



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DE
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA EN
INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: “SISTEMA DE VALORACIÓN BASADO EN EL
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA
EVALUACIÓN DE INTERRUPTORES SECCIONADORES DE
MEDIO VOLTAJE.”**

AUTOR: ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA

DIRECTOR: ING. ARMANDO ÁLVAREZ SALAZAR

LATACUNGA

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELETRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

CERTIFICO

Que el trabajo de titulación, “**SISTEMA DE VALORACIÓN BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA EVALUACIÓN DE INTERRUPTORES SECCIONADORES DE MEDIO VOLTAJE.**” realizado por el señor **ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señor **ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 24 de Agosto del 2017.

Ing. Fabián Armando Álvarez Salazar

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELETRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación denominado **“SISTEMA DE VALORACIÓN BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA EVALUACIÓN DE INTERRUPTORES SECCIONADORES DE MEDIO VOLTAJE.”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este proyecto es autoría propia, en virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 24 de Agosto del 2017.

**Nombre: Ernesto Alejandro Abril Chafila
CC.:1804556643**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELETRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

AUTORIZACIÓN

Yo, *ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA*

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación “**SISTEMA DE VALORACIÓN BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA EVALUACIÓN DE INTERRUPTORES SECCIONADORES DE MEDIO VOLTAJE.**” cuyo contenido, ideas y criterios es propia exclusividad autoría y responsabilidad.

Latacunga, 24 de Agosto del 2017.

**Nombre: Ernesto Alejandro Abril Chafila
CC.:1804556643**

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres ya que ellos siempre confían y creen en mis hermanos y en mí, porque ellos me han sabido instruir y guiar en cada etapa de mi vida, de mi madre he aprendido la disciplina y constancia que debo poner en cada proyecto y de mi padre la valentía con la cual debo enfrentar cada adversidad que se me presente, dejando de lado temores y miedos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme concluir una meta más de mi vida.

A mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han sabido brindar. A mis hermanos que siempre han estado prestos en colaborar con cada proyecto.

Al Ing. Armando Álvarez y el Ing. Franklin Silva por su rápida y elocuente gestión en la consecución del presente proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICO	iii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iv
AUTORIZACIÓN	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
SIGLAS Y ABREVIATURAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	2
1.4 Importancia	3
1.5 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo general.....	3
1.5.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II	
GENERALIDADES	5
2.1 Fundamentación Teórica	5
2.1.1 Cámara termográfica	5
2.1.2 Tecnología infrarroja IR.....	7
2.1.3 Emisividad	16
2.1.4 Imagen termográfica en inspecciones eléctricas.....	17
2.1.5 Interruptor seccionador de medio voltaje.....	20
2.1.6 Directrices para la evaluación energética.....	21
2.1.7 Evaluación de la seguridad en las instalaciones, delta-T	24
2.1.8 Tratamiento y procesado digital de imágenes.....	25
2.1.9 SmartView	27

2.1.10	OpenCV	28
2.1.11	Regresiones por el método de mínimos cuadrados de Matlab	29
2.1.12	Fiabilidad y precisión en los instrumentos.....	32
2.2	Hipótesis.....	33
2.3	Variables de la investigación	33

CAPÍTULO III

	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	34
3.1	Importación de librerías y creación de un proyecto tipo consola	34
3.2	Desarrollo del algoritmo para establecer la región de interés	39
3.3	Parámetros evaluativos en los interruptores seccionadores de medio voltaje.....	42
3.3.1	Determinación de la temperatura de referencia.	42
3.3.2	Determinación de funciones polinómicas para el sistema.	46
3.4	Desarrollo del Algoritmo para la Evaluación de los Seccionadores (AEIS).....	52
3.5	Librerías para realizar la interfaz gráfica.....	54
3.6	Desarrollo de la interfaz gráfica	55

CAPÍTULO IV

	PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	59
4.1	Pruebas del funcionamiento del sistema.....	59
4.2	Análisis de resultados.....	75
4.3	Comprobación de hipótesis	76
4.3.1	Demostración de la hipótesis mediante Chi-cuadrado.....	76

CAPÍTULO V

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1	Conclusiones	78
5.2	Recomendaciones	80

	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
--	---	----

	ANEXOS	85
--	---------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características Cámara Termográfica.	6
Tabla 2: Materiales de los detectores semiconductores y sus cortes	11
Tabla 3: Requerimientos de termógrafos para cada nivel de especialización.	23
Tabla 4: Clasificación basada en la experiencia del mantenimiento	24
Tabla 5: Clasificación basada en la experiencia de sistemas eléctricos	25
Tabla 6: Mínimos cuadrados para dos variables experimentales	29
Tabla 7: Temperatura en los bornes de conexión de cada seccionador	43
Tabla 8: Análisis del error medio cuadrático de la respuesta de cada polinomio.....	50
Tabla 9: Error medio cuadrático por cada polinomio e imagen	51
Tabla 10: Coeficientes de correlación y determinación por cada polinomio.....	67
Tabla 11: Errores relativos en las mediciones del sistema de valoración.	68
Tabla 12: Error relativo promedio en las mediciones realizadas con el SVIS	71
Tabla 13: Diferencia del detalle en las imágenes termográficas	72
Tabla 14: Valoración de cada seccionador	73
Tabla 15: Comprobación de la hipótesis mediante Chi cuadrado	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cámara termográfica	5
Figura 2: a) Mapa térmico 3D y b) Dispositivo de termografía HeatWave 3D.	16
Figura 3: a) Transformador eléctrico. b) Tablero de baja tensión	17
Figura 4: Dependencia direccional de emisividad	19
Figura 5: El efecto de la oxidación en la emisividad del cobre	19
Figura 6: Relación longitud de onda vs emisividad del aluminio.....	20
Figura 7: Seccionador Monopolar tipo cuchilla en posición cerrado y abierto	21
Figura 8: a) Transformador 4KV de energía y b) Tablero principal de baja tensión.	22
Figura 9: Creación de nuevo proyecto en Microsoft Visual Studio 2013.	34
Figura 10: Selección del tipo de aplicación en Microsoft Visual Studio 2013	35
Figura 11: Asistente para aplicaciones Win32, Microsoft Visual Studio 2013.	35
Figura 12: Explorador de soluciones, Microsoft Visual Studio 2013	36
Figura 13: Agregando nuevo elemento, Microsoft Visual Studio 2013.....	37
Figura 14: Administrador de paquetes NuGet.....	38
Figura 15: Selección de proyectos en los que se va instalar la librería de OpenCV	38
Figura 16: Indicación de instalación correcta de librerías	38
Figura 17: Algoritmo Región de Interés parte 1	40
Figura 18: Algoritmo Región de Interés parte 2	41
Figura 19: Algoritmo Región de Interés parte 3	42
Figura 20: Temperatura en los bornes de conexión por cada seccionador	43
Figura 21: a)Imagen adquirida mediante imread b) Imagen procesada con rbg2gray	46
Figura 22: Análisis comparativo cualitativo de los seccionadores.....	47
Figura 23: Smart View selección del área para exportar datos.	48
Figura 24: Archivo exportado del software Smart View.....	48
Figura 25: vectores columna.....	49
Figura 26: Nube de dispersión 1200 puntos.....	49
Figura 27: Ajuste de los tres polinomios a la nube de dispersión	51
Figura 28: Algoritmo valoración interruptores parte 1	53
Figura 29: Algoritmo valoración interruptores parte 2	54
Figura 30: Creación de un nuevo proyecto, SistemasVIS.	55
Figura 31: Adición elemento UI para el SistemaVIS.....	56
Figura 32: Agregar elemento UI al SistemaVIS	56
Figura 33: Inicialización de la forma para el SistemaVIS.	57
Figura 34: Configuración general SistemaVIS	57

Figura 35: Configuración subsistema SistemaVIS.....	57
Figura 36: Configuración avanzada SistemaVIS.....	58
Figura 37: Distribución de botones, cuadros de texto e imágenes, SistemaVIS.	58
Figura 38: SVIS ventana principal	59
Figura 39: SVIS abrir archivo	59
Figura 40: SVIS seleccionar ventana principal,	60
Figura 41: SVIS imagen a ser procesada	60
Figura 42: SVIS filtrado de los elementos con una temperatura superior a 14 [°C].....	61
Figura 43: SVIS ventana para establecer marcadores.	61
Figura 44: SVIS ventana con los indicadores de temperatura de la región de interés.....	62
Figura 45: SVIS valoración del estado del área seleccionada.	62
Figura 46: SVIS selección de una imagen.....	63
Figura 47: Orden para la adquisición de imágenes	63
Figura 48: SVIS IR6 seccionador A, con las regiones A1 y A2.....	64
Figura 49: SVIS imagen IR6 seccionador A Valoración del área seleccionada.....	64
Figura 50: SVIS IR6 seccionador B, con las regiones B1 y B2.	65
Figura 51: SVIS imagen IR6 seccionador B Valoración del área seleccionada.....	65
Figura 52: SVIS IR6 seccionador C, con las regiones C1 y C2.	66
Figura 53: SVIS imagen IR6 seccionador B Valoración del área seleccionada.....	66

SIGLAS Y ABREVIATURAS

IOC: Infrarrojo de onda cercana.

IOEL: Infrarrojo de onda lejana.

IOL: Infrarrojo de onda larga.

IOM: Infrarrojo de onda media.

IR: Tecnología Infrarroja.

IRT: Termografía Infrarroja.

FC: Foto conductivo.

FPA: Arreglo de plano focal.

FV: Foto voltaica.

NDT: Pruebas no destructivas.

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y Defensa.

SDIO: Organización para la Iniciativa de Defensa Estratégica.

RESUMEN

En el trabajo de titulación se desarrolló una herramienta tecnológica, que en base a la imagen termográfica en el formato creado por un Grupo de Expertos en Fotografía (.JPEG) obtenida de los interruptores seccionadores de medio voltaje en operación, permite establecer regiones de interés por medio de trazadores sobre la imagen de estudio, las cuales podrán contener en cada una de estas los bornes de entrada o salida entre cada seccionador captado por la imagen, esto permite que el sistema obtenga la temperatura promedio de cada región mediante la conversión del pixelamiento, Rojo, Verde, Azul (RGB) con la paleta de colores de metales calientes a escala de grises, seguido a esto se aplicará una función matemática al promedio del pixelamiento que relaciona pixel y temperatura en cada región. El modelo matemático se obtiene previo al análisis de los puntos más relevantes de la imagen, siendo estos los más fríos y más cálidos de las regiones seleccionadas se presentarán tres indicadores que mostrarán la temperatura máxima, promedio y mínima del área seleccionada. La evaluación de las áreas tratadas anteriormente, están sujetas a la determinación de los diferenciales de temperatura obtenidos de la diferencia de la temperatura promedio y la temperatura referencial de operación normal 14,4 [°C], determinando el grado de importancia del desperfecto acorde a las directrices típicas de evaluación de los dispositivos de distribución eléctrica.

PALABRAS CLAVE:

- **PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**
- **IMAGENES TERMOGRÁFICAS**
- **INTERRUPTORES MEDIO VOLTAJE**

ABSTRACT

The project aims to develop a technological tool that based on the thermographic image in the format created by a Group of Experts in Photography (.JPEG) obtained from the circuit breakers of medium voltage in operation, allows to establish regions of interest through to tracers on the study image, which may contain in each of these the input or output terminals between each disconnect captured by the image, this allows the system to obtain the average temperature of each region by the pixel conversion of Red, Green, Blue (RGB) to the grey scale, followed by this will apply a mathematical function to the pixel-averaging ratio that relates the pixel and temperature in each region. The mathematical model is obtained prior to the analysis of the most relevant points of the image. In the selected regions will be presented three indicators that will show the maximum, average and minimum temperature of the selected area. The evaluation of this areas is obtained of differential average temperature and reference temperature operating 14.4 [° C], determining the degree of importance of the defect according to The typical guidelines for evaluation of electrical distribution devices.

