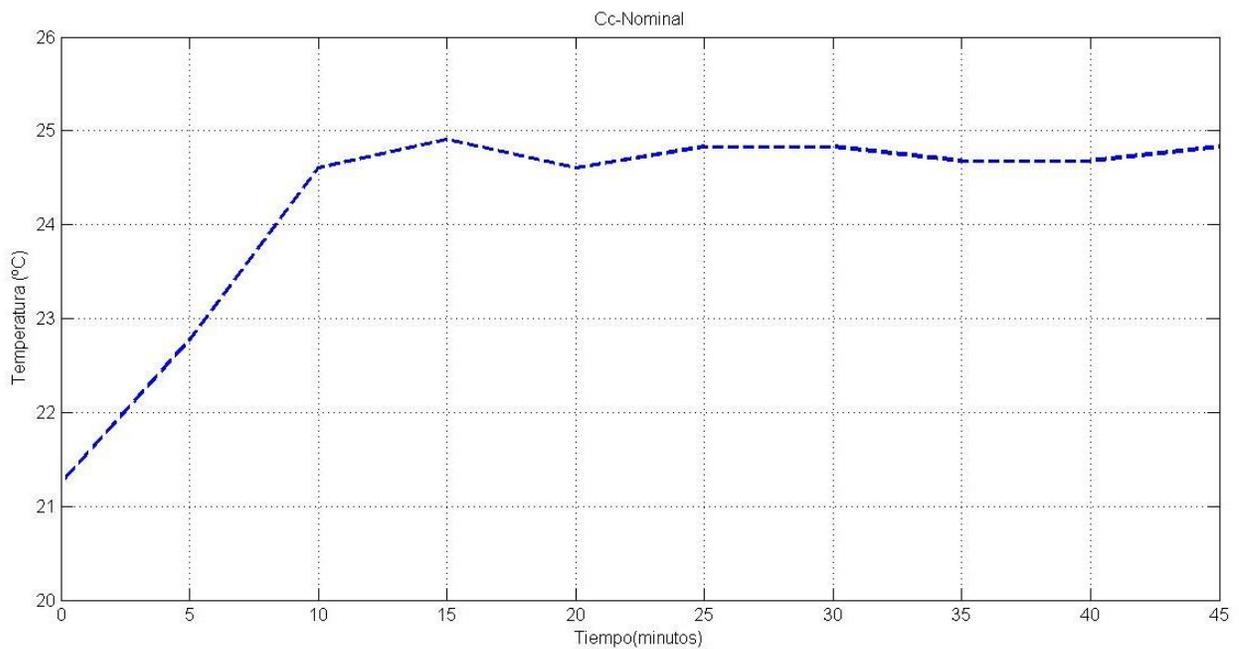


Figura 4-7 Gráfica del análisis del Corta Corriente (CC) en funcionamiento nominal.

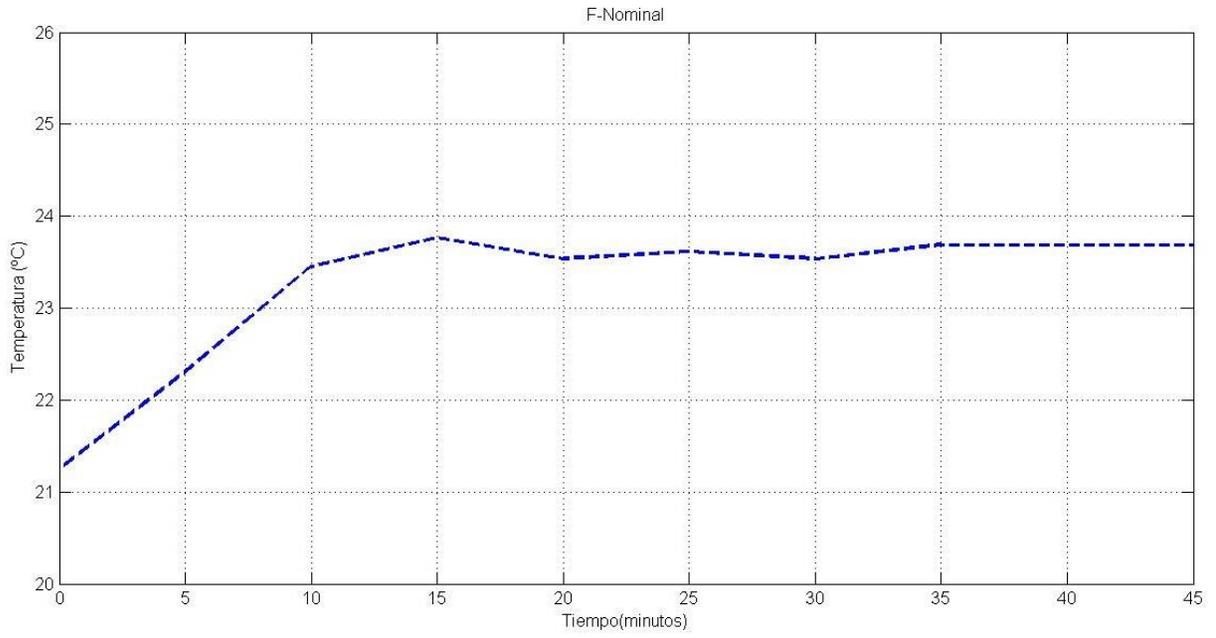


Figura 4-8 Gráfica del análisis del Fusible (F) en funcionamiento nominal.

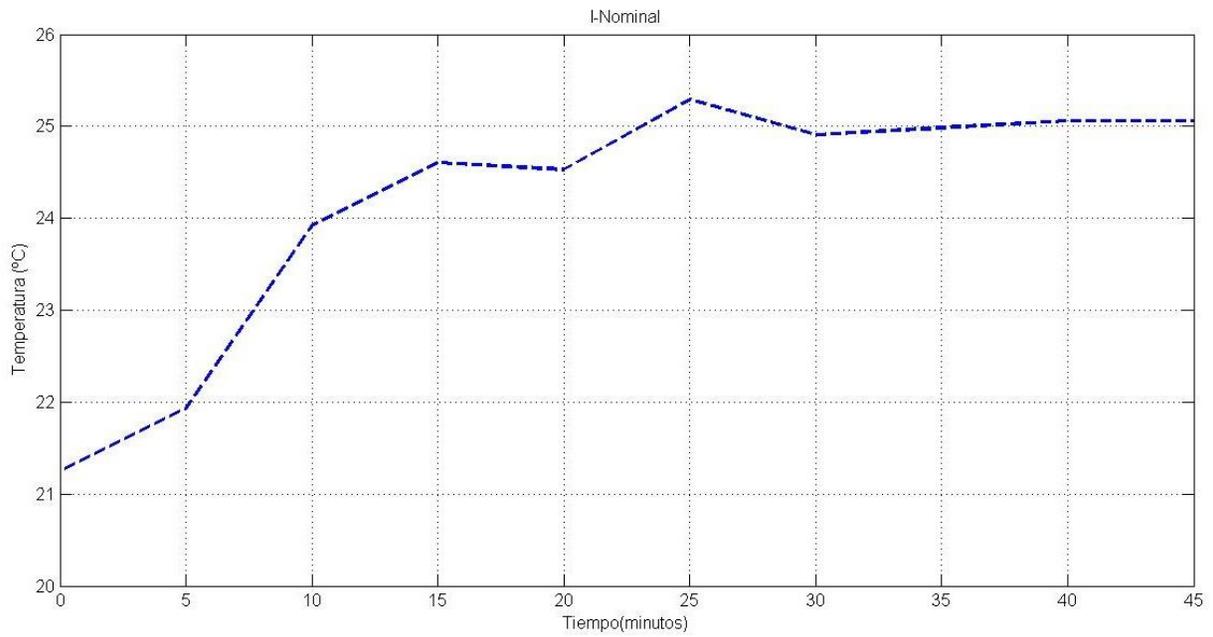


Figura 4-9 Gráfica del análisis del Interruptor (I) en funcionamiento nominal.

4.2 Fallas

En la Figura 4-10 se muestra un ejemplo del algoritmo de detección de fallas mostrando cada una de sus etapas, la falla mostrada corresponde al experimento de terminal floja del interruptor. Los recuadros en rojo señalan las ROI, el recuadro azul nos muestra regiones no relevantes.

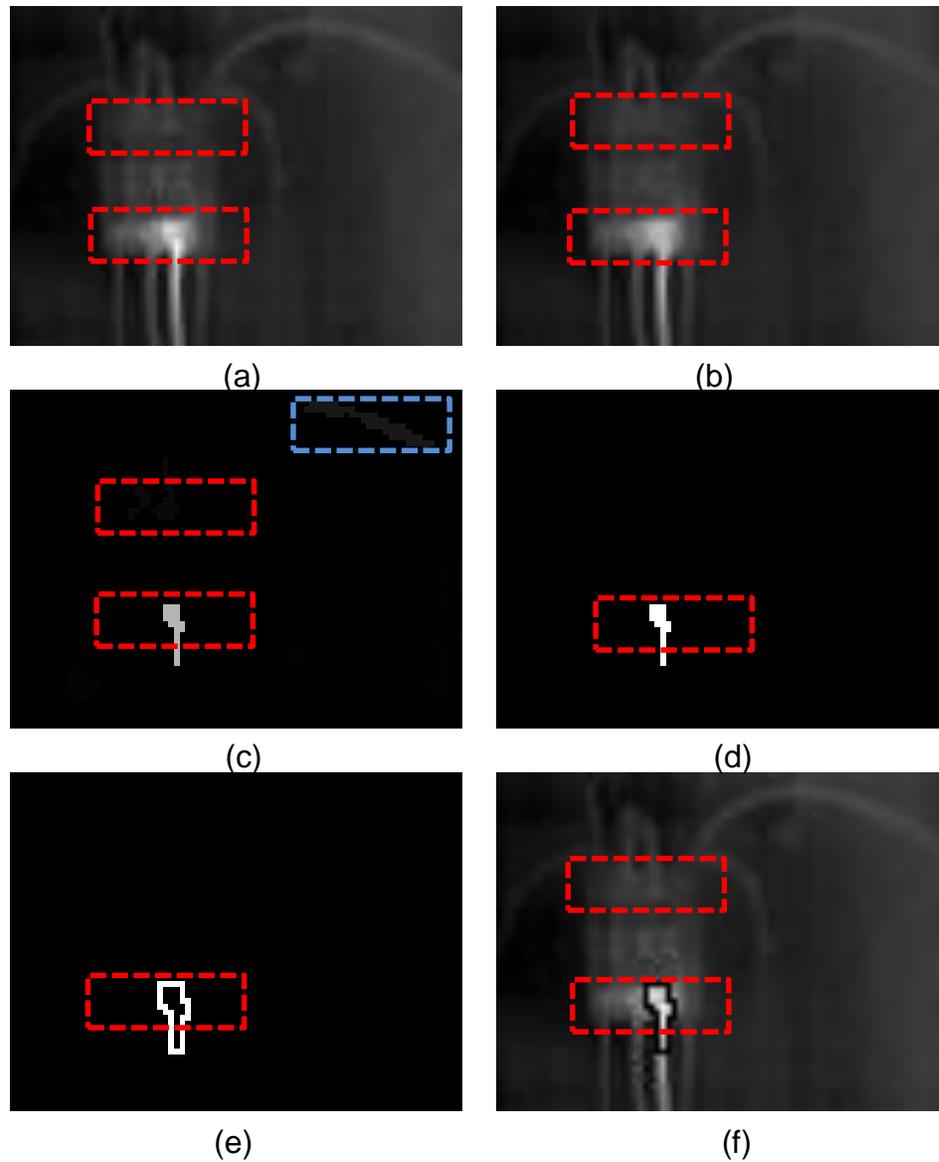


Figura 4-10 (a) Imagen con falla de terminal floja, (b) Apertura por reconstrucción tamaño 1, (c) Dinámica morfológica, (d) Umbralización min=40 max=255, (e) Gradiente externo de la imagen binarizada, (f) Resta de la imagen original y la anterior.