Keywords: image processing, thermographic image, switch disconnecter.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La valoración del estado físico de los dispositivos y elementos que forman parte de las subestaciones eléctricas se los realiza a los principales elementos sujetos a fallas destructivas estos son los interruptores seccionadores y transformadores de potencia. (J. Mora, 2004) El objetivo principal de realizar el diagnóstico en los interruptores, es el de predecir un fallo antes de que este ocurra, de manera que aquellos dispositivos que están a punto de fallar pueden ser remplazados con anterioridad, lo cual reduce la incidencia del fallo y por ende un desequilibrio en el sistema eléctrico. (Mohd Rafi, 2007) De estas técnicas destaca la detección por infrarrojos debido a la seguridad, alta sensibilidad y eficiencia que estas pruebas entregan al instrumentista ya que no requieren de contacto físico manteniendo una distancia de seguridad y la continuidad del servicio al usuario final (Lian Guo, 2014).

Antecedentes teóricos

Ariza, Fernández (s.f.) en su trabajo “Caracterización de imágenes termográficas de pararrayos presentes en subestaciones eléctricas” (Ariza, 2006), plantea una metodología basada en el procesamiento de imágenes que permite la extracción y cálculo de descriptores asociados a una imagen. Además obtiene información de los valores de temperatura asociados a los píxeles de la imagen y la detección de anillos equipotenciales con la ayuda de la transformada de Hough.

(Ignacio Bejarano, 2015) en el trabajo “Reconocimiento de caracteres mediante imágenes en contadores de gas en entornos reales.”, hace uso de las disciplinas de aprendizaje automático, para desarrollar un detector de objetos y el reconocimiento óptico de caracteres mediante la aplicación de técnicas de visión por computador, cuyo objetivo es el procesado de y las transformaciones de imágenes.

1.2 Planteamiento del problema

El consumo energía eléctrica en el Ecuador ha tenido un crecimiento porcentual de 93,8% en lo que va del año 2004 al 2014 del total de energía que requiere el país (Estratégicos, 2015). La continuidad del servicio de energía eléctrica es primordial, ya que la mayor parte del sector productivo e industrial del país requiere de la constancia de este servicio.

El flujo de corriente en la parte distribución eléctrica hacia la carga es controlado por interruptores seccionadores de medio voltaje, por esta razón al existir sobrecargas, corrientes transitorias y cortocircuitos los portadores energéticos se calientan dependiendo de los picos de corriente, llegándose a producir un arco de corte, sin embargo cuando no se produce la ruptura, es decir al no superar el pico de corriente máximo admisible por la tira fusible y al estar siendo afectado por corrientes transitorias se presenta el calentamiento excesivo en los extremos del seccionador, a lo cual si no se realiza supervisiones mediante imágenes IR de los dispositivos energizados, con el transcurso del tiempo puede llegar a ocasionar la interrupción imprevista del servicio o el inicio de un incendio. Para ambos casos negativos se podría implementar un sistema tecnológico de valoración para los seccionadores de medio voltaje.

1.3 Justificación

La tecnología IR está presente en el análisis del comportamiento de máquinas eléctricas, transformadores de potencia y otros dispositivos eléctricos permitiendo la medición de temperatura. En conjunto permiten realizar el diagnóstico y valoración de los elementos mecánicos de conexión en baja, media y alta tensión en las inspecciones de mantenimiento en las subestaciones eléctricas a cargo de las empresas distribuidoras.

El sistema de valoración será capaz de ofrecer al técnico instrumentista una estimación del estado físico de los elementos estudiados considerando las normativas para realizar inspecciones de auditoría energéticas. De esta manera el personal encargado de la supervisión y funcionamiento, realizará

esta actividad de forma inmediata ya que no requerirá de más conocimientos previos.

1.4 Importancia

La consecución de este proyecto permitió el desarrollo de un sistema en el cual se abarca el análisis de cada uno de los bits en una imagen termográfica y la temperatura del interruptor seccionador en medio voltaje consiguiendo de esta manera que el entorno sea confiable.

Así como el inicio de futuros sistemas enmarcados en diversas áreas del mantenimiento eléctrico y mecánico que requiera del análisis de temperatura superficial de motores, transformadores y otros dispositivos eléctricos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas para la evaluación de interruptores seccionadores de medio voltaje.

1.5.2 Objetivos específicos

- Investigar los distintos tipos de software y formatos para el procesamiento y tratamiento de imágenes termográficas.
- Investigar acerca de las directrices típicas para aplicaciones eléctricas en instalaciones de distribución aérea.
- Investigar acerca de las técnicas para el análisis y procesado de imágenes.
- Desarrollar el algoritmo para establecer la región de interés.
- Desarrollar el algoritmo a usar en la evaluación de los interruptores seccionadores.
- Realizar pruebas experimentales del sistema trabajando con

seccionadores de medio voltaje energizados.

- Implementar el sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas para la evaluación de interruptores seccionadores de medio voltaje.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES

2.1 Fundamentación Teórica

2.1.1 Cámara termográfica

Con una cámara termográfica Figura 1 se puede captar la energía que irradia un objeto y que a la vez solo puede ser perceptible por el calor que emana. Las cámaras digitales normales se diferencian en que muestran la luz visible que reflejan los objetos.



Figura 1: Cámara termográfica

Fuente: (FLUKE, 2014)

El proceso para la adquisición de la imagen termográfica es el mismo que al usar una cámara digital ya que solo requiere que el operario enfoque apunte y dispare, de las imágenes adquiridas se podrá realizar una interpretación dependiendo del elemento enfocado.

De esta manera las cámaras termográficas generan las imágenes basadas en la temperatura de los objetos, básicamente midiendo la energía infrarroja que emiten y convirtiendo dicha información en imágenes cuyos puntos muestran diferentes colores en función de la temperatura superficial de los objetos. (FLUKE, 2014)

Las prestaciones y características tecnológicas son las siguientes Tabla 1:

Tabla 1

Características de la cámara termográfica FLUKE TI32.

Temperatura	
Rango de medida de la temperatura (sin calibrar por debajo de -10 °C)	-20 °C a +600 °C (-4 °F a +1112 °F)
Precisión de la medida de temperatura	± 2 °C ó 2% (a 25 °C nominales, el valor que sea mayor)
Tipo de detector	Microbolómetro no refrigerado basado en una matriz de plano focal de 320 x 240 píxeles
Total de píxeles	76.800
Banda espectral infrarroja	7,5 µm a 14 µm (onda larga)
Presentación de la imagen	
Paletas	Estándar: hierro (Ironbow), azul-rojo, alto contraste, ámbar, ámbar inverso, metal caliente, escala de grises, escala de grises inversa. Ultra Contrast™: hierro Ultra (Ironbow Ultra), azul-rojo Ultra, alto contraste Ultra, ámbar Ultra, ámbar inverso Ultra, metal caliente Ultra, escala de grises Ultra, escala de grises inversa Ultra.

Fuente: (FLUKE, 2014)

2.1.2 Tecnología infrarroja IR.

2.1.2.1 El cambio

La industria de la tecnología infrarroja (IR) ha evolucionado para atender las necesidades del comercio, la medicina, el monitoreo ambiental y el mantenimiento electromecánico. Esta tecnología fue impulsada por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), la Organización para la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDIO) y los militares tácticos.

El avance tecnológico más visible se refleja cuando se da la comercialización al consumidor general, dando paso a la investigación por parte de empresas privadas.

La termografía infrarroja (IRT) es un método atractivo para analizar la información térmica obtenida de una muestra, esta técnica detecta la energía emitida por la muestra y la convierte en una variación de temperatura. Consiguiendo de esta manera una imagen del tipo termográfica.

En general, las bandas de infrarrojas se dividen en cuatro partes: infrarrojo de onda corta (IOC), infrarrojo de onda media (IOM), infrarrojo de onda larga (IOL) e infrarrojo de onda lejana (IOEL), que son respectivamente de 0,75 a 3 μm , 3-5 μm , 8-12 μm y 50-1000 μm .

Hasta hace más de 200 años no se conocía de la tecnología IR, Herschel llevó a cabo el primer experimento, construyó un monochromator (fotómetro que mide la intensidad de luz y las propiedades ópticas) en el cual un termómetro fue utilizado para detectar energía radiante bajo luz del sol (Fariba Khodayar, 2015).

2.1.2.2 Los mercados

Las pruebas no destructivas (NDT) son un método para probar materiales sin destruirlos. Estos métodos se usan para evaluar e inspeccionar procesos y materiales con el fin de identificar las diferencias en características y componentes para discontinuidades.

Los métodos NDT son atractivos y útiles para determinar: ductilidad, resistencia al impacto, fatiga, fallas, operaciones anormales, etc. Las NDT se utilizan en muchas aplicaciones industriales para evaluar la calidad y la integridad de las piezas y equipos. En sistemas industriales, el monitoreo de la temperatura es conocido como uno de los criterios más importantes para evaluar el funcionamiento adecuado. La detección de patrones de temperatura anormales es útil para evitar futuros problemas potenciales (Bagavathiappan S, 2013).

De hecho, se aplican varios métodos de NDT y técnicas de medición en los procesos de mantenimiento para determinar el estado del equipo y realizar las reparaciones antes de que se produzca un fallo costoso. Por ejemplo, los métodos NDT aseguran que una gran variedad de equipos se mantienen tanto seguros como confiables. Esto incluye: sistemas eléctricos tales como tableros de distribución, sistemas de distribución, sistemas mecánicos, sistemas de vapor, calderas, controladores de motores, motores a diésel, electrónica de potencia. etc. Las técnicas de NDT son ampliamente utilizadas en la ciencia y la industria, especialmente porque no tiene ningún efecto perjudicial sobre los materiales (Fariba Khodayar, 2015).

2.1.2.3 Componentes tecnológicos

a) Detectores Infrarrojos

Un detector IR es sensible a la energía de radiación IR ya que reacciona a esta energía y la convierte en una forma cuantificable. Una revisión de los detectores de IR indica que se han producido tres avances significativos en los detectores de infrarrojos: el primero se ocupó de los sistemas de escaneo, el segundo de los sistemas de arreglos fijos y el tercero los detectores multicolores (Rogalski, 2010).

Algunos parámetros que afectan el rendimiento de los detectores IR son: la relación señal a ruido, la detectividad espectral D , la diferencia de temperatura de ruido equivalente, la respuesta espectral y el tiempo de adquisición. Existen diferentes tipos de detectores de IR, que pueden clasificarse de acuerdo con a diferentes criterios tales como longitud de

onda, sensibilidad, disipación de potencia y ancho de banda. Un cierto tipo de clasificación divide los detectores de IR en dos tipos generales: el primer tipo son detectores térmicos o bolométricos, que son de bajo costo y no dependen de la longitud de onda, pero tienen un rendimiento inferior (Corsi C. , 2010).

b) Arreglos de plano focal

La función básica de un sensor es recolectar fotones y convertirlos en información útil o datos. Una vez que los fotones son recogidos y enfocados por el lente, son contabilizados. Realizar esto requiere que los fotones se conviertan en algo que puede ser detectado electrónicamente. De esta manera el fotón viaja a través del sensor y termina por golpear los electrones sueltos o elevar la temperatura de algún dispositivo que cambia sus propiedades eléctricas (resistencia).

Un detector cambia las propiedades eléctricas en función de la luz incidente. Al igual que la retina humana, los detectores son frágiles, difíciles de obtener, costosos, complejos y específicos de la aplicación. A diferencia de la retina, no están conectados a un procesador de señales adaptativo como el sistema ocular y son fabricados por trabajadores con un entrenamiento mínimo de nueve meses (Corsi, 2015).