La implementación del algoritmo en el sistema embebido se puede ver en la Figura 4-11 en un elemento con falla manda una alerta en rojo con el texto “Alerta: Falla” y en la imagen procesada muestra la sección segmentada donde se localiza la falla, la impresión de pantalla se ve en la Figura 4-12.



Figura 4-11 Implementación del algoritmo ejemplo interruptor con falla, fotografía del sistema embebido.

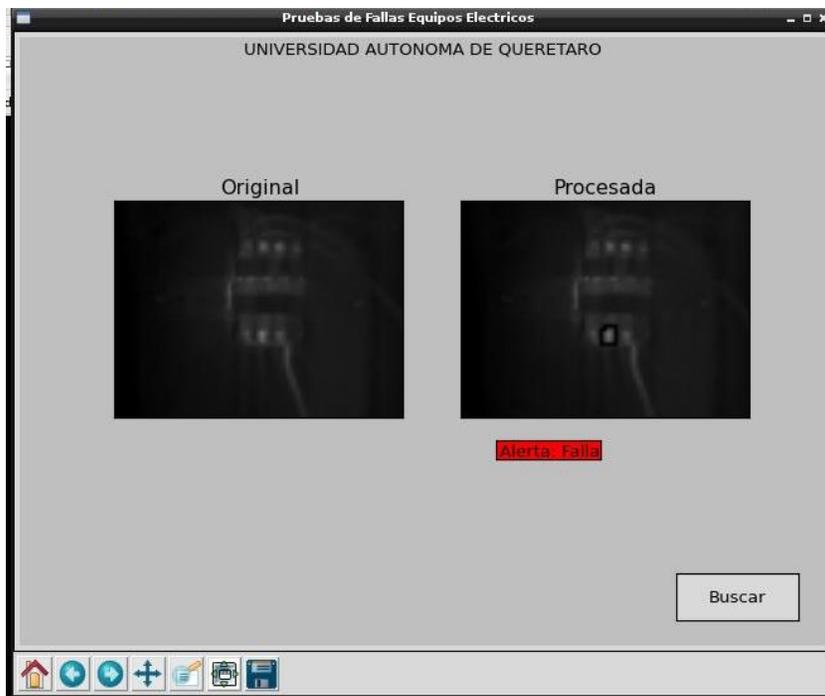


Figura 4-12 Implementación del algoritmo ejemplo interruptor con falla, impresión de pantalla.

4.3 Fallas en Fusibles

Siguiendo el protocolo de toma de imágenes se procede a realizar los experimentos induciendo las fallas, los resultados que se muestran son de las imágenes capturadas una vez transcurridos los 30 minutos para asegurar la estabilidad térmica. La primera falla a inducir es la sobrecarga en el fusible y el corta corriente, en la Figura 4-13 se puede ver el montaje del experimento puesto en marcha para esta falla.

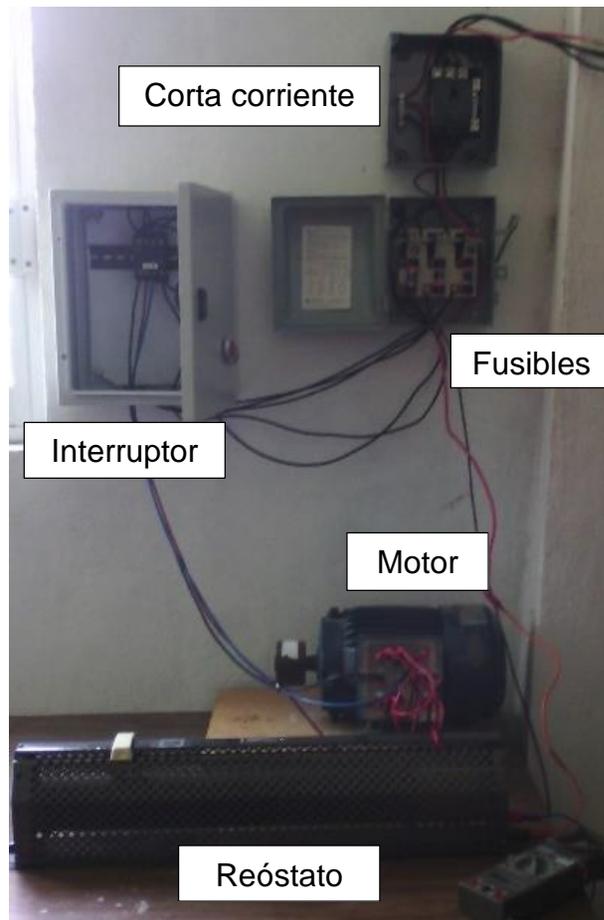


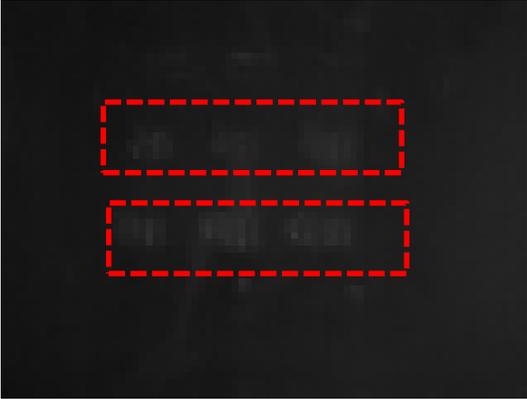
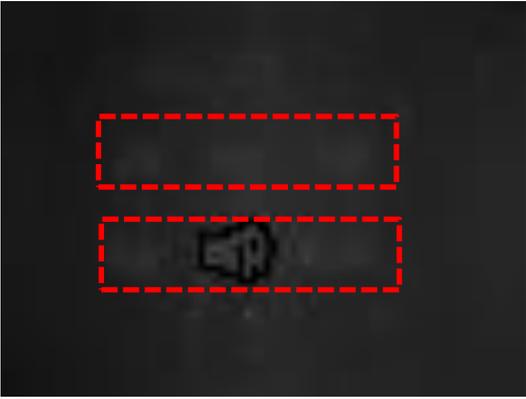
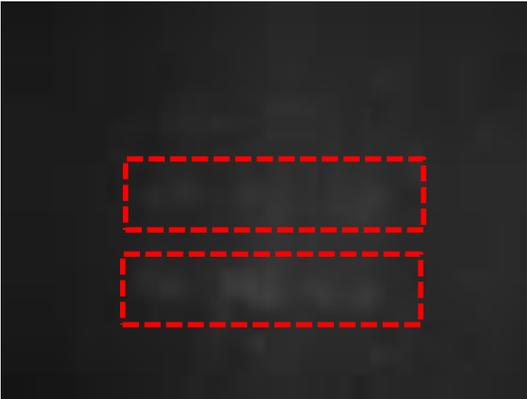
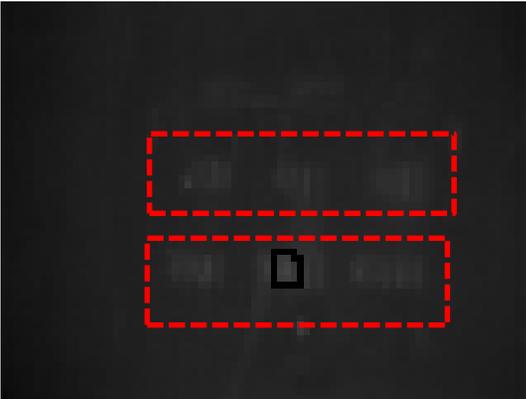
Figura 4-13 Experimento de sobrecarga con un reóstato en paralelo.

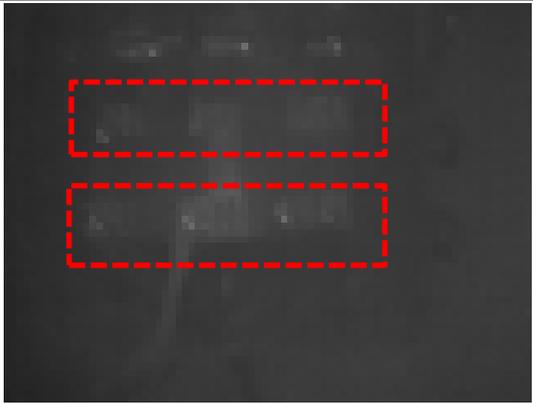
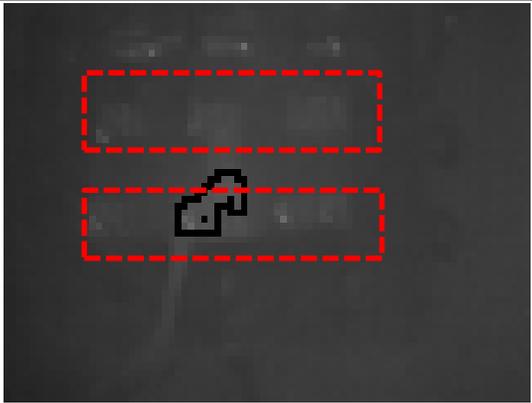
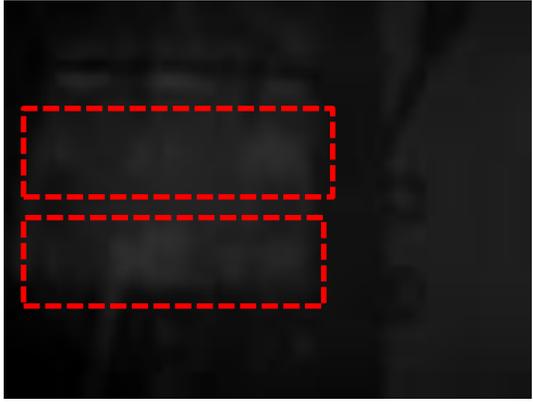
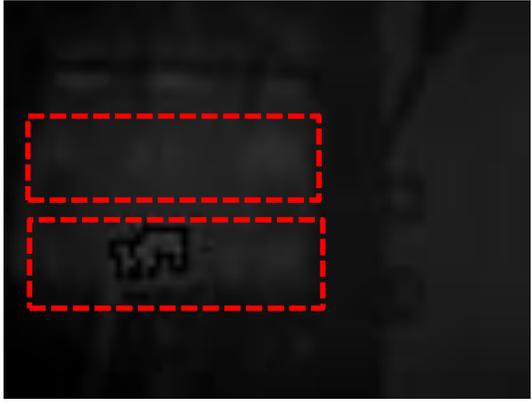
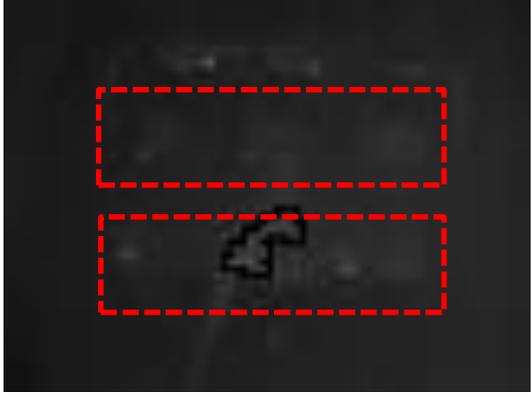
En las secciones 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran las tablas con los resultados obtenidos en la detección de las fallas utilizando el algoritmo propuesto.

4.3.1 Prueba de sobrecarga

En la Tabla 4-1 se muestra la síntesis de los resultados obtenidos en las pruebas de sobrecarga en fusibles.

Tabla 4-1 Reporte resultados en prueba de sobrecarga.