El plano focal es la ubicación en el eje óptico donde la luz es enfocada para un sistema de imágenes. La matriz de tales detectores es una matriz de plano focal (FPA). Una colección de matrices de plano focal o el FPA y algún hardware asociado también se denominan como un conjunto de plano focal (FPA).

Al hablar de un FPA, "unidad de celda" o "elemento" son más apropiados que "píxel" (resultante de la confusión con los píxeles de la pantalla) o detector (a veces el FPA entero se llama un "detector"). A menudo, "célula unitaria" se refiere sólo a un píxel en la estructura de lectura. Sin embargo, casi todo el mundo utiliza píxeles para el elemento más pequeño de un FPA (Corsi, 2015).

La conversión de luz a un cambio medible electrónicamente puede ocurrir a través de varios fenómenos físicos. Los mecanismos más comunes son un cambio térmico de resistencia (un bolómetro), un cambio de voltaje (fotovoltaico), una corriente generada, o una conductancia generada por un proceso de estado sólido (fotoconductividad). Independientemente del mecanismo de esta transición de "fotón" a "electricidad".

Procesos clásicos de semiconductores

- Fotoconductor (FC): generación de electrones que modifican la resistencia del material.
- Fotovoltaica (FV): generación de dos electrodos de una diferencia de voltaje por el fotón creando pares de electrones y agujeros.

Nuevos procesos de semiconductores

- Fotoemisión interna: un efecto foto-misiva semiconductor que se produce en barreras Schottky.
- Pozos cuánticos: que forman una trampa cuántica de FC.

Efectos no semiconductores

- Bolométrico: el cambio en la resistencia con un aumento de la temperatura
- Piroeléctrico: un cambio inducido por la temperatura en las propiedades eléctricas causado por un cambio en la polarización y / o carga superficial causado por un aumento de la temperatura.

El arreglo grande se hace generalmente de semiconductores FV. Se prestan más a grandes matrices debido a su menor disipación de energía térmica. La operación fotovoltaica también proporciona mejoras con respecto al ruido sobre FC.

Para todos los detectores de semiconductores (FC, FV, barreras de Schottky y pozos cuánticos), la longitud de onda de corte se puede determinar a partir de la banda de energía en el material mediante la ecuación 1:

$$\lambda_{co} = \frac{1.2}{E_g} \quad (1)$$

Donde; λ_{co} es la longitud de onda de corte en micras, donde la respuesta es el 50 por ciento del pico, E_g es la brecha de energía de los electrones en voltios.

Existen varios materiales de detector semiconductor, cada uno con su propio corte y E_g (ver Tabla 2). A longitudes de onda por encima de los puntos de corte, los materiales suelen volverse transparentes y pueden usarse como materiales ópticos refractivos (Schlessinger, 1989).

Tabla 2

Materiales de los detectores semiconductores y sus cortes

Material	Brecha de energía [eV]	Longitud de onda [um]	Características temperatura operativa
Si	1.08	1.15	300
Inx GaAs/InP with X=0.53	0.73	1.7	280
GE	0.66	1.88	280
Inx GaAs/InP with X=0.8	0.49	2.5	270
HgCdTe	Variable	3 a 18	50 a 250
InAs	0.41	3	77
PbS	0.41	3.02	270
PbTe	0.32	3.88	270
PbTe	0.27	4.6	200
PbSe	0.29	4.28	250
PbSSe	0.17 a 0.42	3 a 7	100 a 200
PbSnTe	0.3 a 0.06	4 a 20	40 a 180
InSb	0.18	6.89	80
Si:Zn	0.31	4	100
Si:In	0.16	7.8	25
Si:Bi	0.069	18	20
Si:Ga	0.065	19	15
Si:As	0.049	25.3	10
Si:B	0.045	27.6	15
Si:Sb	0.039	31.8	15

Fuente: (Schlessinger, 1989)

c) **Procesadores de imagen y señal**

El viaje del fotón a través del sensor termina con su conversión a una señal electrónica en la matriz del plano focal. Sin embargo, las señales electrónicas son poco útiles para las personas. Es la función del procesador de señal y de imagen extraer y formar información útil a partir de estas señales generadas por fotones. En otras palabras, la función del procesador de señal e imagen es formar información útil a partir de la salida FPA.

Para ilustrar la importancia de estas funciones, actualmente alrededor del 30 por ciento del peso de un sistema IR está dedicado al procesamiento de señales e imágenes. Proporcionar información útil al operador del sistema de IR a tiempo que evita la sobrecarga y es importante para los sistemas de alta velocidad. Esta reducción de datos se logrará en gran medida a través del procesamiento de señales e imágenes.

Cuanto más autónomo y avanzado sea un sistema de sensores, se requerirá más del procesamiento de señal e imagen. El procesamiento desempeña un papel determinante en el rendimiento del sensor. El procesamiento de señales e imágenes es una disciplina extensa, variada y rápidamente cambiante que debe ser personalizada para cada aplicación y sensor.

Desde el advenimiento de los sensores de imagen, los diseños electro-ópticos han tendido a sobrecargar los sistemas de procesamiento y comunicaciones que los soportan. Históricamente, ni las computadoras ni las tecnologías de comunicación han sido efectivas en el manejo de las velocidades de datos en tiempo real generadas por los sensores. Siempre existe un cuello de botella donde debe producirse el procesamiento de la imagen, y aparece otro más si se tiene que transmitir estos datos.

Debido a esto, el procesador de imágenes suele ser un controlador de gran capacidad y potencia para un sistema IR. Aunque las grandes mejoras se producen continuamente en la miniaturización y la velocidad de procesamiento, pero se mantiene la disparidad. A medida que los planos

focales crecen (y crecen), también lo hacen los megabits por segundo que generan. (Schlessinger, 1989) La velocidad bruta de datos de un FPA se expresa en la ecuación 2:

$$\text{Tasa datos} = \# \text{pixeles} \times \text{cuadros por segundo} \times \# \text{bits digitación} \quad (2)$$

2.1.2.4 Entornos

El entorno al que va a ser expuesto un sensor es crucial para su diseño, costo, peso y rendimiento. Ya que deberán funcionar en plataformas agitadas en la atmósfera y en condiciones que van desde selvas hasta desiertos árticos. Deben ser aptos para todos los ambientes.

Deben estar diseñadas para operar en plataformas vibrantes e inestables como un helicóptero, un tanque en movimiento o un avión pequeño. Por esta razón, se requiere la estabilización de la imagen para tener alta resolución. Además, los efectos de vibración en los sensores IR pueden manifestarse como un efecto estroboscópico peculiar en el que la resonancia hace que la función de transferencia de modulación aumente con una frecuencia creciente, y luego desaparezca después de que pase la resonancia.

También se utiliza compensación electrónica de movimiento. Esto tiene un gran impacto en la memoria necesaria, el peso de la electrónica y la potencia. Las temperaturas de funcionamiento en los sensores IR varían mucho debido a los diferentes entornos y aplicaciones. Las especificaciones de temperatura son también extremas (-40 ° a 70 ° C) para el uso militar en selvas y en capas de hielo. Esta diversidad de despliegue probablemente se expandirá a medida que los sensores IR se construyan para durar más tiempo.

Las variaciones de temperatura pueden causar cambios en el enfoque, inclinación de los elementos y mayor aberración. Esto lleva a los fabricantes a incluir la óptica de compensación térmica móvil (Schlessinger, 1989).

2.1.2.5 Otras aplicaciones

La termografía infrarroja se esfuerza por utilizar equipos que ofrecen un alto rendimiento, alta precisión y bajo costo. La termografía por infrarrojos puede implicar pronto el uso de robots en ambientes peligrosos, que también serán discutidos. Las nuevas tecnologías y los avances en la termografía por infrarrojos han creado nuevos mercados como: construcción inteligente, automoción y control del medio ambiente. (Corsi, 2015)

Otros usos no militares incluyen búsqueda, rescate en la nieve, rescate en la montaña, detección del cruce ilegal en las fronteras, y ayuda a pilotos en la noche o en mal tiempo. En comparación a los detectores de radar la tecnología IR es más barata y eficaz, esta tecnología se ha convertido en una opción al reemplazar al radar en operaciones de policía y patrullas fronterizas.

Además, IR pueden utilizarse para la detección y combate de incendios forestales, inspección y vigilancia discreta. Uno de los principales usos militares es la navegación, que permite a los helicópteros de ataque volar y a los aviones de ala fija realizar la penetración de bajo nivel en condiciones climáticas adversas y por la noche. Con la selección apropiada de lente, se pueden utilizar para navegar por la lluvia, el polvo, la niebla y el humo.

Obtener contacto visual de larga distancia con un objeto es un elemento clave en el éxito de las misiones de apoyo aéreo. IR ofrece a los pilotos un nivel tan alto de identificación y visión por la noche que incluso se usan durante el día. Además, su naturaleza pasiva es una ventaja en situaciones de combate real, ya que son menos vulnerables a las contramedidas. Cabe mencionar que con IR, no hay señal emitida. Esto se compara favorablemente con respecto al radar, que grita su posición con pulsos de radio frecuencia. Debido a esto, IR es usada en ataques de alta precisión y misiones de interceptación profunda (Scott, 1989).

2.1.2.6 Futuros desarrollos.

Mirando hacia el futuro, las tecnologías de detectores térmicos IR continuarán apuntando a una mayor sensibilidad, mayor eficiencia y mejor rendimiento a menor costo. Estos detectores se desarrollarán adicionalmente para aumentar su temperatura de funcionamiento, reducir la disipación de energía y eliminar el sistema de enfriamiento y los componentes criogénicos.

En el futuro el trabajo se enfocará en aumentar la densidad de píxeles, incrustar detectores con algoritmos inteligentes, mejorar el tiempo de respuesta, aumentar la resolución espacial, reducir la no uniformidad y el tamaño de píxeles, así como habilitar capacidades multispectrales. Una cuestión importante es sin embargo la (enorme) inversión requerida por la industria. En ese sentido podríamos ver un ritmo reducido a los resultados relacionados con la necesidad de proporcionar primero un retorno de las inversiones con la tecnología actual (Fariba Khodayar, 2015).

2.1.2.7 Equipos recientes

Heat-Wave, que es un dispositivo 3D combinado con una cámara térmica, cámara de color (cámara RGB-D y cámara térmica adicional).

Todos los sensores de este dispositivo tienen un formato cerrado y están montados en un mango ergonómico para el despliegue portátil (Moghadam P, 2014).

Los diferentes puntos de vista grabados mejoran la precisión. El equipo se puede utilizar en diferentes aplicaciones, tales como: monitoreo de eficiencia energética, pérdidas de energía, evaluación mecánica y eléctrica, monitoreo de construcción, detección de incendios, primeros auxilios y diagnóstico médico no invasivo, etc. También puede utilizarse en NDT, ya que puede localizar fuentes de pérdidas de energía en edificios y puede identificar componentes defectuosos con temperaturas anormales en la industria.

La Figura 2 muestra un sistema térmico 3D de un sistema de bomba de agua del enfriador y un dispositivo de termografía HeatWave 3D. En estas

aplicaciones la ventaja es obviamente la proyección de datos térmicos sobre la forma 3D del objeto, permitiendo una mejor comprensión de la cualidades IR (Vidas S, 2013).

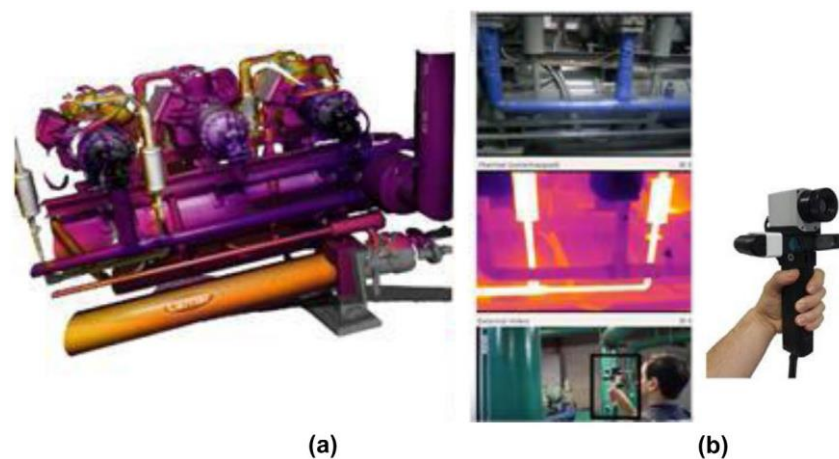


Figura 2: (a) Mapa térmico 3D de un sistema de bomba de agua del enfriador usando la paleta de colores de hierro-arco. (b) Dispositivo de termografía HeatWave 3D.

Fuente: (Vidas S, 2013)

2.1.3 Emisividad

La emisividad infrarroja es un parámetro clave en la medición infrarroja y está influenciada por numerosos factores, como la temperatura, la longitud de onda, la composición química, la rugosidad superficial y la oxidación superficial. Incluso para el mismo material, los valores de emisividad descritos en diferentes literaturas son a veces diferentes entre sí.

Los métodos de medición de emisividad son directa e indirecta. La medición indirecta se refiere principalmente al método de reflexión en el que la emisividad se puede calcular sobre la base de la ley de Kirchhoff midiendo la reflectividad y la transmisividad del objeto.

El método de medición de emisividad directa se basa en la medición mediante la radiación de la muestra y el cuerpo negro en las mismas condiciones (por ejemplo, temperatura, longitud de onda y ángulo), en el

que la emisividad se calcula como la relación de los dos valores de medición (Feng, y otros, 2015).

La emisividad en la piel humana es de 0,97 y 0,98. El alto índice de emisividad de la piel se debe a que la reflectividad es menor, en comparación a los metales brillantes los cuales poseen coeficientes de emisividad de 0,11.

En el particular caso de que el elemento de estudio sea un dispositivo electromecánico constitutivo de una subestación eléctrica, el coeficiente de emisividad es de 0,95 con una temperatura ambiente de 10°C a 18°C (González, 2010).

2.1.4 Imagen termográfica en inspecciones eléctricas.

Las aplicaciones de las imágenes térmicas en el campo de la ingeniería de energía, están enfocadas a la detección de problemas detectados por una cámara de infrarrojos que se pueden ver sólo mientras el equipo esté en el estado operativo. El uso de imágenes térmicas en la industria de la energía eléctrica está estrechamente relacionado con la medición de cantidades eléctricas, principalmente la cantidad de corriente, lo que implica disipación en elementos individuales del sistema. La tarea de medir las cantidades eléctricas y de abrir los armarios debe ser confiada a un electricista autorizado para que la persona que realiza la termografía pueda auditar indistintamente el sistema. Las imágenes termográficas de un subsistema de potencia Figura 3 (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

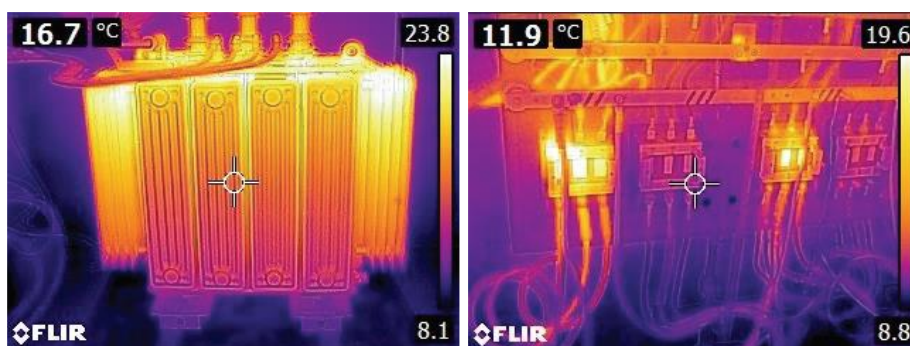


Figura 3: a) Transformador eléctrico. b) Tablero de baja tensión

Fuente: (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

Al revisar las imágenes termográficas sin medir cantidades eléctricas puede conducir a conceptos erróneos sobre la seguridad de la instalación. La aplicación de análisis de imágenes térmicas se realizó en un alimentador de distribución de la 10 / 0,4 kV TS se muestra en la Figura 3. Existen muchos desafíos que pueden surgir durante la inspección.

Ya que aparentemente se puede ver puntos calientes durante la inspección infrarroja, pero de hecho puede ser el reflejo del calor del cuerpo, la variación de la emisividad, la ganancia solar o en algunos casos las manifestaciones de calor de corriente de Foucault.

El clima también puede influir en la inspección IR; Por lo tanto el viento, la lluvia, la niebla, la nieve puede cambiar las lecturas de IR. El primer y principal desafío es el ajuste de la emisividad. La emisividad que se fijó en el momento de la auditoría a 0,8 de acuerdo con recomendaciones empíricas.

La determinación de la emisividad es un desafío significativo. La regla básica a tener en cuenta es la siguiente: todo lo que parece ser un problema de emisividad puesto a 1 será un problema incluso a valores de emisividad más bajos.

El valor de emisividad recomendado para la inspección de la instalación eléctrica es de 0,9 según la información obtenida del Centro de Entrenamiento Infrarrojo (ICT). La razón de esto es que el rango de emisividad para la mayoría de las pinturas y materiales aislantes oscila entre 0,9 y 0,95. En la Figura 4, se puede ver una gran diferencia en emisividad entre conductores y aisladores, así como la dependencia direccional de emisividad en el ángulo Θ de la cámara y la superficie del objeto bajo observación.

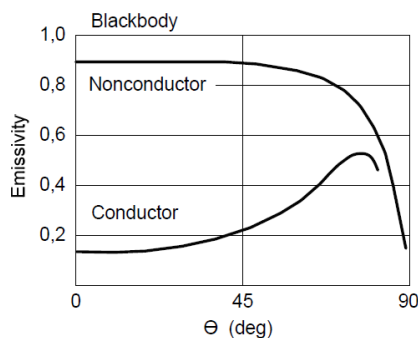


Figura 4: Dependencia direccional de emisividad

Fuente: (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

Una amplia gama de diferentes valores de emisividad es obvia para los conductores en el caso de pequeños cambios en el ángulo de la cámara. La emisividad de los conductores depende principalmente del grado de oxidación. Como el metal más común en la distribución de electricidad, el cobre tiene diferentes valores de emisividad. La emisividad en función de la temperatura para diferentes grados de oxidación puede verse en la Figura 5.

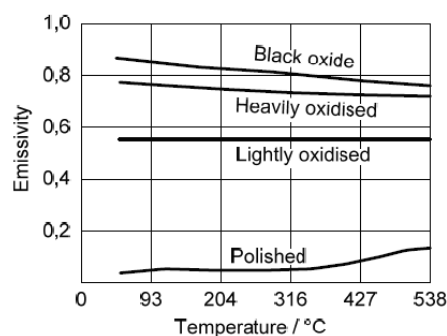


Figura 5: El efecto de la oxidación en la emisividad del cobre

Fuente: (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

Además de la dependencia de la emisividad en el ángulo de registro, la temperatura del objeto y el grado de oxidación, el intervalo de longitudes de onda utilizado para el análisis termal también es importante. La Figura 6 muestra la dependencia de la emisividad de la longitud de onda sobre el carácter del acabado superficial del aluminio, que es el segundo material más frecuentemente utilizado en la distribución de energía eléctrica.

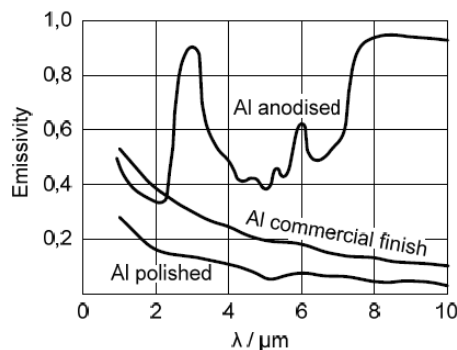


Figura 6: Relación longitud de onda vs emisividad del aluminio

Fuente: (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

De las Figs. 4, 5 y 6 es claro que la elección de la emisividad no es una tarea fácil de hacer y es posible cometer un error incluso en el caso de un usuario muy experimentado. En el ejemplo analizado, debido a la selección de un valor inadecuado de emisividad, el resultado sería una desviación significativa del valor de temperatura medido. La diferencia entre la emisividad seleccionada 0,8 y la emisividad recomendada 0,9 por las mediciones realizadas significa una lectura de temperatura más alta de 3 ° C. En el caso de la emisividad 0,7, la temperatura aumentará en 6,8 ° C (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

2.1.5 Interruptor seccionador de medio voltaje.

Es un dispositivo electromecánico, que cumple la función de apertura y cierre de líneas de distribución en subestaciones, bajo ciertas condiciones, en el caso de accionamiento las corrientes deben ser de baja intensidad y para cuando se encuentran en operación deben soportar corrientes de elevada amplitud, cercanas a las de cortocircuito.

2.1.5.1 Seccionador monopolar tipo cuchilla

La función principal de este tipo de seccionador es la de garantizar el aislamiento en líneas de subestaciones, su configuración mecánica permite visualizar si el trecho se encuentra sin tensión Figura 7 (WEG, 2017).



Figura 7: Seccionador Monopolar tipo cuchilla en posición cerrado y abierto

Fuente: (WEG, 2017)

2.1.5.2 Las inspecciones y los procedimientos de pruebas en los seccionadores

Inspección visual y Mecánica

- Realizar la medición de la resistencia en los bornes de conexión, investigar los valores que sobrepasan el 50% del valor más bajo.
- Los niveles de torque del tornillo deben estar de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- Inspección termográfica para la detección de fallos en caliente (ANSI/NETA, 2011).

2.1.6 Directrices para la evaluación energética.

Según las normas internacionales, la termografía se clasifica como uno de los métodos de ensayo no destructivo (NDT). En el campo de la imagen térmica no son únicas, representando varias normas diferentes que están relacionadas principalmente con ciertos campos técnicos.

Los criterios de validez y seguridad de las instalaciones eléctricas basadas en la información del termograma se reducen al análisis de la temperatura absoluta y relativa de los elementos observados del sistema, en comparación con componentes similares bajo carga similar.

La interpretación de los termogramas depende principalmente del conocimiento y la experiencia del usuario. Glavaš, Józsa, & Barić, 2016 indican una de las técnicas para realizar una auditoría energética en una cámara de transformación de 10 / 0,4 kV y distribución asociada.

El sistema que analizan es esencialmente una planta industrial que consiste en edificios administrativos e instalaciones de producción. Los edificios de oficinas se clasifican como edificios no residenciales con sistemas técnicos complejos. Las necesidades energéticas se dan mediante gas natural y electricidad.

Construido en 1950, la planta consta de la administración con el área de 487 m² y el área de trabajo de 3414 m². El consumo anual de gas natural y electricidad es de 162269 kWxh y 167 390 kWxh, respectivamente. El gas natural se utiliza para el calentamiento del espacio, mientras que la electricidad se utiliza para alimentar las máquinas.

De acuerdo con lo anterior, es evidente que el suministro continuo de electricidad es esencial para los procesos de negocio en la Figura 8 se muestra a) el transformador principal de alimentación de 10 / 0,4 kV y b) el tablero principal de baja tensión del subsistema de distribución de electricidad, respectivamente.