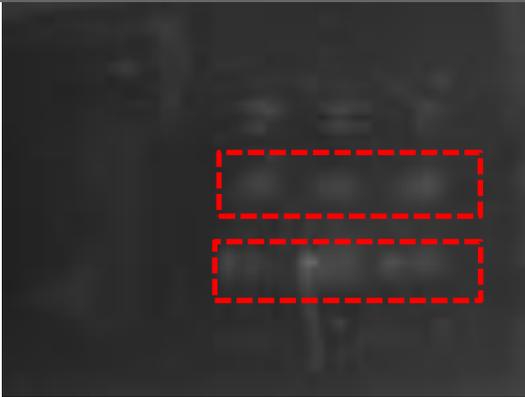
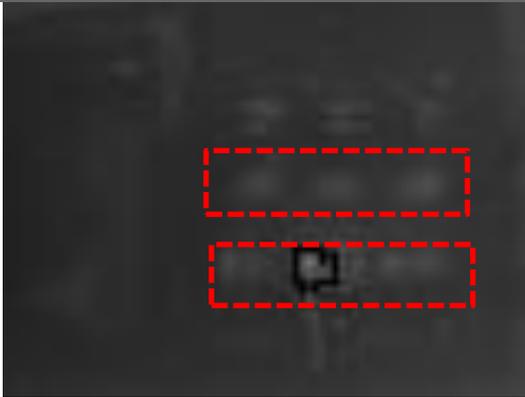
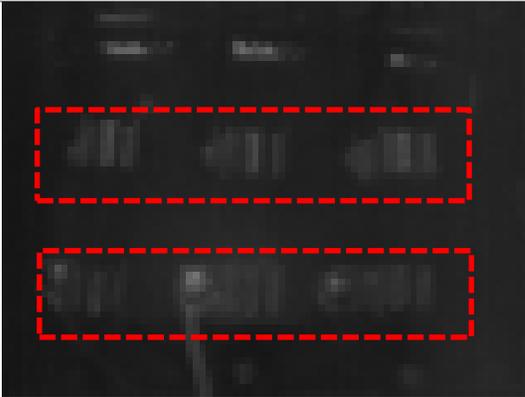
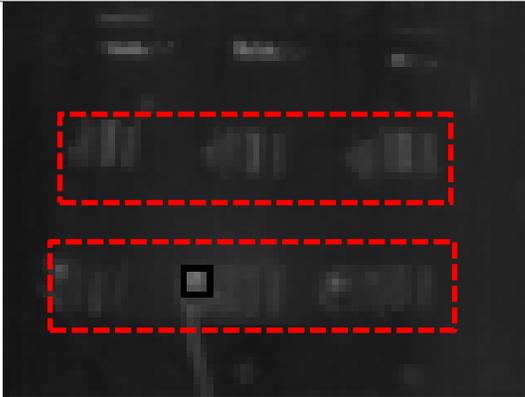
Sobrecarga	Imagen original	Imagen procesada
Prueba 1		
Prueba 2		

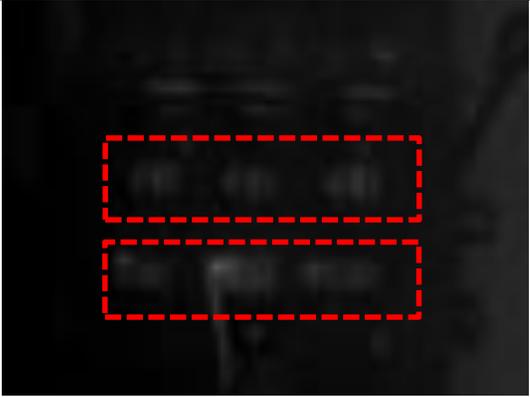
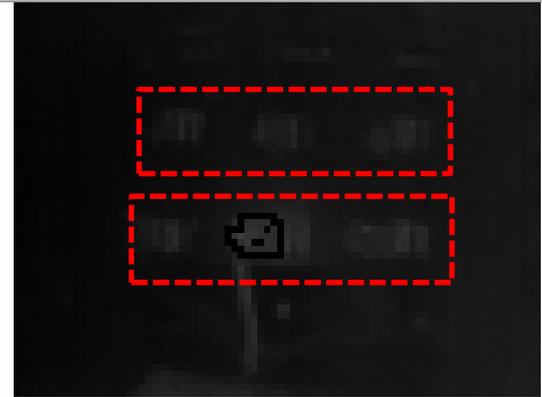
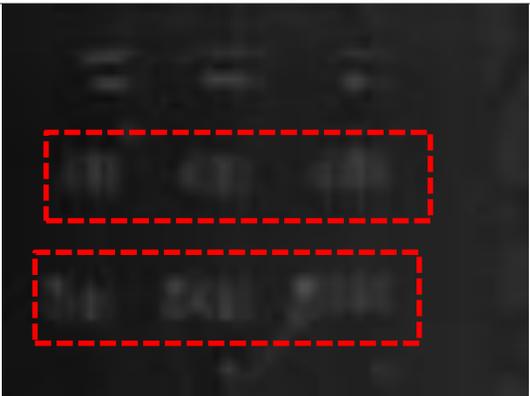
<p>Prueba 3</p>		
<p>Prueba 4</p>		
<p>Prueba 5</p>		

4.3.2 Prueba de terminales sueltas

En la Tabla 4-2 Tabla 4-1 se muestra la síntesis de los resultados obtenidos en las pruebas de sobrecarga en fusibles.

Tabla 4-2 Reporte resultados en prueba de terminales sueltas.

Terminales sueltas	Imagen original	Imagen procesada
Prueba 1		
Prueba 2		

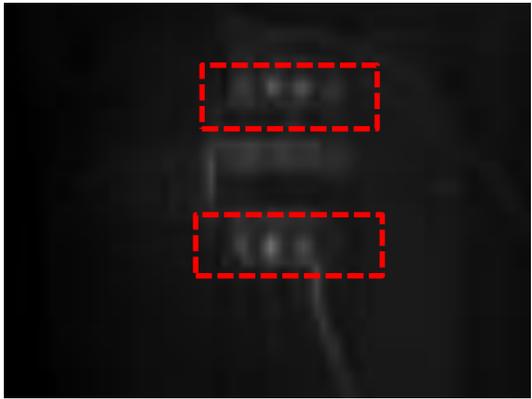
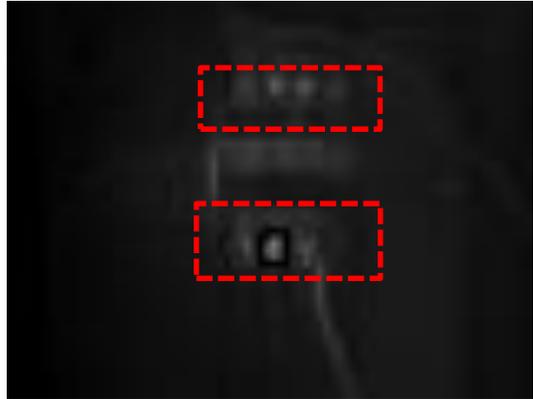
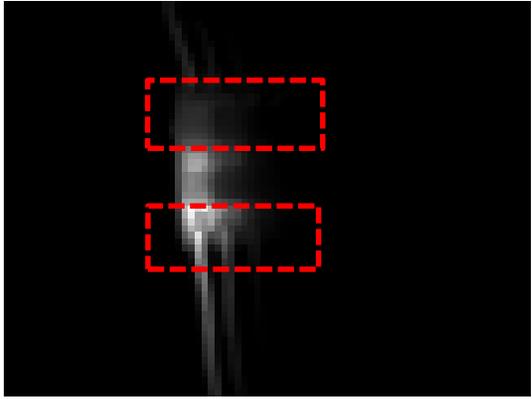
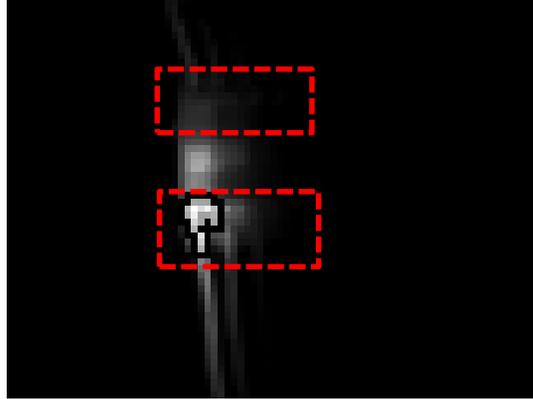
<p>Prueba 3</p>		
<p>Prueba 4</p>		
<p>Prueba 5</p>		

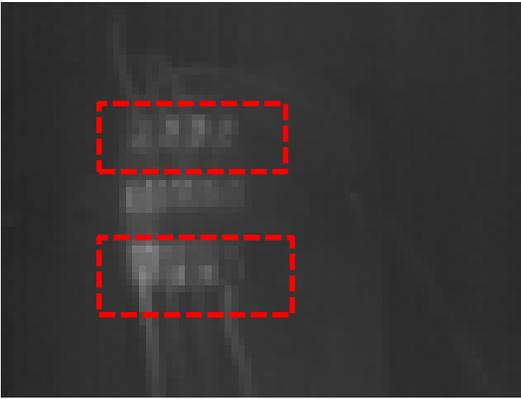
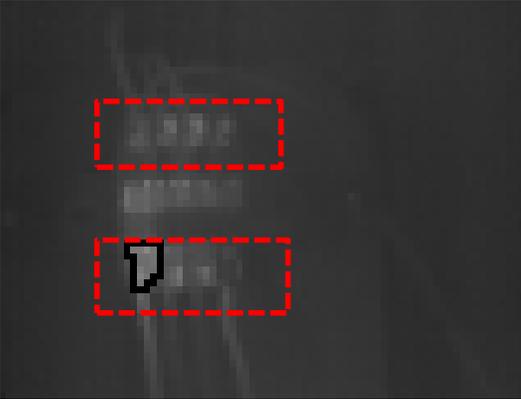
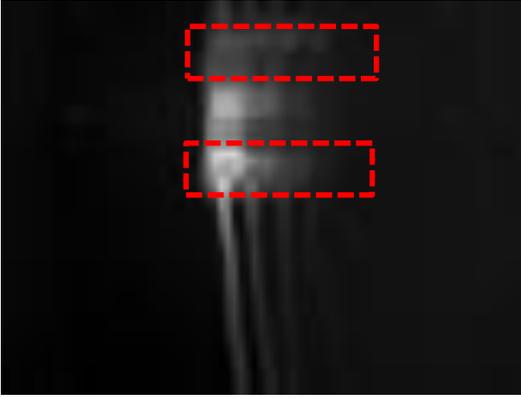
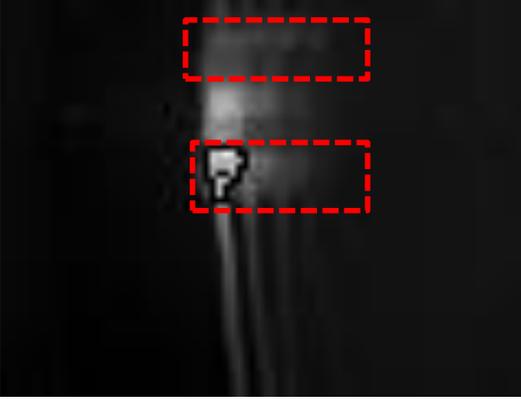
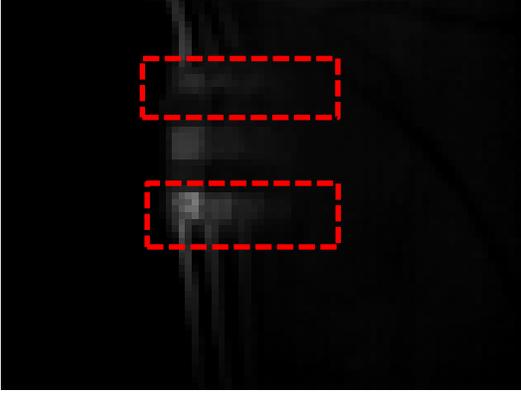
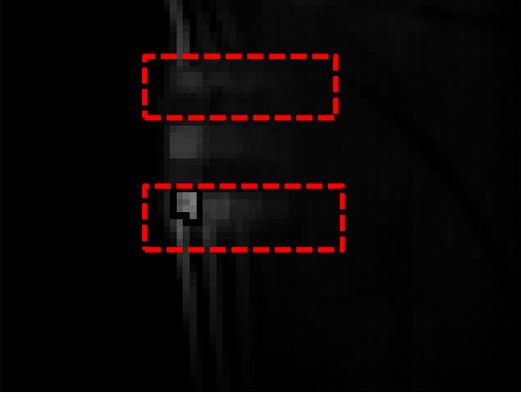
4.4 Fallas en Interruptor

4.4.1 Terminales oxidadas

En la Tabla 4-3 se muestra la síntesis de los resultados obtenidos en las pruebas de terminales oxidadas en el interruptor.