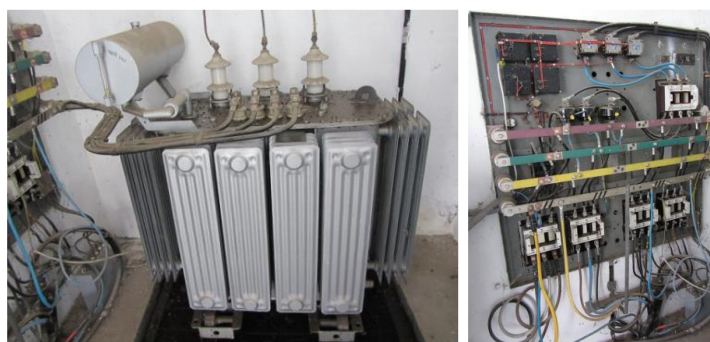


Figura 8: a) Transformador 4KV de energía y b) Tablero principal de baja tensión.

Fuente: (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

En el trabajo menciona los estándares, educación y conocimientos requeridos para una correcta interpretación del termograma. El contenido

de los conocimientos necesarios en el campo de la imagen térmica se describe mejor en BS ISO 18436-7: 2014 "Monitoreo de estado y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación del personal Parte 7: Termografía ", La Tabla 3 describe los requisitos de la ISO 18436-7 en términos de conocimientos necesarios para ciertos niveles de especialización.

Tabla 3

Requerimientos de termógrafos para cada nivel de especialización.

Nivel de especialización	Requerimientos
Termógrafo 1	El operador profesional puede realizar una Auditoría Termográfica utilizando procedimientos bien definidos, para evaluar los resultados del análisis y para procesar la actividad de post-elaboración elemental de las imágenes térmicas. Necesita 32 horas de formación y 12 meses certificados (o 400 horas) de actividad profesional.
Termógrafo 2	El operador profesional es capaz de realizar una auditoria termográfica avanzada mediante el uso de muchos instrumentos de operación, e identificar la acción correctiva correcta para el problema observado. Necesita 64 horas de entrenamiento y 24 meses certificados (o 1.200 horas) de actividad profesional.
Termógrafo 3	El operador profesional es capaz de desarrollar procedimientos, software e instrucciones avanzadas para el uso correcto de la termografía.

Continua 

Termógrafo 3	También es capaz de identificar condiciones complicadas y recomendar acciones correctivas de termodinámica. Necesita 96 horas de formación y 48 meses certificados (o 1.920 horas) de actividad profesional.
--------------	--

Fuente: (I.Infraspection, 2008)

2.1.7 Evaluación de la seguridad en las instalaciones, delta-T

La evaluación mediante el diferencial de temperaturas o el delta-T, sirve para determinar el grado de daño del elemento analizado y consiste en identificar la temperatura que se encuentra por encima de la excepción o de referencia. Para la clasificación de sistemas eléctricos y equipo mecánico en la Tabla 5 se indica el grado de prioridad para atención por fallos. Al revisar sistemas eléctricos de bajo voltaje y equipo de control se hará uso de la Tabla 4. En el caso de la temperatura de referencia se podrá considerar la temperatura ambiente, un componente con las mismas condiciones o la temperatura máxima permisible (Glavaš, Józsa, & Barić, 2016).

Tabla 4

Clasificación basada en la experiencia del mantenimiento de sistemas eléctricos y equipamiento mecánico

Prioridad	Delta-T/°C	Acción recomendada
1	>40	Acciones correctivas Se requiere inmediatamente
2	20-40	Acciones correctivas tan pronto como sea posible
3	10-20	Acciones correctivas bajo previa programación
4	1-10	Acciones correctivas en el siguiente mantenimiento.

Fuente: (I.Infraspection, 2008)

Tabla 5**Clasificación basada en la experiencia del mantenimiento de sistemas eléctricos de bajo voltaje y equipo de control**

Prioridad	Delta-T/°C	Acción recomendada
1	>30	Acciones correctivas Se requiere inmediatamente
2	20 – 30	Acciones correctivas tan pronto como sea posible
3	10 – 20	Acciones correctivas bajo previa programación
4	1-10	Acciones correctivas en el siguiente mantenimiento.

Fuente: (I.Infraspection, 2008).

2.1.8 Tratamiento y procesamiento digital de imágenes.

Dentro de las diferentes áreas de investigación de las imágenes termográficas, la medicina usa el procesamiento para la detección del cáncer de mama, este tipo diagnóstico no invasivo es posible ya que las células cancerígenas ocasionan el aumento de temperatura en ciertas partes del seno de la mujer (Lahiri, Bagavathiappan, Jayakumar, & Philip, 2012).

Por otro lado se comienza a utilizar el análisis de las imágenes termográficas para vigilar las extensiones forestales y el contenido de la clorofila, haciendo uso de lentes específicos (Widjaja Putra & Soni, 2017).

En algunos procesos mecánicos se realiza la soldadura por fricción, consiste en aplicarles diferentes tipos de tensión mecánica a las partes a soldar, esto indica que la unión metálica se debe a la exposición de fricción constante y la alta velocidad de un elemento contra otro. Mediante el procesamiento de las imágenes termográficas, es posible obtener el modelo de distribución de temperatura en las partes metálicas (Maio, y otros, 2017).

En el área de la energía se utiliza para monitorizar los conductores utilizados en las infraestructuras de las centrales nucleares, en especial cuando se requiere una revisión periódica, de esto hay que considerar que

por los mismos circula altas corrientes y tensiones de 4 kV a 13.8 kV. Esto motiva el uso de imágenes termográficas para la seguridad y eficiencia que estos equipos proporcionan al trabajar con sistemas en operación. (Che-Wung, Kyung-Nam , & Sun-Chul , 2012) En las subestaciones eléctricas el análisis cuantitativo del estado físico e interno del equipo eléctrico se consigue mediante el desarrollo de técnicas de evaluación de equipos en mantenimiento, basadas en modelos físicos obtenidos a través de pruebas experimentales, algoritmos iterativos y métodos de elementos finitos. Los modelos desarrollados determinan la distribución del calor en la superficie del equipo y al mismo tiempo se evidencian por el uso de imágenes termográficas (Liang , y otros, 2014).

Existen estudios que consideran el color y la región de interés de la imagen, de éstos los técnicos en termografía toman en cuenta la paleta de colores falsos que presentan una única variación de color, para estos casos el equilibrio de los colores negros y blancos en combinación con uno de los colores RGB determina una variación de temperatura. Esta es la razón por la cual varios estudios deben basar su investigación en el uso de histogramas mediante los cuales se filtran ciertos colores que denotan un valor de alta temperatura en una región específica de la imagen.

El tratamiento de imágenes termográficas se presenta en sistemas que permiten la detección de facial, para lo cual es necesario procesar dichas imágenes, la secuencia utilizada para este fin requiere un espacio controlado en cuanto al nivel de iluminación y temperatura ya que esto fue realizado en una habitación adecuada para este fin. La secuencia para la extracción de información, requiere de la binarización de la imagen, esto permite aislar todos los elementos externos al contorno de la persona capturada en la imagen, logrando filtrar la silueta de la persona debido a la temperatura corporal. Con respecto al medio ambiente, se aplica el algoritmo de erosión para separar individualmente cada elemento dejando la cara y el torso de la persona. Finalmente, se aplica un algoritmo de segmentación con filtros de contorno asociados a una figura elíptica para localizar el centro de la cara así como para determinar la posición x,y de

este punto y ubicarlo en la imagen original (Mariusz, Koprowski, & Wróbel, 2015).

Algunos estudios de diagnóstico de equipos eléctricos hacen uso de una relación área / color con la ayuda de Matlab y en los que elaboran un procedimiento basado en el método de selección de áreas para encontrar las diferencias en una imagen, en una parte se realiza la selección de estas regiones y guarda la información obtenida de la para la creación de histogramas. Mientras que la otra parte del sistema se centra en el área de mantenimiento, por lo que hace un entrenamiento del sistema considerando tres casos de diferentes temperaturas de un motor trifásico bajo condiciones similares cada uno; tales como la distancia de captura termográfica y la temperatura ambiente, esto porque las muestras fueron recogidas de un motor que se encontraba en un ambiente controlado.

En la primera secuencia, se registró la imagen termográfica de un motor trifásico en perfectas condiciones. En la segunda secuencia, se monitorizó un motor con 2 barras rotas y en la tercera imagen un motor con fallo en un anillo de rotación. Una vez que se insertó estas imágenes en el sistema, se puso a prueba el mismo mediante el uso redes neuronales para la clasificación de elementos similares (Glowacz & Glowacz, 2017).

Otros estudios presentan el uso de redes neuronales para el análisis del envejecimiento de los descargadores de sobretensión, basados en informes termográficos y en el tercer armónico de la corriente de fuga de drenaje, en el cual concluyen con la existencia de una fuerte relación entre las variables descritas (Novizona, Maleka, Bashira, & Asilaha, 2013).

2.1.9 SmartView

Software propio de la marca Fluke, forma parte del sistema termográfico, en el cual se puede analizar y ajustar imágenes permitiendo crear informes termográficos con información detallada.

Para su funcionamiento se requiere específicamente del formato de imagen .IS2. Este formato contiene la información de temperatura por cada punto o pixel de la imagen con siguiendo de esta manera establecer marcadores

y áreas de estudio con ayuda del software SmartView. (Fluke, Software SmartView, 2014)

2.1.10 OpenCV

Open Source Computer Vision Library es lanzada bajo la licencia BSD, libre para usos comerciales y académicos. Las interfaces que posee son las siguientes; C++, C, Python y Java. Es soportado por Windows, Linux, Mac OS, iOS y Android. Open CV fue diseñado para la eficiencia computacional y principalmente para aplicaciones en tiempo real.

La optimización de escritura en C/C++, hace que las librerías tomen ventaja con los procesadores multi-núcleo. Al habilitar OpenCL, se puede tomar ventaja de la aceleración de la plataforma de computación.

OpenCv es adoptado alrededor de todo el mundo, con más de 470000 usuarios en la comunidad y número estimado de descargas que excede los 9 millones.

Se emplea desde arte interactivo, inspección de minas, creación de mapas para la web o la robótica avanzada (OpenCV, 2013).

Conjunto de funciones:

- Estructuras y operaciones básicas: matrices, grafos arboles
- Procesamiento y análisis de imágenes: filtros momentos, histogramas, etc.
- Análisis del movimiento y seguimiento de bloques: plantillas de movimiento, seguidores, flujo óptico, etc.
- Reconocimiento de objetos: Objetos propios, modelos HMM, etc
- Reconstrucción tridimensional (fase experimental): detección de objetos, seguimiento de objetos tridimensionales, etc.
- Interfaces gráficos de usuario y adquisición de video.

2.1.11 Regresiones por el método de mínimos cuadrados de Matlab

El software de análisis matemático Matlab presenta una gran variedad de herramientas y comandos para determinar modelos matemáticos (Moore, 2007).

El método de mínimos cuadrados es usado para encontrar los coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ de una función $y = f(x, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ de manera que el modelo encontrado tiene ajustar a una tabla de valores, Tabla 5 que relaciona dos o más variables, en este caso se considerará variable independiente y una variable dependiente:

Tabla 6

Mínimos cuadrados para dos variables experimentales

x_i	y_i
x_1	y_1
x_2	y_2
\vdots	\vdots
x_n	y_n

Para calcular los coeficientes, se requiere que la función sea mínima como se muestra en la ecuación 3

$$S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = \sum_{i=1}^m [f(x, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) - y_i]^2 \quad (3)$$

La condición para que $S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ tenga un valor definido en un punto, es que todas las derivadas parciales sean nulas en ese punto ver la ecuación 4.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} = 0, \frac{\partial S}{\partial \alpha_2} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \alpha_n} = 0 \quad (4)$$

Siendo las soluciones los parámetros $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ y a la vez indica como es la función que mejor se ajusta la tabla de valores. La función $f(x, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$ podrá ser de cualquier tipo, pero para el presente estudio Matlab calcula la función de tipo polinomio.