Tabla 4-3 Reporte resultados en pruebas de terminales oxidadas en el interruptor.

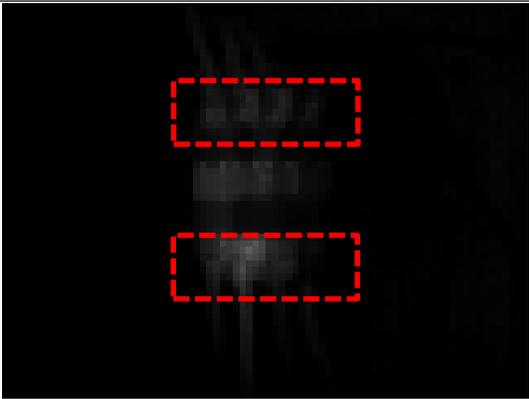
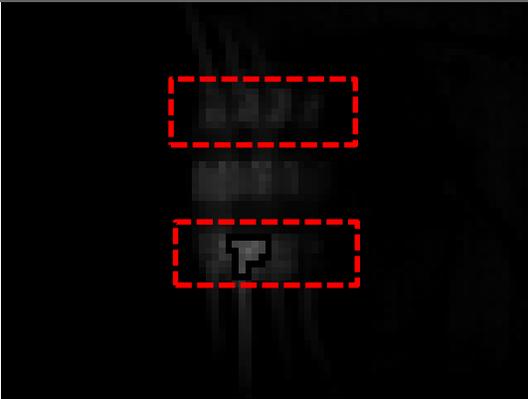
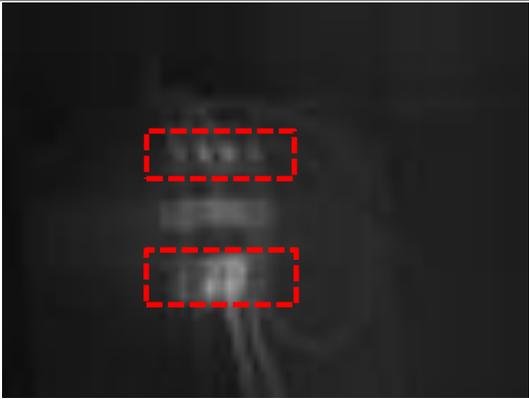
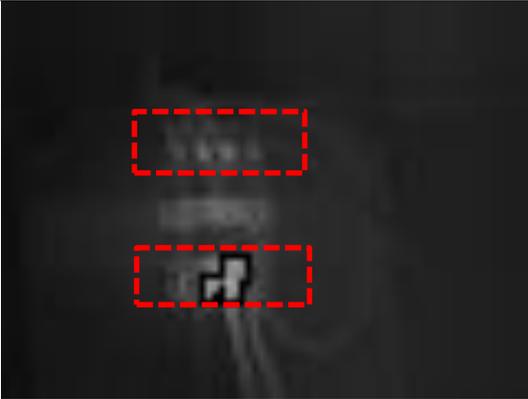
Terminales oxidadas	Imagen original	Imagen procesada
Prueba 1		
Prueba 2		

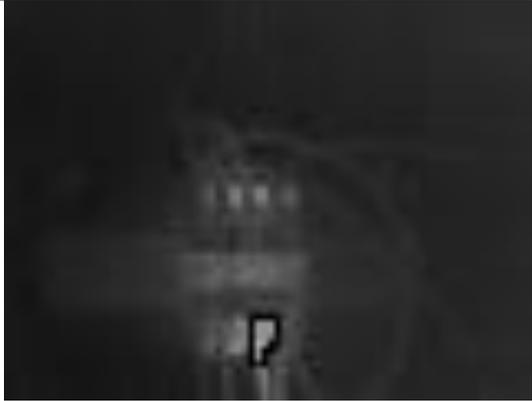
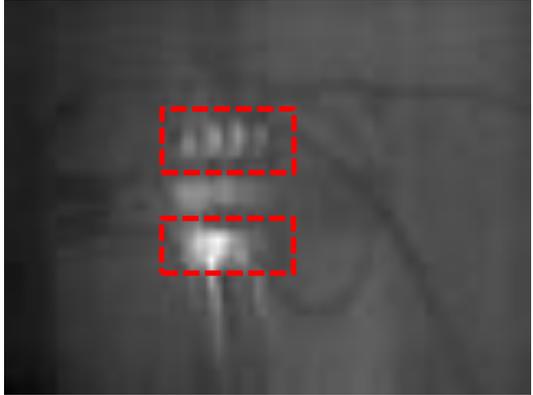
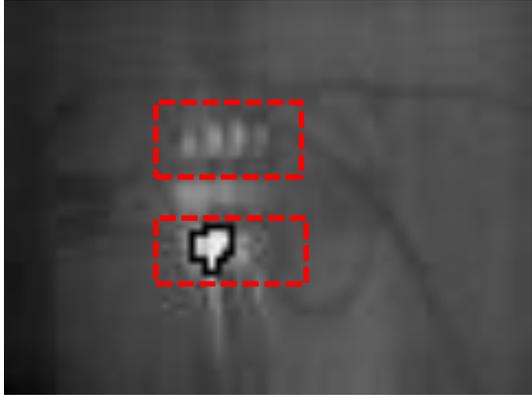
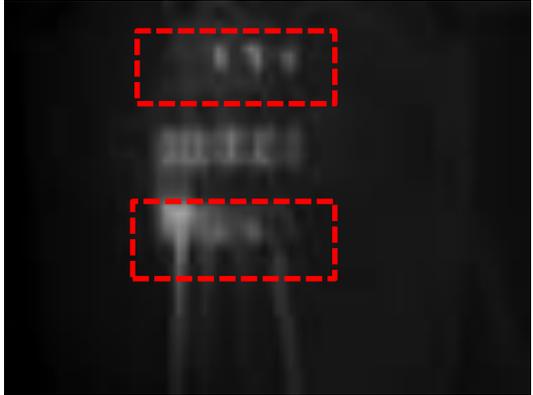
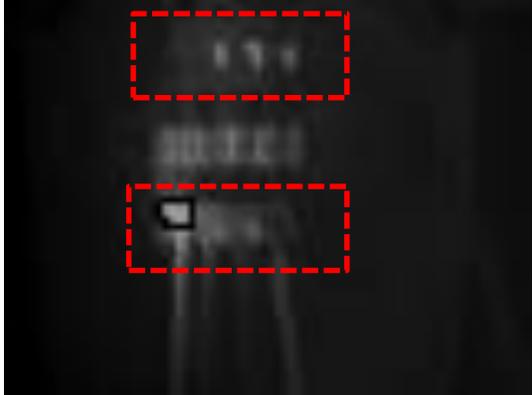
<p>Prueba 3</p>		
<p>Prueba 4</p>		
<p>Prueba 5</p>		

4.4.2 Terminales sueltas

En la Tabla 4-4 se muestra la síntesis de los resultados obtenidos en las pruebas de terminales sueltas en el interruptor.

Tabla 4-4 Reporte resultados en pruebas de terminales sueltas en el interruptor.

Terminales sueltas	Imagen original	Imagen procesada
Prueba 1		
Prueba 2		

<p>Prueba 3</p>		
<p>Prueba 4</p>		
<p>Prueba 5</p>		

5. CONCLUSIONES

Se planteó una metodología basada en procesamiento de imágenes termográficas para la detección de fallas insipientes en equipos eléctricos que componen los Centros de Control de Motores (CCM).

Se desarrolló un prototipo embebido para la adquisición y procesamiento de imágenes infrarrojas el cual está basado en la tarjeta de desarrollo BeagleBone Black, es de arquitectura abierta con el sistema operativo Debian de Linux. Se utilizó un sensor infrarrojo de bajo costo que tiene una resolución de 60 x 80 píxeles, y fue posible detectar las fallas del tablero de control para motores.

Se diseñó un algoritmo para la detección y clasificación de fallas utilizando una secuencia de transformaciones pertenecientes a la morfología matemática. Donde la principal transformación es la dinámica morfológica, algoritmo que no había sido utilizado en otros sistemas de detección de fallas en elementos eléctricos.

Se tiene una base de datos que cuenta con 1123 imágenes infrarrojas obtenidas de la experimentación realizada en el banco de pruebas de tablero eléctrico, 108 son de la calibración, 172 imágenes de los equipos con funcionamiento nominal y 843 son imágenes de equipos con fallas. El sistema se probó con 126 imágenes pertenecientes a la prueba falla de terminal floja del interruptor, se clasificaron de manera acertada las fallas en un total de 119 imágenes lo que indica el 94% de regiones clasificadas correctamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceves M, Ramos R. Fundamentos de Sistemas Embebidos. 1a ed. México: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.; 2012.
- Ahmed MM, Huda ASN, Mat Isa NA. Recursive construction of output-context fuzzy systems for the condition monitoring of electrical hotspots based on infrared thermography. *Eng Appl Artif Intell.* 2015;39:120–31.
- Bagavathiappan S, Lahiri BB, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T. Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Phys Technol.* 2013;60:35–55.
- Balaras CA, Argiriou AA. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy Build.* 2002;34(2):171–83.
- Cao Y, Gu X, Jin Q. Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment. *China Int Conf Electr Distrib 2008 CICED 2008.* 2008. p. 1–6.
- Chou Y-C, Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography. *Int Conf Soft Comput Pattern Recognit 2009 SOCPAR 09.* 2009. p. 155–60.
- Epperly RA, Heberlein GE, Eads LG. A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography. *Pet Chem Ind Conf 1997 Rec Conf Pap Inst Electr Electron Eng Inc Ind Appl Soc 44th Annu.* 1997. p. 59–68.
- Garcia-Ramirez AG, Morales-Hernandez LA, Osornio-Rios RA, Benitez-Rangel JP, Garcia-Perez A, Romero-Troncoso R de J. Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis. *Electr Power Syst Res.* 2014;114:1–9.

Gonzalez RC, Woods R. Digital Image Processing [Internet]. segunda. New Jersey: Prentice Hall; 2002 [citado 2016 mar 30]. Recuperado a partir de: http://users.dcc.uchile.cl/~jsaavedr/libros/dip_gw.pdf.

Grimaud Michel. New measure of contrast: the dynamics. Proc SPIE 1769 Image Algebra Morphol Image Process III. 1992;1769.

Han Y, Song YH. Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey. IEEE Trans Power Deliv. 2003;18(1):4–13.

Huda ASN, Taib S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. Appl Therm Eng. 2013a;61(2):220–7.

Huda ASN, Taib S. Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography. Infrared Phys Technol. 2013b;61:184–91.

Huda ASN, Taib S, Ghazali KH, Jadin MS. A new thermographic NDT for condition monitoring of electrical components using ANN with confidence level analysis. ISA Trans. 2014;53(3):717–24.

Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer Science & Business Media; 2006.

Jadin MS, Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. Infrared Phys Technol. 2012;55(4):236–45.

Jadin MS, Taib S, Ghazali KH. Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations. Measurement. 2014;57:15–24.