Para realizar los cálculos indicados, Matlab posee el comando **polyfit** . Con los siguientes campos: un vector de entrada **gi**, un vector de salida **gs** y un entero **1** que indique el orden del polinomio que va a relacionar a los valores (Moore, 2007).

```
>>polyfit(gi,gs,1)
```

Del comando mencionado se obtendrán los coeficientes α_1 y α_2 para una función que describe una línea recta ecuación 5:

$$f(x)=\alpha_1x+\alpha_2 \quad (5)$$

2.1.11.1 Bondad de ajuste

La bondad de ajuste sirve para validar el modelo estadístico que fue obtenido de datos experimentales. Para ello es necesario conocer el error típico de la estimación S_e , el coeficiente de correlación R y el coeficiente de determinación R^2 .

Error típico de estimación S_e ; es la raíz cuadrada que existe entre el cuadrado la variable dependiente y_i menos las estimaciones numéricas del modelo encontrado \hat{y}_i sumando entre todos los elementos y dividido entre $n-2$, siendo n la cantidad de muestras usadas para el modelo de la ecuación 6:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (6)$$

Coefficiente de correlación R ; conocido como el coeficiente de Pearson, se obtiene por medio de la Ecuación 7y 8 el cual mide la diferencia de la

puntuación obtenida y la puntuación pronosticada del modelo, los valores comprendidos de este coeficiente van de -1 a 0 y +1. Cuando el valor es +1, significa que a medida que crece la variable independiente, se produce un incremento en la variable dependiente, si el coeficiente es -1 se asocia a valores altos de la variable independiente le corresponde valores bajos en la variable dependiente y cuando el coeficiente tiende a cero indica que el modelo no asociará correctamente las variables, además es necesario establecer el grado de asociación entre las variables y sus medias calculando la covarianza, Ecuación 9:

$$Cov_{y\hat{y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)}{n - 1} \quad (7)$$

$$Var_{y_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1} \quad (8)$$

$$R = \frac{Cov_{y\hat{y}}}{\sqrt{Var_{y_i}} \sqrt{Var_{\hat{y}_i}}} \quad (9)$$

Coefficiente de Determinación; es una medida estandarizada con valores comprendidos entre **0** y **1**, Cuando los valores son independientes el coeficiente tiende a **0** y por el contrario cuando hay una relación perfecta entre las variables el coeficiente será cercano a 1, Ecuación 10. Para obtener este coeficiente se elevará al cuadrado el coeficiente de correlación (Novales, 2010).

$$R^2 = \left(\frac{Cov_{y\hat{y}}}{\sqrt{Var_{y_i}} \sqrt{Var_{\hat{y}_i}}} \right)^2 \quad (10)$$

2.1.12 Fiabilidad y precisión en los instrumentos

La buena calidad de un instrumento depende de la confiabilidad y precisión de este.

La confiabilidad en un equipo indica la capacidad que posee para dar reproducibilidad en las mediciones bajo las mismas condiciones de medición.

La precisión de un instrumento indica la concordancia que hay entre las medidas reales y las entregadas por el equipo por el equipo de medición, bajo este concepto un equipo será más preciso cuando menor sea la diferencia entre distintas medidas y la medida real de una misma magnitud.

Cuando el equipo de medición puede recordar con anterioridad las respuestas dadas en una primera medición, se requiere realizar pruebas en forma paralela.

Pruebas en forma paralela: para este tipo de comprobación se requiere de dos instrumentos de mediciones del cual uno de ellos debe estar calibrado y consiste en generar una tabla en la cual se hace el recuento de los valores esperados y los valores obtenidos, de manera que se obtendrá el coeficiente correlación entre los valores de la experimentación.

Este tipo de pruebas se aplica cuando la investigación está sujeta a errores de tipo sistemático, requiriendo que se calcule el error absoluto y relativo en las mediciones, lo cual permitirán estimar la precisión de las mediciones y esto a la vez se asocia con la confiabilidad.

Errores sistemáticos; Son errores que se encontraran en un mismo sitio o punto de adquisición muestral y se repetirán constantemente en el transcurso de la investigación.

Pueden ser causados por errores de calibración de los aparatos de medida o por el uso de fórmulas o modelos aproximados.

Error absoluto; Es el valor absoluto entre la diferencia del valor medido y el valor real, contiene las unidades de la magnitud medida, Ecuación 11:

$$\Delta x = V_{\text{medido}} - V_{\text{real}} \quad (11)$$

Error relativo; Es la relación entre el error absoluto Δx y el valor real X , por ser un cociente no posee unidades siendo este adimensional, Ecuación 12 (Douglas Figueroa, 2005).

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{X} \quad (12)$$

2.2 Hipótesis

El sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas permitirá evaluar interruptores seccionadores de medio voltaje.

2.3 Variables de la investigación

Variable independiente.

- Sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas.

Variable dependiente.

- Evaluación de interruptores seccionadores de medio voltaje.

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Antes de realizar la interfaz gráfica es necesario realizar ensayos en la programación para el procesamiento de imágenes. Esto es porque para la inicialización de este tipo de aplicaciones solo se requiere llamar a las funciones de cabecera de cada librería requerida, en este caso la librería es la de OpenCV. Se requerirá solo de la información de entrada y el resultado de la ejecución se presenta mediante una ventana tipo terminal propio de una aplicación tipo consola.

Debido a que este tipo de aplicaciones no son muy amigables con el usuario, no requieren de las líneas de programación para dar los efectos necesarios de usabilidad de la aplicación. Sin embargo se podría considerar que esto es un beneficio cuando se requiera determinar errores en la sintaxis de la programación, esto en casos para los cuales se requiera realizar tareas básicas o avanzadas.

3.1 Importación de librerías y creación de un proyecto tipo consola

En la pestaña Archivo>>Nuevo, Figura 9 se escogerá Proyecto, la programación se realizará en el lenguaje de programación de C++, ya que la ejecución de la aplicación tipo consola se ejecuta con este lenguaje.

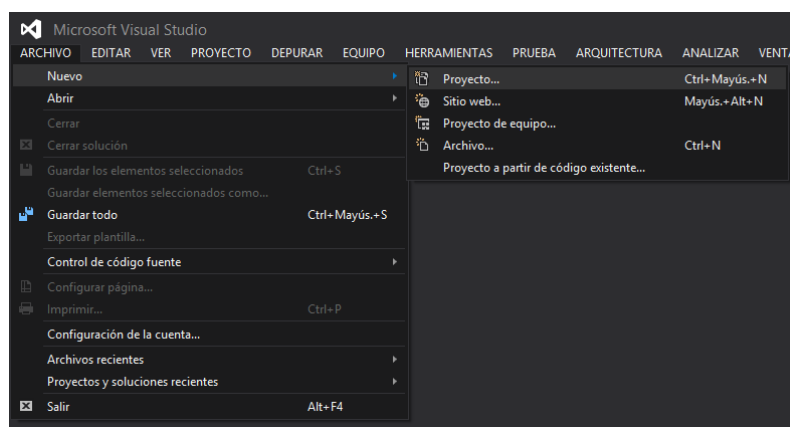


Figura 9: Creación de nuevo proyecto en Microsoft Visual Studio 2013.

La asignación del nombre de proyecto será VRAI lo cual significa Valoración de la Región del Área de Interés Figura 10.

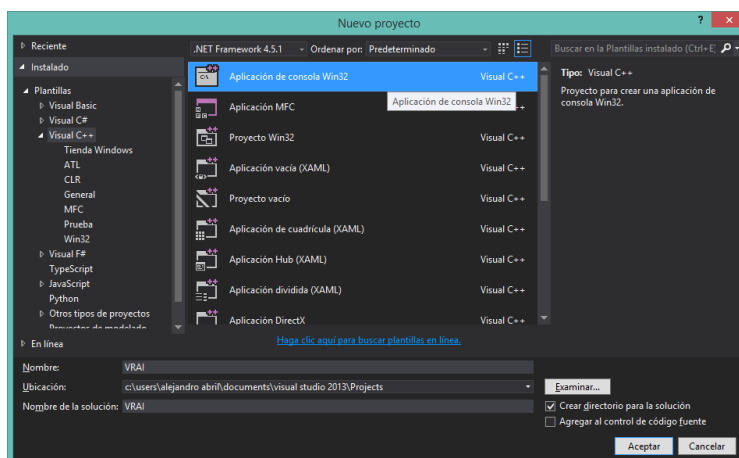


Figura 10: Selección del tipo de aplicación en Microsoft Visual Studio 2013

Seguido al “ACEPTAR” se guardará el proyecto en la carpeta de Documentos de Microsoft Visual Studio. Aparecerá el asistente para aplicaciones de Win32, estas aplicaciones se pueden operar en los sistemas operativos de 32 y 64 bits de Windows. El asistente inicialmente le indicará las características del proyecto generado y para finalizar Figura 11 se requiere seleccionar el tipo de aplicación como consola y en opciones adicionales como proyecto vacío ya que se añadirá las librerías en función de los requerimientos de la aplicación.

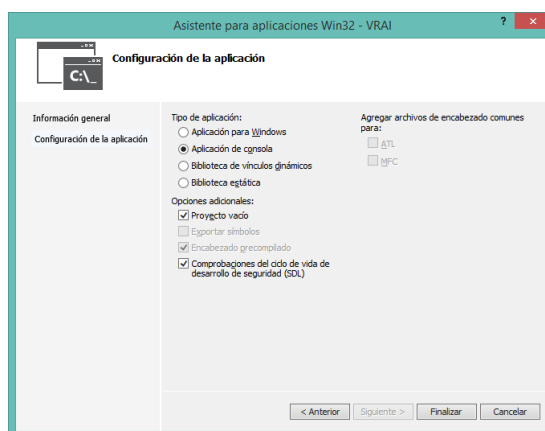


Figura 11: Asistente para aplicaciones Win32, Microsoft Visual Studio 2013.

Creación del archivo fuente

Cuando se crea un proyecto, es necesario añadir un archivo tipo fuente. En este archivo se escribirá la programación necesaria de la aplicación de consola. En el entorno de programación de Microsoft Visual Studio será necesario abrir la pestaña VER>>Explorador de soluciones Figura 12 en esta ventana se seleccionará la carpeta Archivos de código fuente y con click derecho se abrirá las opciones que se puede atribuir a esta carpeta, se seleccionará nuevo elemento.

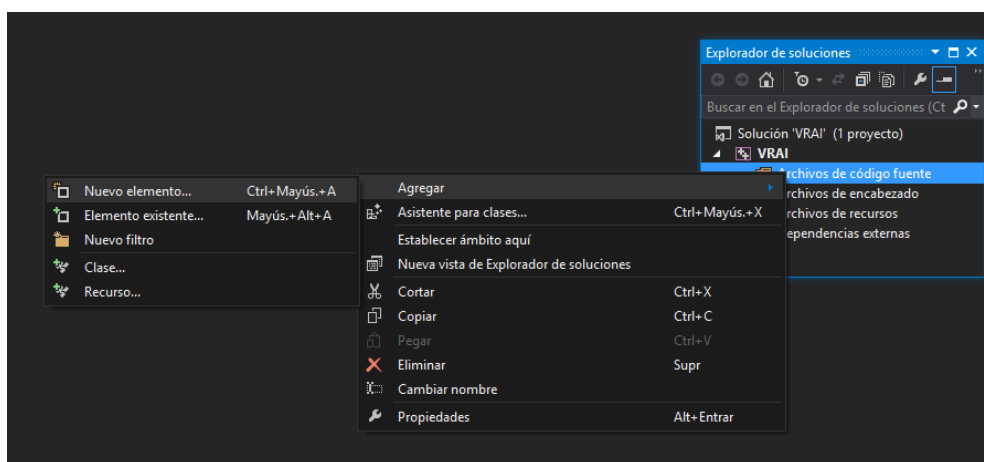


Figura 12: Explorador de soluciones, Microsoft Visual Studio 2013

Al agregar nuevo elemento en la carpeta, se crea un archivo en donde se escribirá el código de compilación de la aplicación consola.

Se seleccionará Archivo C++(.cpp) Figura 13 este archivo es acorde al lenguaje de programación de la aplicación creada, al “ACEPTAR” el archivo con extensión .cpp se guardará automáticamente en la carpeta de proyecto creada anteriormente con el nombre de archivo “Source” y en el entorno de programación se generará una ventana que permite la edición de Source.cpp.

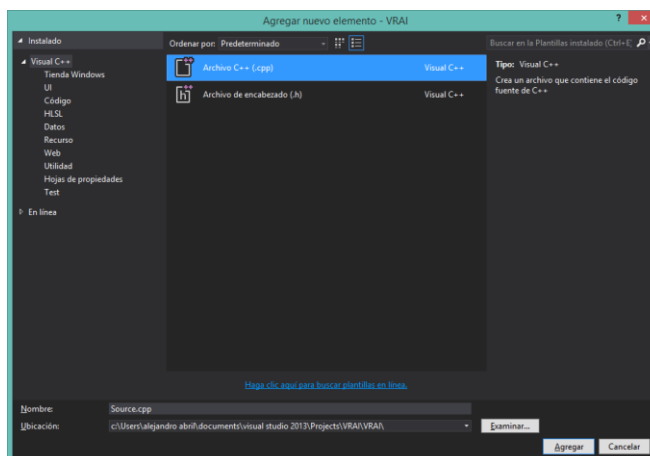


Figura 13: Agregando nuevo elemento, Microsoft Visual Studio 2013

Importación de la librería de OpenCV.

Para adherir este paquete a la biblioteca de proyecto se lo puede realizar de forma manual, descargando la librería desde la página oficial OpenCV, sin embargo al realizarlo de esta manera se corre el riesgo de no realizar correctamente la instalación debido a que se requiere de una gran cantidad de pasos y los errores de instalación solo se evidencian en el momento de ejecutar una tarea mediante el reporte de errores. Por este motivo se realiza la descarga mediante el Administrador de paquetes NuGet disponible para Microsoft Visual Studio 2013, en esta última forma se requiere de conexión a internet para que Microsoft Visual Studio pueda buscarlo en línea y descargarlo.

Procedimiento para la instalación de la librería de OpenCV

En la pestaña HERRAMIENTAS>>Administrador de paquetes de biblioteca, seleccionamos Administrador de paquetes NuGet para la solución Figura 14. El administrador de paquetes NuGet, proporciona la información de los paquetes instalados, así como la posibilidad de actualización si existiese en línea. En este caso vamos a descargar el paquete con las librerías de OpenCV, es necesario seleccionar la opción “En línea” y en el buscador ingresamos OpenCV, seguido de dar click izquierdo en Instalar.

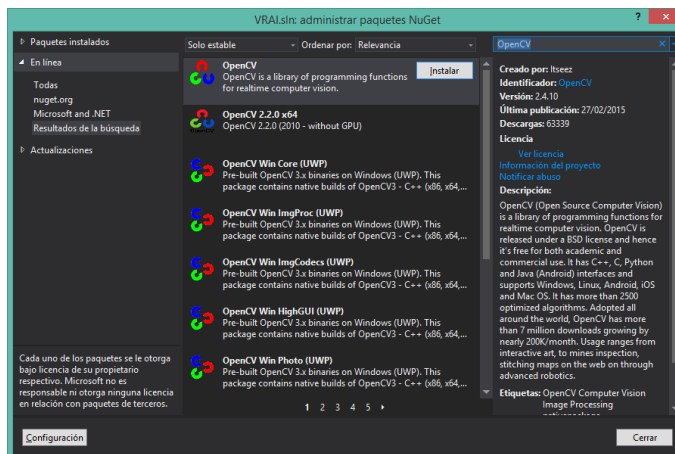


Figura 14: Administrador de paquetes NuGet

Una vez descargada la librería, se seleccionará los proyectos en los cuales se instalará la librería Figura 15. Y finalmente en la ventana para la administración de paquetes tendremos la señalización de instalación correcta como se observa en la Figura 16.

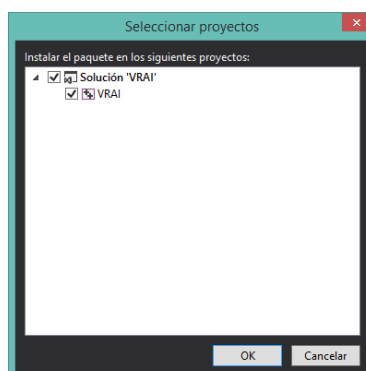


Figura 15: Selección de proyectos en los que se va instalar la librería de OpenCV

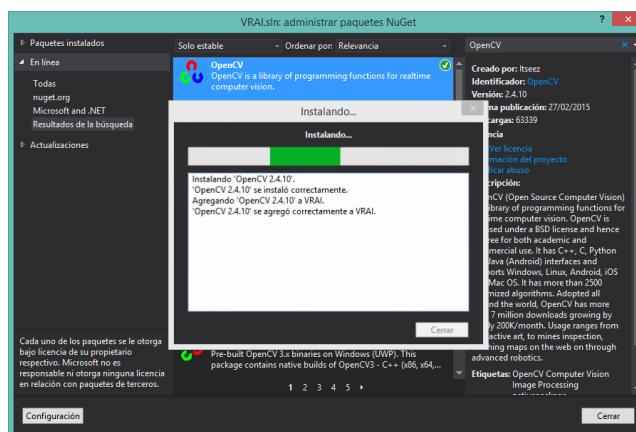


Figura 16: Indicación de instalación correcta de librerías

Estimación de la temperatura promedio en el área de estudio seleccionada

El usuario seleccionará las regiones de interés de la imagen termográfica, el análisis inicial de la imagen es el cualitativo, ya que este prestará atención a las secciones que sobresalgan apoyándose mediante la variación del contraste indicada mediante la paleta de colores denominada metales calientes, se puede determinar cuáles son las partes que más irradian y que suponen un desperfecto en el sistema trifásico, sin embargo se debe tomar en cuenta que la radiación permite una estimación de la temperatura, por este motivo lo que en realidad se registra es la temperatura aparente del objeto enfocado.

3.2 Desarrollo del algoritmo para establecer la región de interés

Para ello se hará uso del mouse, requiriendo analizar la actividad de uno de los botones para fijar el punto inicial desde donde comienza la selección de la región de estudio ROI. Para esta actividad inicial es necesario invocar la función "mouse_callback" esta función permite la interacción del usuario con la imagen, siendo necesario inicializar variables que permitan desarrollar las actividades requeridas para el proceso. Las variables con las que trabaja la función son del tipo entero y se consideran las siguientes; "event" constata si existe una variación booleana entorno a la actividad del mouse, las actividades que registra se centra en identificar cuando se ha hecho clic sobre alguna parte de la imagen y es identificado mediante la variable local "EVENT_LBUTTONDOWN", normalmente la selección de objetos en el uso de diferentes tipos de software se realiza con el botón izquierdo. El diagrama de flujo está dividido en tres partes que se muestran las Figuras 17,18 y 19.