Lahiri BB, Bagavathiappan S, Jayakumar T, Philip J. Medical applications of infrared thermography: A review. Infrared Phys Technol. 2012;55(4):221–35.

- Laurentys Almeida CA, Braga AP, Nascimento S, Paiva V, Martins HJA, Torres R, et al. Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach. IEEE Trans Power Deliv. 2009;24(2):751–7.
- Morris AS, Langari R. Chapter 4 - Calibration of Measuring Sensors and Instruments. Meas Instrum [Internet]. Boston: Butterworth-Heinemann; 2012 [citado 2016 may 12]. p. 103–14. Recuperado a partir de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123819604000048>.
- Shafi'i MA, Hamzah N. Internal fault classification using Artificial Neural Network. Power Eng Optim Conf PEOCO 2010 4th Int. 2010. p. 352–7.
- Venkataraman B, Raj B, Mukhopadhyay CK, Jayakumar T. Correlation of infrared thermographic patterns and acoustic emission signals with tensile deformation and fracture processes. AIP Conf Proc 557. Ames, Iowa (USA); 2000.

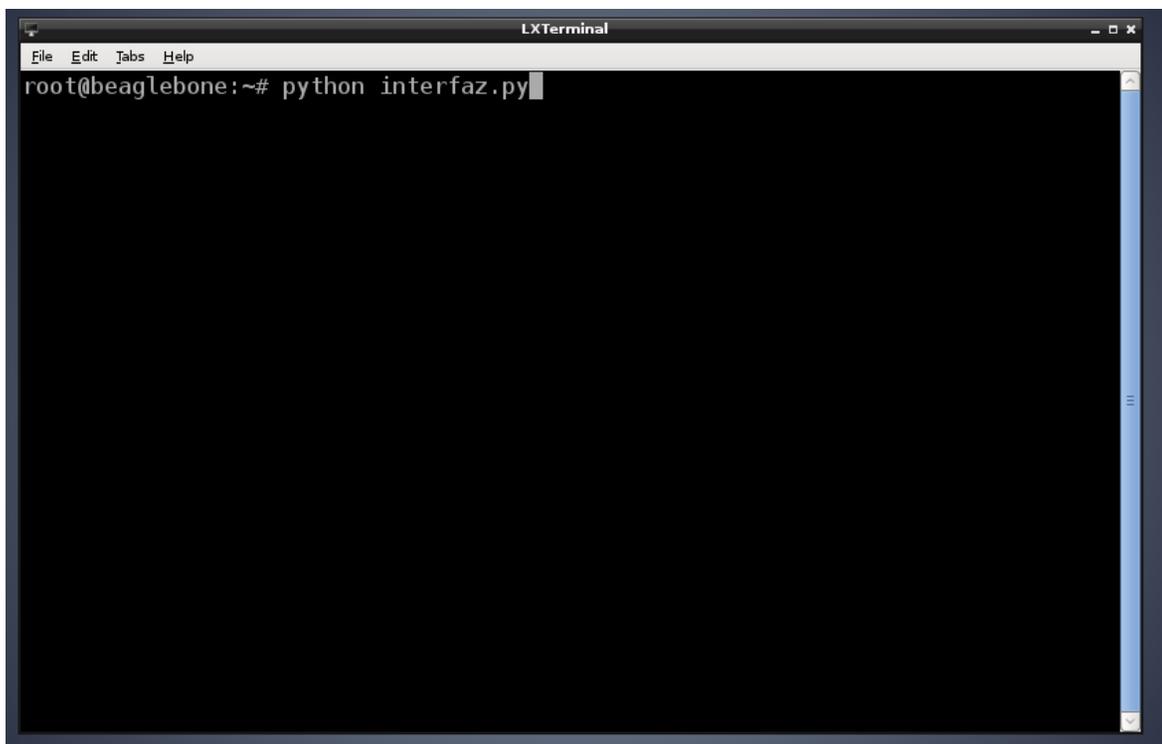
APÉNDICES

Apéndice A Manual de operación interfaz

1. Ejecución del programa

Para utilizar la interfaz en la tarjeta embebida es necesario cerciorarse en primer instancia haber iniciado sesión como usuario “**root**”. La manera de ejecutar la interfaz en la BBB es utilizando la terminal (LXTerminal) escribiendo la siguiente línea:

```
python interfaz.py
```

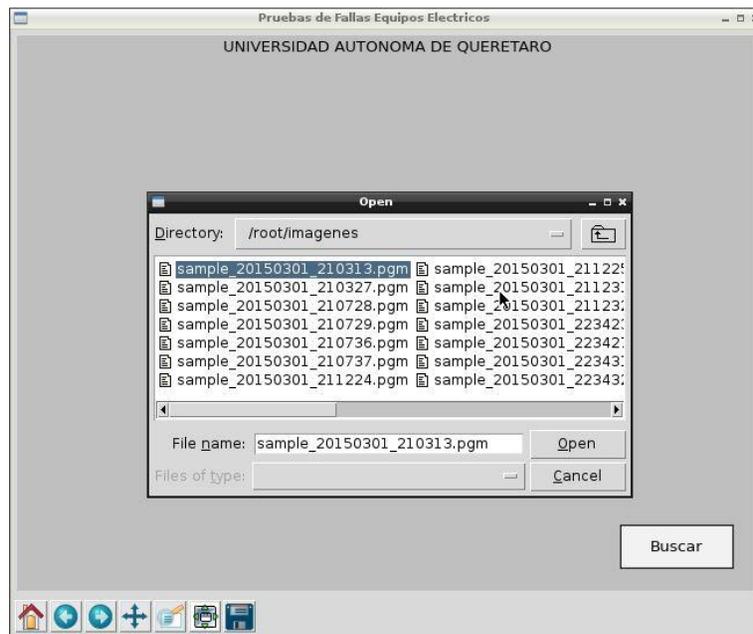


2. Búsqueda de la imagen a procesar

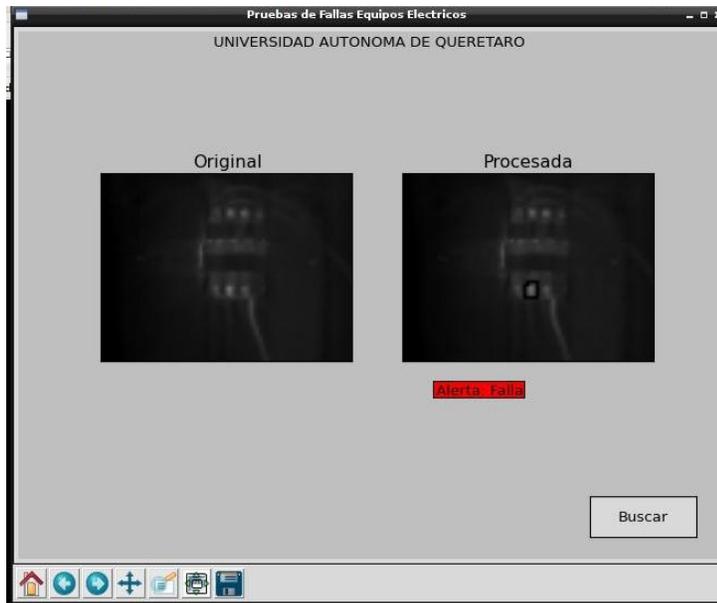
Una vez el programa en ejecución aparece la pantalla inicial de la interfaz



Al presionar el botón de “Buscar” aparece una ventana nueva donde se selecciona la imagen a procesar:



De manera automática al elegir la imagen a procesar se despliega la imagen con el resultado obtenido del diagnóstico de la imagen.



Artículo de memoria de congreso “*Electrical fault detection using infrared thermography*”, **M.A. Herrera Arellano** y **L.A. Morales Hernández**, XIII Congreso CIINDET 2016 **ISBN: 978-607-95255-7-6**.



CONSTANCIA

Artículo: “*Electrical fault detection using infrared thermography*.”

Autores: **María De Los Ángeles Herrera Arellano** and **Luis Alberto Morales Hernández**

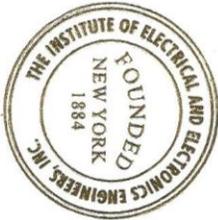
Id. artículo: **142**

El Comité Técnico del XIII Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2016, que se llevó a cabo en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, México, del 7 al 9 de septiembre de 2016, hace constar que el artículo citado fue presentado de acuerdo con el programa técnico del congreso e incluido en las memorias del mismo.

La presente constancia se expide para los fines legales que a los autores convengan.
Cuernavaca, Morelos, México a 9 de septiembre de 2016.

Atentamente


Dr. **Jorge Guillermo Calderón Guizar**
Presidente del Comité Técnico CIINDET 2016



Electrical fault detection using infrared thermography.

M.A. Herrera Arellano, L.A. Morales Hernández.

Abstract: Failure analysis using infrared thermography has been considered a technique with the advantage of being non-invasive and it also provides a fast temperature profile, reliable and accurate of any surface materials. This paper presents a methodology based on thermal images processing for detection of incipient faults in electrical equipment that make up the Motor Control Centers (MCC), implemented in low-cost embedded system. A qualitative conclusion but accurate can be obtained from the observation of the temperature profile of the equipment.

Keywords: Infrared thermography, embedded system, fault detection, images processing.

Resumen: El análisis de fallas utilizando termografía infrarroja se ha considerado una técnica destacada debido a su principal ventaja que es la de ser no invasiva además de proporcionar un perfil de temperatura rápido, fiable y preciso de cualquier superficie de materiales. Este trabajo presenta una metodología basada en procesamiento de imágenes termográficas para la detección de fallas incipientes en equipos eléctricos que componen los Centros de Control de Motores (CCM) implementada en un sistema embebido de bajo costo. Una conclusión cualitativa pero precisa se puede obtener a partir de la observación del perfil de temperatura de los equipos.

Palabras Clave: Termografía infrarroja, sistema embebido, detección de fallas, procesamiento de imágenes.

I. INTRODUCCIÓN

La temperatura es uno de los parámetros más importantes para determinar la condición de un proceso, material o equipo. Actualmente el uso de la termografía infrarroja (IRT) en el monitoreo de equipos está ganando importancia de aplicación en muchos campos industriales. La IRT es una de las herramientas más populares de prueba y de control del estado de los equipos no destructiva, se utiliza generalmente para investigar anomalías térmicas invisibles en la superficie de los materiales en diversas aplicaciones tales como militar, industrial, eléctrico, estructural y médica [1]–[4]. Por lo que la adquisición y el procesamiento de este tipo de imágenes se han convertido en un punto de interés para el desarrollo de nuevas tecnologías. En la actualidad existen equipos de venta comercial donde se pueden obtener las imágenes infrarrojas en el sitio que se requieren, sin embargo el procesamiento se realiza posteriormente en un equipo independiente al de adquisición de imágenes. Lo que hace surgir la necesidad de dispositivos que manejen este tipo de tecnología de una manera práctica, económica y portátil.

Lo que nos lleva a considerar un sistema embebido como una opción factible para desarrollar un sistema que realice las

operaciones de adquisición y procesamiento de imágenes infrarrojas en mismo dispositivo. La definición de sistema embebido como un sistema electrónico de procesamiento programado para realizar funciones o tareas para un objetivo específico [5].

En este artículo se trabaja con una metodología basada en procesamiento de imágenes termográficas para la detección de fallas incipientes en equipos eléctricos que componen los Centros de Control de Motores (CCM) utilizando herramientas de morfología matemática, utilizando una cámara termográfica de bajo costo y automática implementada en un sistema embebido.

Las fallas incipientes son las fallas que se desarrollan lentamente, pero que pueden convertirse en grandes fallas si la causa no se detecta y corrige. Su detección y análisis requieren de personal capacitado, la termografía infrarroja ha resultado ser de gran utilidad para la identificación de este tipo de fallas [6].

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

A. Termografía infrarroja

La radiación infrarroja (IR) se encuentra típicamente entre longitudes de onda de 2-15 micras que se encuentra entre las partes visibles para el ojo humano y de microondas del espectro electromagnético. Las ondas conocidas como cercanas tienen un IR de 0,7 a 25 micras se encuentran cerca de la luz visible, pero con una longitud de onda que es más larga que visible y más corta que las microondas y con una frecuencia que es menor que visible y mayor que las microondas. Las ondas lejanas IR (25-1000 M) están más cerca de la región de microondas [1].

Todos los objetos con temperatura superior al cero absoluto emiten radiación electromagnética, que se conoce como la radiación infrarroja o radiación térmica [3]. La Ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la cantidad de energía que se refleja en una superficie en forma de calor radiante que es proporcional a su emisividad y su temperatura absoluta la cual está dada por la ecuación (1).

$$q^n = \sigma \epsilon T^4 \quad (1)$$

donde q^n es la potencia de emisión total (energía radiante por unidad de área w/m^2), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} w/m^2 K$), ϵ es la emisividad total de la superficie ($0 < \epsilon < 1$) y T es la temperatura absoluta de la superficie en Kelvin (K) [2].

Ahora bien una cámara térmica es un dispositivo que hace una imagen de patrones térmicos y está calibrada para medir la potencia de emisión de las superficies en un área en varios

M.A. Herrera Arellano, Universidad Autónoma de Querétaro, México, Cerro de Las Campanas S/N, Las Campanas, 76010. (e-mail: ing.ma.herrera@hotmail.com).

L.A. Morales Hernández, Universidad Autónoma de Querétaro, México, Cerro de Las Campanas S/N, Las Campanas, 76010. (e-mail: luis.morales@uaq.mx).

rangos de temperatura. La cámara termográfica dispone de un sensor térmico llamado microbolómetro que al recibir la radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se mide y se equipara a una determinada temperatura, siendo asignado un color para cada temperatura que se convierte en la representación visual (imagen digital), en la que diferentes colores corresponden a diferentes niveles de temperatura de la superficie (objetivo) en los que se centra. [7].

B. Procesamiento de imágenes

La base de este trabajo es el procesamiento de imágenes utilizando morfología matemática por lo que es necesario la explicación de algunos conceptos básicos para el mejor entendimiento de este.

El procesamiento digital de imágenes permite extraer información considerada relevante, empleando herramientas computacionales. Lo que nos lleva al concepto de región de interés (ROI) que es un subconjunto de píxeles de una imagen o un conjunto de datos identificado para un propósito particular.

Apertura por reconstrucción

La reconstrucción tamaño n se define como la reconstrucción de la imagen f por la función marcador g , mediante un número infinito de iteraciones recursivas, hasta la idempotencia de la dilatación de g condicionada a f [8] esta se define como:

$$\gamma_R^{(n)}(f) = R_f^g[\varepsilon^{(n)}(f)] \quad (2)$$

Dinámica morfológica

La dinámica de un camino $p(x, y)$ que une dos píxeles x e y en una imagen es la diferencia de altura entre los puntos de mayor y menor altitud de la ruta [9].

$$Dyn_f(P(x, y)) = \sup(abs(f(x_i) - f(x_j))) \quad (3)$$

donde $x, y \in P(x, y)$.

La dinámica de un camino se ilustra en la Figura 1 Fig. 1.

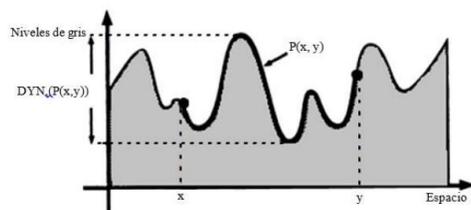


Fig. 1 Dinámica del camino en un perfil de escala de grises.

C. Fallas en equipos eléctricos y su relación con la temperatura

Los CCM se componen básicamente de fusibles, interruptores termomagnéticos, cortacorrientes, etc. La corrosión, conexión suelta, contactos dañados, cables

desgastados, sobre carga o desbalance de carga son los principales tipos de fallas en los elementos eléctricos que causa aumento anormal de la temperatura que puede ser fácilmente detectados por IRT [1], [10]–[12]. En la Figura 2 se muestran los componentes del tablero de control para motores que se va a analizar remarcando las regiones de interés. Las fallas se encuentran en forma de puntos calientes en las terminales de contacto que puede ser a causa de un contacto flojo, tuercas y tornillos oxidados o sucios, conductores rotos, etc.



Fig. 2 Fotografías de los componentes del tablero marcando las regiones de interés (ROI).

Fallas en fusibles

Los fusibles se utilizan para proteger el sistema contra la condición de sobrecarga. La sobrecarga es una condición del sistema puede aumentar la temperatura de conexión fusible y por otra parte, los porta fusibles pueden sobrecalentarse debido a las conexiones sueltas y sucias. La condición de sobrecarga suele mostrar un patrón de calor uniformado que aparece a través de todo el circuito. El calor total generado por los equipos depende de la carga y la temperatura ambiente del funcionamiento de los equipos.

Fallas en interruptores.

Los interruptores y otros dispositivos de reconexión operan con los contactos. Si estos contactos se aflojan, oxidan o ensucian aumentan su resistencia, entonces la falla ocurre en los contactos.

Fallas de aislamiento

La falla en el aislamiento ocurre cuando aparece un cortocircuito entre dos conductores. Se genera sobrecalentamiento y permite que el disyuntor o fusible se abra [10], [11]. En la Figura 3 se muestra un resumen de las principales fallas en los CCM.



Fig. 3 Principales fallas en CCM.

III.METODOLOGÍA

Esta sección muestra la metodología utilizada para la detección de las fallas. En primer lugar se describe el equipo desarrollado que fue utilizado para adquisición de imágenes, su calibración y finalmente se explica el algoritmo de detección de fallas utilizando procesamiento de imágenes.

A. Equipos

Los componentes principales para este proyecto son el sistema embebido se trabajó con una tarjeta de desarrollo Beaglebone Black (BBB) y una cámara térmica.

La cámara de marca FLIR dev KIT-13233 se utilizó en la captura de imágenes de equipos eléctricos. Este dispositivo consta de una matriz de plano focal de 80 x 60, un sensor microbolómetro no refrigerado y opera en la banda espectral del infrarrojo de 8 μm a 14 μm. Este sensor cuenta con una sensibilidad térmica de <50 mK (0.050° C). Las especificaciones principales del sistema de adquisición de imágenes se presentan resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1 Componentes del sistema desarrollado para la adquisición y procesamiento de imágenes.

Hardware	Especificaciones
Beaglebone Black	CPU: ARM Cortex-A8 S.O.: DEBIAN, linux
Cámara Infrarroja	Resolución: 80x60 pixeles Sensibilidad térmica: <50 mK Rango espectral: 8 μm a 14 μm Interfaces: I2C/SPI
Pantalla LCD	Display: 5 pulgadas lcd, 800*480 pixeles Touch: Capacitiva 5 botones de usuario , 1 botón RESET

El sistema con el cual se adquirieren las imágenes cuenta con un procesador ARM Cortex A8, con frecuencia de operación de hasta 1 GHz, que viene incluido sobre la microcomputadora BeagleBone Black. Este sistema embebido utiliza un sistema operativo Debían basado en Linux y el proceso de la aplicación ha sido desarrollado en lenguaje Python. El usuario es capaz de adquirir imágenes infrarrojas así mismo puede ser analizada posteriormente. Al presionar el botón “NuevaImagen” se guarda automáticamente en un archivo extensión .pgm, se pueden seguir capturando imágenes hasta cerrar el programa. Debido al tamaño de las imágenes se pueden guardar 51,200 imágenes en la memoria.

En la Figura 4 se muestra una imagen del sistema de adquisición de imágenes utilizado.



Fig. 4 a) Vista frontal, b) vista posterior del sistema de adquisición de imágenes.

B. Calibración

El siguiente paso de la metodología correspondiente a la calibración consiste en comparar la salida del instrumento bajo prueba con la salida de un instrumento de precisión conocida cuando la cantidad medida se aplica a ambos instrumentos [13]. La calibración se realiza aumentando la temperatura del equipo el equipo hasta llegar a la temperatura de 47 °C que se tomaron las mediciones de temperatura son tomadas directamente con un termómetro de mercurio con rango de -20 °C a 50 °C. A la par se realiza la captura de una imagen grado a grado hasta que descendió a 23 °C. posteriormente se repite este proceso en tres ocasiones.

Por otra parte, se extrae el nivel de gris de los pixeles de interés y se encontró la relación de las temperaturas medidas con el termómetro. Seguidamente se realizó entonces una gráfica con los valores y se determina la ecuación característica del sistema.

En la Figura 5 se muestra la gráfica que relaciona la temperatura medida (eje y) con respecto a los niveles de grises medidos (eje x). También se muestra la línea de tendencia del sistema de la cual se extrajo la ecuación característica que se muestra en la ecuación (4).

$$y = 0.9908x + 22 \quad (4)$$

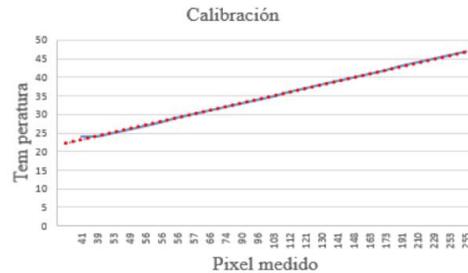


Fig. 5 Grafica de temperatura medida con niveles de gris.

Al hacer la comparativa de los valores medidos y los valores calculados utilizando la ecuación encontrada se obtuvo un error máximo en 0.26228%.

C. Algoritmo de detección de fallas

En este tercer paso de la metodología propuesta que corresponde al algoritmo de detección de fallas consiste en la segmentación de las imágenes utilizando morfología

matemática, en la Figura 6 se muestra el diagrama de pasos realizados para lograr encontrar las regiones de interés que en este caso son las regiones que presentan fallas.

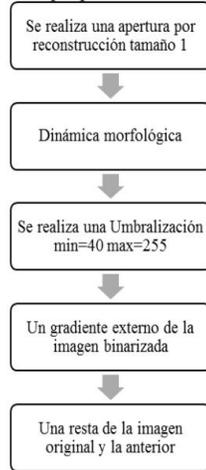


Fig. 6 Algoritmo de detección de fallas

Al llegar al paso final del algoritmo se puede obtener la región de interés y al analizar en específico las ROI se encuentran las temperaturas que hacen referencia a la existencia de fallas en los equipos del tablero.

IV. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Para asegurar la repetitividad de los experimentos se sigue el siguiente protocolo de toma de imágenes: la distancia entre las instalaciones eléctricas objetivo y cámara térmica de infrarrojos es de entre 0.2 m y 0.5 m. La temperatura ambiente se encuentra entre 22°C y 30°C. Los elementos del tablero de control al que se le aplican las pruebas está diseñado para un motor trifásico de 3/4 hp.

El tiempo para realizar cada prueba es de 45 minutos con una captura de imágenes cada 5 minutos. Se realizaron 5 pruebas por cada falla además se realizaron las pruebas en funcionamiento nominal del equipo. En la Figura 7 se puede ver los las imágenes de los equipos en su funcionamiento nominal las cuales nos muestran una distribución homogénea de los niveles de gris y en ROI se ve claramente temperaturas similares.



Fig.7. Imágenes infrarrojas de los equipos en funcionamiento nominal.

En este trabajo se reportan dos de las fallas que se presentan comúnmente en los interruptores termomagnéticos como parte de los CCM , terminales flojas y terminales sucias por lo que en la Figura 8 se muestra el interruptor electromagnético con su respectiva imagen infrarroja.

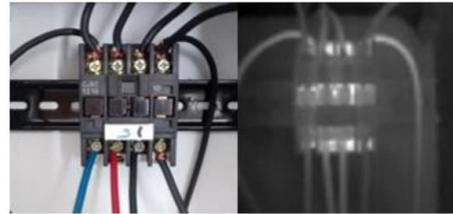


Fig. 8. Imagen del equipo con su respectiva imagen infrarroja en funcionamiento nominal.

El algoritmo de detección de fallas mencionado en la sección III se aplicó en las pruebas en la Figura 10 se puede ver un ejemplo del procesamiento completo realizado en cada una de sus etapas, donde se puede apreciar la imagen capturada en infrarrojo de una falla de terminal floja. Se realizaron 23 pruebas diferentes Se realizaron 14 pruebas cada una con 9 imágenes y de las 126 imágenes capturadas se logró determinar de manera acertada las fallas en un total de 119 imágenes.

En la Figura 9 se muestra una imagen infrarroja de un interruptor termomagnético y la detección de su falla. Esta imagen nos presenta una de las condiciones más complicadas para realizar la detección, ya que la imagen se encuentra desenfocada y con mucho ruido, no obstante así se puede localizar la falla.

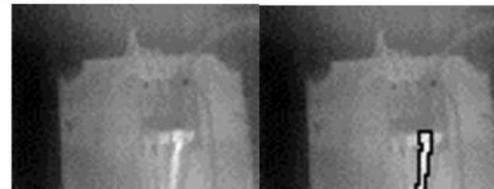


Fig. 7 Imagen infrarroja de un interruptor termomagnético y su falla.

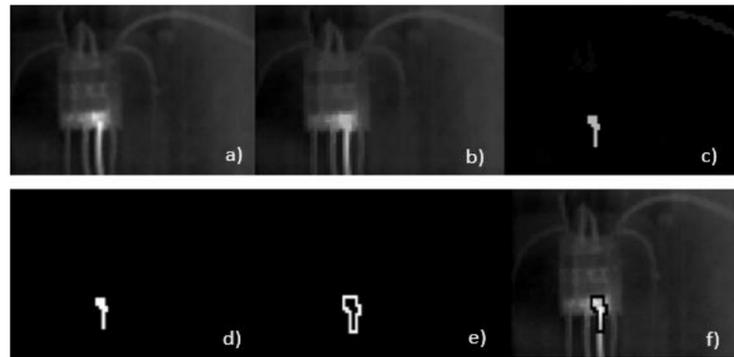


Fig. 8 a) Imagen con falla de terminal floja , b) Apertura por reconstrucción tamaño 1, c) Dinámica morfológica, d) Umbralización min=40 max=255,e) Gradiente externo de la imagen binarizada, f) Resta de la imagen original y la anterior.

V. CONCLUSIONES

La termografía infrarroja se ha convertido en una herramienta útil para la monitorización de la temperatura de los objetos o procesos de una manera no invasiva. Esta técnica está ayudando al diagnóstico de fallas ya que proporciona información relevante para el operador sobre el estado de los equipos.

El sistema que se propuso para la toma de imágenes es de arquitectura abierta por lo que se puede modificar los programas y adaptarlos a sus necesidades, al contrario de los equipos que existen en el mercado donde la arquitectura del software es cerrada y solo se permite realizar operaciones pre-establecidas. Como se mostró una de las ventajas de utilizar un sistema embebido para la adquisición de imágenes es que a pesar de utilizar un equipo de bajo costo, que nos da imágenes pequeñas y ruidosas de 60 x 80 píxeles es posible la detección de las fallas ya que el algoritmo propuesto es robusto.

El algoritmo de detección de fallas que se propuso está basado en procesamiento de imágenes y se comporta de manera robusta, además de hacerlo de manera simple utilizando solo herramientas de morfología matemática.

El sistema que se implementó funciona únicamente para la captura de imágenes sin embargo es posible desarrollar la aplicación de diagnóstico en el mismo sistema embebido. Se propone como trabajo futuro trabajar con otro tipo de fallas presentes en CCM y realizar el procesamiento de imágenes infrarrojas donde se analizarán las fallas que presentan los tableros de control para motores utilizando como medio de adquisición y procesamiento el sistema embebido. Además de considerar realizar también un diagnóstico en base a los resultados obtenidos con la detección. El reto que representa es el conocer el tipo de procesamiento óptimo para aplicar a este tipo de elementos para realizarlo de manera automática. Donde se esperan obtener resultados fiables sin la necesidad de contar una persona experta en el área de las fallas y procesamiento de imágenes para analizar los equipos. Se adaptará el programa para que realice la detección de fallas de una manera automática y se desplieguen los resultados a un usuario final.

VI. REFERENCIAS

- [1] C. A. Balaras y A. A. Argiriou, "Infrared thermography for building diagnostics", *Energy Build.*, vol. 34, núm. 2, pp. 171–183, feb. 2002.
- [2] B. B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, y J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review", *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, núm. 4, pp. 221–235, jul. 2012.
- [3] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, y T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring – A review", *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 35–55, sep. 2013.
- [4] M. M. Ahmed, A. S. N. Huda, y N. A. Mat Isa, "Recursive construction of output-context fuzzy systems for the condition monitoring of electrical hotspots based on infrared thermography", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 39, pp. 120–131, mar. 2015.
- [5] M. Aceves y R. Ramos, *Fundamentos de Sistemas Embebidos*, 1a ed. México: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2012.
- [6] M. S. Jadin, S. Taib, y K. H. Ghazali, "Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations", *Measurement*, vol. 57, pp. 15–24, nov. 2014.
- [7] R. A. Epperly, G. E. Heberlein, y L. G. Eads, "A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography", en *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual*, 1997, pp. 59–68.
- [8] R. C. Gonzalez y R. Woods, *Digital Image Processing*, Segunda. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [9] G. Michel, "New measure of contrast: the dynamics", *Proc SPIE 1769 Image Algebra Morphol. Image Process. III*, vol. 1769, jun. 1992.
- [10] A. S. N. Huda y S. Taib, "Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of

thermal defect in electrical equipment”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 61, núm. 2, pp. 220–227, nov. 2013.

- [11] M. S. Jadin y S. Taib, “Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography”, *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, núm. 4, pp. 236–245, jul. 2012.
- [12] Y. Cao, X. Gu, y Q. Jin, “Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment”, en *China International Conference on Electricity Distribution, 2008. CIGRE 2008*, 2008, pp. 1–6.
- [13] A. S. Morris y R. Langari, “Chapter 4 - Calibration of Measuring Sensors and Instruments”, en *Measurement and Instrumentation*, Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 103–114.

María de los Ángeles Herrera Arellano Ella recibió el título de Ingeniera en Procesos Industriales en la Universidad Autónoma de Sinaloa en 2014. Actualmente se encuentra por obtener el grado de Maestría en Ciencias en Instrumentación y Control Automático de la Autónoma de Querétaro, su México. Sus áreas de interés incluyen detección de fallas, mejora y control de procesos.

Luis Alberto Morales Hernández. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en la Universidad Autónoma de Querétaro en el 2009 y Maestría en Ciencias en Instrumentación y Control Automático en la misma universidad en 2005. Perteneció Al sistema nacional de investigadores CONACYT. Ha hecho desarrollos tecnológicos desde hace más de tres años con empresas locales y obtuvo la protección de la propiedad intelectual de las invenciones. En la actualidad es profesor de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UAQ. Su área de interés incluye la mecatrónica, visión artificial y procesamiento de imágenes.

Artículo de memoria de congreso “*Electrical applications of infrared thermography: A review*”, **María de los Ángeles Herrera Arellano** y **Luis Alberto Morales Hernández**, XI Congreso internacional de Ingeniería CONIIN 2015 **ISBN: en trámite.**



La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
a través de la
FACULTAD DE INGENIERÍA,
otorga la presente

CONSTANCIA

a

María De Los Ángeles Herrera Arellano and Luis Alberto Morales Hernández

Por haber impartido la ponencia oral

Electrical applications of infrared thermography: A review

en el Congreso Internacional de Ingeniería
en su undécima edición
realizado del 11 al 15 de Mayo del 2015
en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.

Dr. Aurelio Domínguez González
Director



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

creando**conciencia**

Electrical applications of infrared thermography: A review

M. Á. Herrera Arellano ^{*1}, L. A. Morales Hernández ^{*2}

División de Posgrado, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Querétaro.
Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, México.

¹ ing.ma.herrera@hotmail.com

² luis.morales@uaq.mx

Abstract— Temperature is an important indicator of the electrical equipment condition. We can make an accurate fault diagnosis by using the temperature profile of the electrical equipment surface. Infrared thermography (IRT) has gained more attention and become an interesting method in electrical fault diagnosis because of the advantages it provides. This paper is a review of the application of IRT for diagnosing faults in electrical equipment; furthermore we have included theoretical background, monitoring techniques, the fault classifications and fault diagnosis in electrical engineering fields.

Keywords—Infrared thermography, Electrical equipment, Fault detection, Fault diagnosis.

I. INTRODUCTION

Due to increasing demands for efficiency and product quality and progressing integration of automatic control systems in high cost and safety critical processes, the field of monitoring, fault detection and fault diagnosis play an important role.

The analysis to get fault diagnosis is a systematic process that determines the origin of the failure and uses this information to make the proper handling of electrical equipment. This process consist of four basics steps: monitoring, fault detection, fault diagnosis, fault management [1, 2]. This process is displayed on the figure I.1.

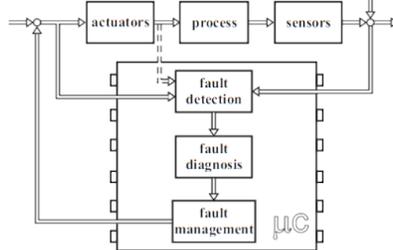


Fig. 1.1 Process of fault diagnosis [1].

The equipment which is referred to as electrical equipment in this work consist of switches, circuit breakers, bus bar connections, cables, wires and fuses in the main switch and distribution boards of the buildings, transformers [3, 4]. Generally, faults of electrical systems show overheating of conductor contacts and connectors, loose connection and breakdown of insulation, etc. before they cause a catastrophic failure or serious damage [5].

Temperature is an indicator of the condition of electrical equipment.

There are two ways to measure the thermal condition of electrical equipment. The first is known as quantitative, which is to take the exact temperature of the equipments. The second type is qualitative, which takes the relative temperature values of a hotspot with respect to other parts of the equipment under similar conditions. Some applications do not require to obtain exact surface temperatures. It is sufficient to acquire thermal signatures, which are characteristic patterns of relative temperatures of the equipment. This method of qualitative visual inspection is expedient for collecting a large number of detailed data and conveying them into a way that can be easily interpreted [9].

The use of infrared thermography (IRT) in monitoring is to gain importance in many industrial fields. IRT is one of the popular non-destructive testing and condition monitoring tools which is generally used to investigate the invisible thermal abnormalities on the surface of the materials in various applications such as military, industrial, electrical, structure and medical fields [5, 6, 7, 8].

A. Definitions

The infrared (IR) radiation that typically falls between wavelengths of 2-15 μm that is between the visible and microwave parts of the electromagnetic spectrum. Near IR waves (0.7-25 μm) are close to visible light but with a wavelength that is longer than visible and shorter than microwaves and with a frequency that is lower than visible and higher than microwaves. Far IR waves (25-1000 μm) are closer to the microwave region.

All objects radiate energy that is transported in the form of electromagnetic waves, which travel at speed of light. The amount of energy leaving a surface as radiant heat is proportional to its emissivity and the fourth power of its absolute temperature given by:

$$q^n = \epsilon T^4 \quad (1)$$

Where q^2 is the hemispherical total emissive power (radiated energy per unit area, W/m^2), σ the Stefan-Boltzmann constant ($5.67051 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), ϵ is the total hemispherical emissivity of the surface ($0 < \epsilon < 1$) and T is the surface absolute temperature (K). Any object with a temperature other than

absolute zero radiates within a range of wavelengths from 0 to ∞ .

All objects with temperature above absolute zero emit electromagnetic radiation, which is known as infrared radiation or thermal radiation. Table 1 shows the emissivity of different materials that are used for electrical equipment [8].

Table 1 Emissivity of some materials

Materials	Temperature (K)	Emissivity
Aluminum (heavily weathered)	290	0.83–0.94
Brass (polished)	301	0.03
Copper (oxidized)	311	0.87
Cast iron (heavy oxidation)	377	0.95
Nickel (polished)	298	0.05
Tempered iron (polished)	313–523	0.28

An IR thermal camera is a device that makes an image of thermal patterns and is calibrated to measure the emissive power of surfaces in an area at various temperature ranges. They use a lens to focus the emitted IR radiation on to a detector and the electrical response signal is converted into visual display (digital picture) in which the different colors correspond to various temperature levels of the surface (target) on which it is focused. Available software can then be used to analyze the thermographic images and even quantify these differences [9]. Thermography is non-contact type technique which provides a fast, reliable and accurate temperature profile of any material surface. Several standards for measurement of the temperature by using IR are found such as Electrical Testing Association (NETA) [10], National Fire Protection Association (NFPA) e NFPA 70-B [11] and International American Society for Testing & Materials (ASTM) [12], etc.

II. MONITORING

Monitoring is to measure variables to check with regard to tolerances, and alarms that are generated by the operator. After an alarm is triggered the operator then has to take the appropriate counteractions [1].

In recent years, many temperature monitoring techniques have been implemented. These techniques find their application based on the measurable temperature range, sensitivity and easy application [3]. One of the main advantages of IRT based-condition monitoring technique is that it requires minimal instrumentations.

The essential requirements for measurement in electrical devices are an IR thermal camera, a tripod or camera stand and a video output unit for displaying the acquired infrared thermal images, inspections can be done without shutting down the system operation [10, 13].

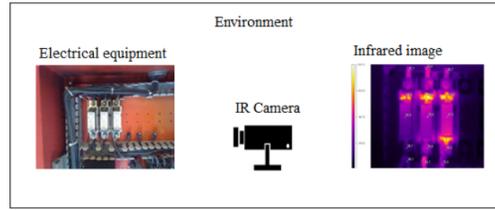


Fig. II.1 Schematic of a typical experimental for monitoring using thermography.

To make an accurate measurement, it is necessary to consider some parameters that are the relative humidity, the reflected temperature, the distance between the object and the camera, the ambient temperature, the emissivity of the object. According to [14] the correct and incorrect parameters to make an accurate measurement are mention in table 2.

Table 2 Parameter to consider for measurement

Parameters	Humidity [%]	Reflected temperature [°C]	Ambient temperature [°C]	Distance [m]
Correct parameters	50	24.6	24.6	0.5
Incorrect parameters	95	34.6	34.6	10.0

a) *Distance*: distance from the thermo viewer and the object being examined also called target distance.

b) *Ambient temperature*: The unit will not perform in terms of the ac-curacy and repeatability if used outside the stated oper-ating temperature range.

c) *Relative humidity*: is defined as the ratio, expressed as a percent, of the amount of water vapor actually present in a sample of air to the greatest amount of water vapor possible at the same temperature [15].

Another measurement work mentions the parameters to consider which are the distance between the target electrical installations and IR thermal camera is between 0.5 m and 1.0 m. The ambient temperature was between 30 and 33°C during inspection [4].

One of the most relevant aspects is the camera for the measurements. Several parameters must be considered before choosing an IR thermal camera as the ability of producing a sharp and accurate thermal image which largely depends on these performance parameters. A few important parameters are mention below: spectral range, spatial resolution, temperature resolution. A detailed study of these performance parameters of thermal imaging systems are reported by Venkataraman and Raj [10].

Usually, applying infrared thermography technology, the electrical thermal defect and level of defect are identified by monitoring its Delta T (ΔT) criteria. The Delta T criteria of a component is defined as an increase in the temperature value above the temperature of a reference value, which is typically the ambient temperature, temperature of a similar component

under the same condition or the maximum allowable temperature of the component [4].

Moreover in recent years the development of intelligent diagnostic system using fuzzy logic, expert system and neural networks are potentially powerful, robust and adaptive mathematical model for pattern recognition and classification. The four input parameters of neuronal networks were used which are absolute maximum temperature, relative maximum temperature, mean temperature difference compared to the other regions of the image and histogram distance to other regions of the image [2, 4, 16]. Sometimes thermographers prefer to classify thermal condition based on their own inspection experiences instead of using the available standards.

III. FAULT DETECTION

The main purpose is to find out if there is an incipient fault appearing in the machine so that the alarm can be activated and further analysis can be exerted.

There are two deferent methods for fault detection, named model-referenced method and feature extraction. The former detects faults by comparing the results of measurements with predictions of models that may be mathematical simulation models or artificial intelligence based. For most feature extraction methods, frequency and time-domain signal processing technologies will be used to obtain 'signatures' which can represent normal and faulty performance [2].

The internal faults of the electrical equipment can be divided into loose connection or contact of internal conductors and poor insulation and other faults [11].

Corrosion, loose connection, damaged contacts, worn out wires, over loading or load imbalance are the major types of faults in electrical components that causes abnormal rise of temperature which can be easily monitored by IRT[10].

A. Defect in circuit breaker

A circuit breaker (CB) always senses the heat produced by the current. If it finds the abnormality of heat, instantly opens the circuit automatically and protects the electrical equipment from damage. Thermographic inspection has the advantages to find the abnormalities by analyzing the surface temperature variation of circuit breaker and can prevent these abnormalities earlier [4].

B. Fuse connection

Fuses are used to protect the system against overloading condition. Overloading condition in a system can increase the fuse connection heating and moreover, the fuse clips can be overheated due to the loose and dirty connections [4]. Overload condition usually shows a uniformed heat pattern that appears through the entire circuit. Total heat generated from the equipments depends on the load and the ambient operating temperature of the equipment [13].

C. Defect in contact

Electrical connection switches, breakers and other reclosing devices operate with contacts. If these contacts become loose,

oxidized, and dirty or anyhow increase in resistance, then the fault can be occurred in the contacts [4].

D. Insulation problem

Insulation failure can cause short circuit current between two conductors. Overcurrent generates overheating and allows the circuit breaker or fuse to open. Poor insulation can also cause overheating [4].

E. Utility connection box break elbows

In residential areas, many underground connection and switching locations are in utility box enclosures. Normally, break elbows provide a point of disconnection and if these break elbow connections are not installed properly or connection resistance increases, then faults can occur [4].

F. Surge arrestors problem

Problems with surge protection and lightning arrestors leaking to ground and current tracking over insulators can also be detected using thermography. However, such problems require the capture of subtle temperature differences which are often too difficult to be monitored [4].

On Jadin et al 2014 [4] they had evaluated the usage of radial basis kernel function (RBF), support vector machine (SVM) and multilayer perceptron neural network classifiers. Using a wrapper model approach for feature selection, the classification performances for various input features are examined after finding the optimal configuration and parameters of the classifiers. From the experimental result, the most suitable input features are the combination of maximum temperature, average region's temperature and temperature difference between the target and reference region. However, choosing the type of classifier between SVM and MLP neural network has no significant effect upon the classification accuracy.

To develop a robust and reliable system, a new Recursively Constructed Fuzzy System (RCFS) is introduced in this study to classify the conditions of hotspots in components. The proposed system employs Automatic Feature Extraction (AFE) and a novel intelligent classification system.

The gray scale images of infrared thermal images of components are segmented by using a manual thresholding technique [17].

IV. FAULT DIAGNOSIS

The task of fault diagnosis consists in determining the type, size and location of the possible fault, as well as its time of detection [1].

Manual and Automatic Feature Extraction (AFE) methods are currently employed for the intelligent classification of the thermal conditions of electrical equipment on the basis of thermography. Almeida et al. 2009 [15] proposed an intelligent fault diagnosis system based on thermography for lighting arrestors by using 2 types of variables as inputs of a neuro-fuzzy network.

Several articles about the application of artificial neural networks (ANN) for electrical fault diagnosis system using infrared thermography have been proposed in the past few

years. In these articles, different features were used as inputs of ANN. Almeida et al used a neuro-fuzzy approach for fault diagnosis of lighting arrester while the inputs of the ANN were thermographic and identification variables.

V. CONCLUSIONS

Infrared thermography has become a very useful tool for temperature monitoring of objects or processes in a non-invasive way. This technique is helping to diagnosis faults in electrical equipment. It provides pertinent information about the state of the equipment. In order to obtain better results on the faults diagnosis is necessary to make an accurate measurement this is the base of the diagnosis process. Once we get to the diagnostic then we can make the fault management. For future works, the diagnosis based on IR thermography is a practical and useful tool in industries fields. So it is recommended for further information to explore this topic in depth.

This review would also help understand the thermography technique and start to use it for various condition monitoring applications, detecting faults.

Acknowledgements

The authors are very grateful to acknowledge Universidad Autónoma de Querétaro for encouragements and facilities and the first autor to “Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología” (CONACYT) for providing the support for this investigation. Also like to thank M.E.S. Gavina Quintanar Martínez Language Services department of the School of Engineering campus San Juan del Río, University of Querétaro, México for provide the English language editing of this paper.

References

- [1] R. Isermann. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection To Fault Tolerance*. Germany: Springer, 2006.
- [2] Y. Han & Y. H. Song. *Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment-A Literature Survey*. IEEE Transactions on Power Delivery, 18 (2003), 4-12.
- [3] M. Shawal, S. Taib & K. Hawari. *Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations*. Measurement, 57(2014), 15-24.
- [4] A. Huda & S. Taib. *Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment*. Applied Thermal Engineering, 61(2013), 220-227.
- [5] C. Balaras, A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*, Energy Build. 34 (2002) 171–183.
- [6] B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar & J. Philip, *Medical applications of infrared thermography: A review*, Infrared Physics & Technology, 55 (2012) 221–235.
- [7] A. Huda, S. Taib, K. Ghazali & M. Jadin. *A new thermographic NDT for condition monitoring of electrical components using ANN with confidence level analysis*. ISA Transactions, 53(2014), 717-724.
- [8] S. Bagavathiappan, B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip & T. Jayakumar, *Infrared thermography for condition monitoring a review*, Infrared Physics & Technology. 60 (2013) 35–55.
- [9] L. Eads, R. Epperly & J. Snell, *Thermography*, ASHRAE Journal 42 (2000) 51-55.
- [10] Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, Infraspection Institute, 2008, 2011. <http://www.armcoinspections.com/files/ir/Electrical%20Rotating%20Std.pdf> (accessed 10.02.2015).
- [11] NFPA, NFPA 70B: *Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2006.
- [12] ASTM, ASTM E 1934: *Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2005.
- [13] M. Shawal & S. Taib. *Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography*. Infrared Physics & Technology, 55 (2012), 236-245.
- [14] M. Barański & A. Polak. *Thermographic diagnostic of Electrical Machines*. XIX International Conference on Electrical Machines, (2010).
- [15] C. Almeida, A. Braga, S. Nascimento, V. Paiva, H. Martins, R. Torres, and W. Caminhas. *Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 24(2009), 751-755.
- [16] A. Huda and S. Taib. *Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography*. Infrared Physics & Technology, 61(2013), 184-191.
- [17] M. Ahmeda, A.Huda and N. Ashidi. *Recursive construction of output-context fuzzy systems for the condition monitoring of electrical hotspots based on infrared thermography*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 39 (2015), 120-131.

Apéndice D Artículo IREE

Artículo revista indizada “*Control Strategies of electrical Power on Smart Buildings, a Review*”, José Álvarez-Alvarado, Mario Trejo-Perea, **María de los Ángeles Herrera-Arellano**, José Gabriel Ríos-Moreno, **International Review of Electrical Engineering**, Vol.10, Pag. 764-770. Se puede encontrar en:

<http://www.praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=iree&page=article&op=view&path%5B%5D=18313>