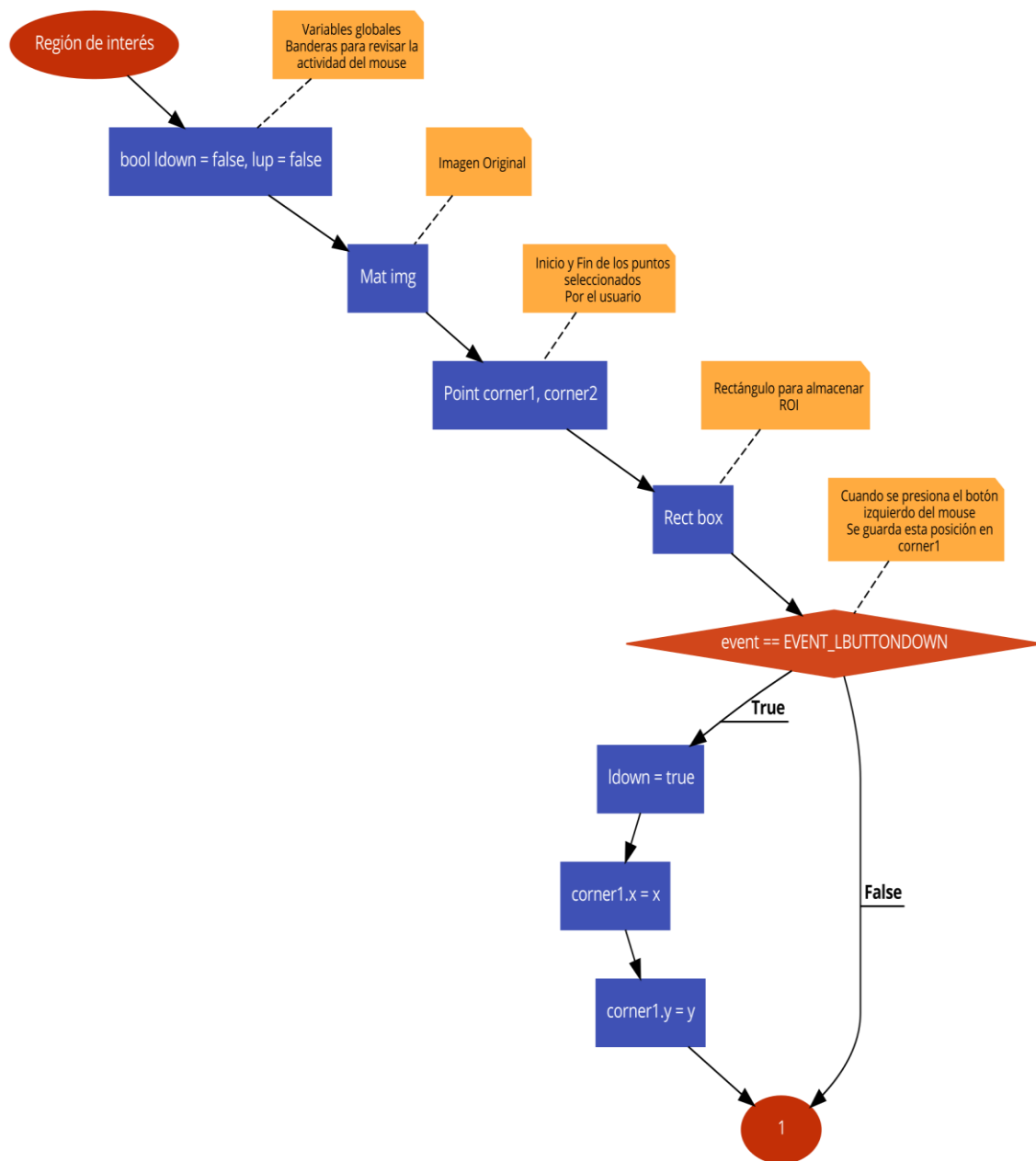


Figura 17: Algoritmo Región de Interés parte 1

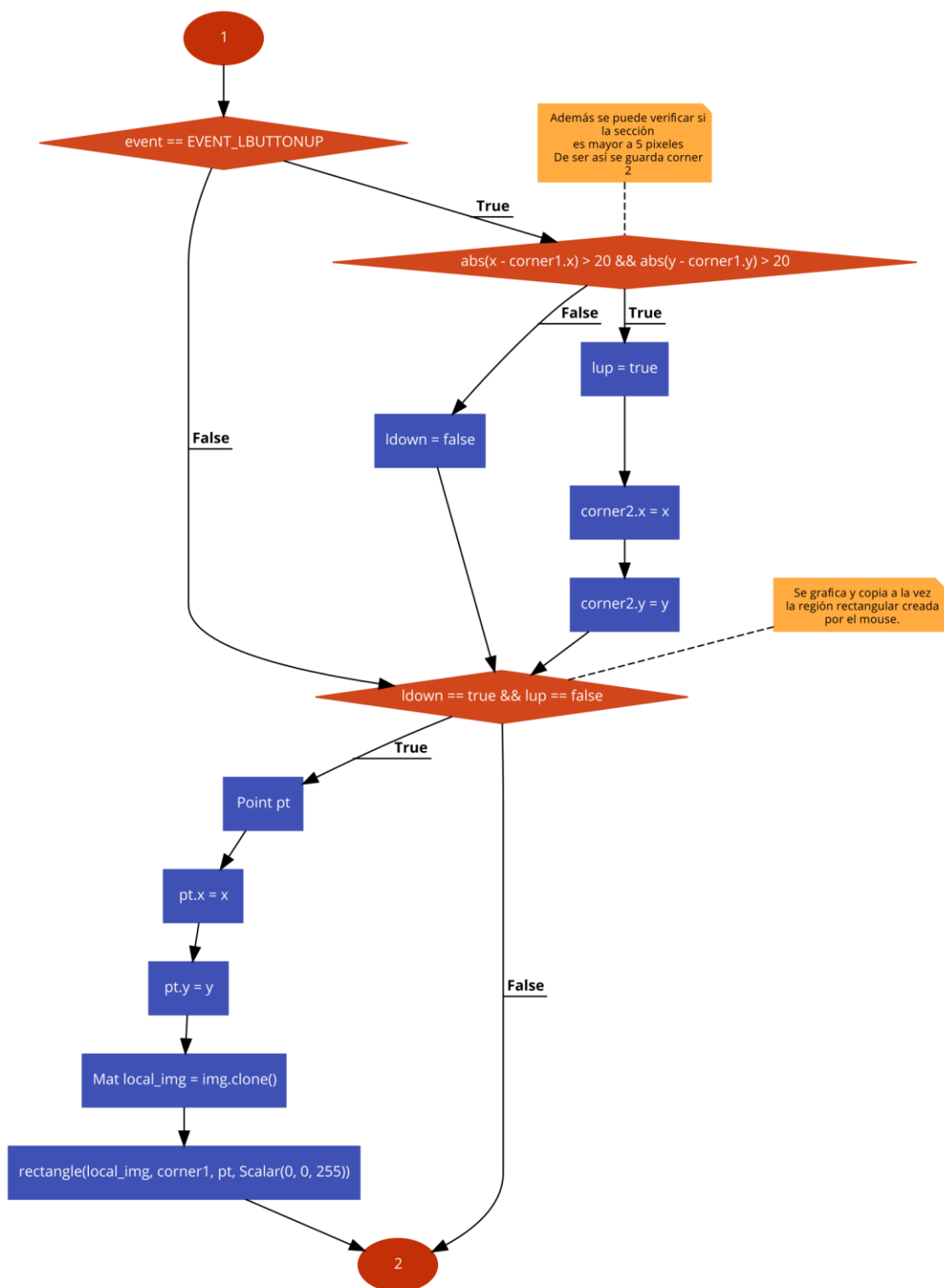


Figura 18: Algoritmo Región de Interés parte 2

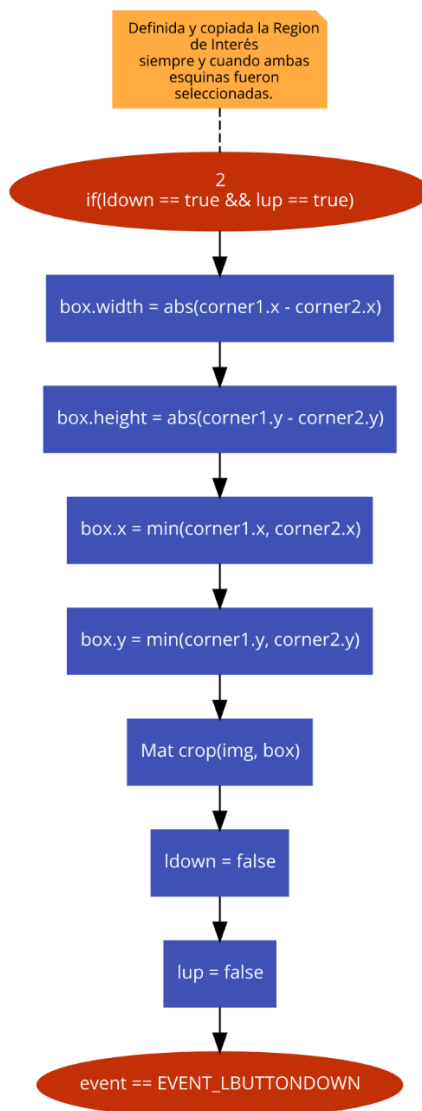


Figura 19: Algoritmo Región de Interés parte 3

3.3 Parámetros evaluativos en los interruptores seccionadores de medio voltaje.

3.3.1 Determinación de la temperatura de referencia.

Las muestras se obtuvieron mediante el siguiente proceso, en el Software SmartView se procedía a seleccionar las regiones de interés, siendo estas la superior (A1) e inferior (A2) de cada seccionador como se muestra en la Figura 20.

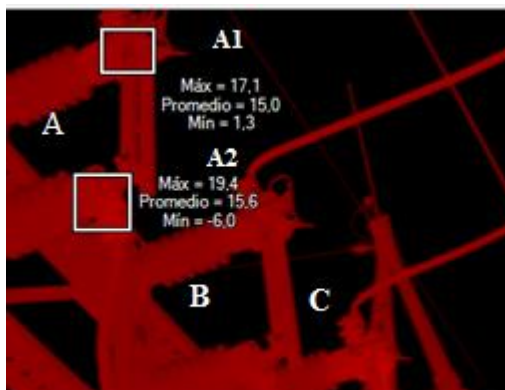


Figura 20: Temperatura en los bornes de conexión por cada seccionador

De las 12 imágenes obtenidas se consiguió un total de 68 bornes de conexión mostrados en la Tabla 7. Las celdas con la descripción ND indican que no está disponible.

Tabla 7

Temperatura en los bornes de conexión de cada seccionador.

		Punto A.	Temperatura SmartView [°C]
	IR6	A1	12,8
		A2	12,9
		B1	13
		B2	11,9
		C1	12,3
		C2	13,2
S1	IR7	A1	14,1
		A2	13,9
		B1	19,9
		B2	16,6
		C1	12,2
		C2	13,1
	IR8	A1	14,6
		A2	13,9
		B1	13,3
		B2	13,4
		C1	12,9
		C2	14,3

Continua 

		A1	14	
S1	IR9	A2	14,3	
		B1	12,8	
		B2	13,3	
		C1	13,6	
		C2	13,5	
	IR10	A1	13,9	
		A2	13,5	
		B1	12,4	
		B2	14,4	
		C1	13,9	
		C2	13,6	
S2	IR11	A1	12,1	
		A2	ND	
		B1	11,2	
		B2	13,7	
		C1	20,7	
			C2	13,5
	IR12	A1	12,8	
		A2	16,4	
		B1	12,1	
		B2	12,3	
C1		12,4		
		C2	13	
IR13	A1	10,9		
	A2	12,5		
	B1	10,3		
	B2	11,9		
	C1	12,8		
		C2	ND	
IR14	A1	13,7		
	A2	15,5		
	B1	14,1		
	B2	16,7		
	C1	14,1		
		C2	14,3	
IR15	A1	13,5		
	A2	13,6		
	B1	17,2		
	B2	13,7		
	C1	13,6		
		C2	13,3	

Continua 

	A1	13,4
	A2	13,9
IR16	B1	12,3
	B2	12,9
S2	C1	12,1
	C2	ND
IR17	A1	15
	A2	15,6
	B1	14,2
	B2	13,9
	C1	17
	C2	ND

De los datos presentados se obtiene la moda, mediana y promedio; $\hat{a}=13,9$ [°C], $\tilde{a}=13,5$ [°C], $\bar{a}=13,73$ [°C], respectivamente.

Los valores calculados indican que el grupo de datos tiene una distribución simétrica ya que las tres medidas de tendencia central son similares.

Los sistemas de los cuales se obtuvo las imágenes se encontraban operando normalmente, motivo por el cual la mayoría de las borneras de conexión poseían una temperatura normal.

Considerando los valores obtenidos, en este caso la moda $\hat{a}=13,9$ [°C] y una tolerancia del 10%, ecuación 13 que no es inherente al sistema, se puede establecer la temperatura de referencia para el sistema mediante la siguiente formulación:

$$T_{ref} = \hat{a} + 10\% \quad (13)$$

$$T_{ref} = 14,4 \text{ [°C]}$$

3.3.2 Determinación de funciones polinómicas para el sistema.

Para la obtención del modelo matemático que establezca numéricamente la relación Pixel /°Centigrado es necesario extraer la información del pixelamiento de la imagen que entrega la cámara termográfica.

3.3.2.1 Extracción del pixelamiento en la imagen termográfica.

Las imágenes termográfica ha ser procesadas poseen el formato .JPEG (480x640x3 uint8), al requerir establecer una relación de proporcionalidad entre el pixelamiento y la temperatura, se las transforma a escala de grises haciendo uso del software MATLAB y su editor.

De estas, las funciones principales son las de lectura de la imagen mediante “imread” y la de conversión a escala de grises “rgb2gray”. De esto se obtiene un arreglo matricial de 480x640 pixeles y cada uno de estos pixeles con una variación de 0 a 255 siendo 0 la coloración que se asemeja al color negro y 255 al blanco Figura 21 a) y b) respectivamente.

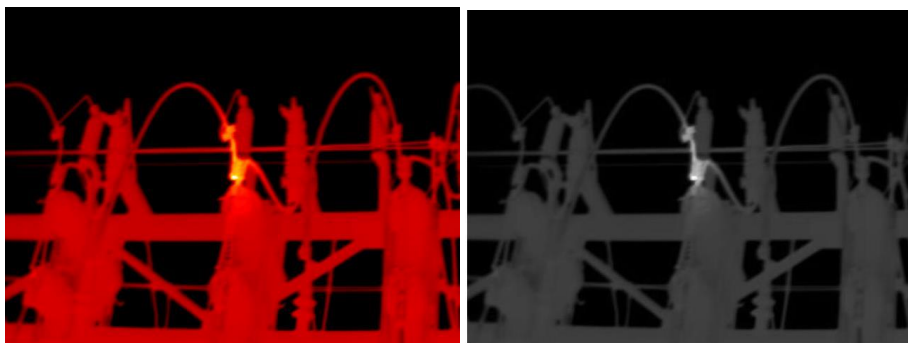


Figura 21: a) Imagen adquirida mediante imread b) Imagen procesada con rgb2gray

El modelo de regresión a obtener se basará en los datos más relevantes de la imagen termográfica, de ellos se enfoca el vector columna que posea la mayor variación en términos de temperatura del seccionador que presente una falla por sobre calentamiento, haciendo una análisis comparativo cualitativo de imagen en formato RGB Figura 22 con otro seccionador de la misma imagen.

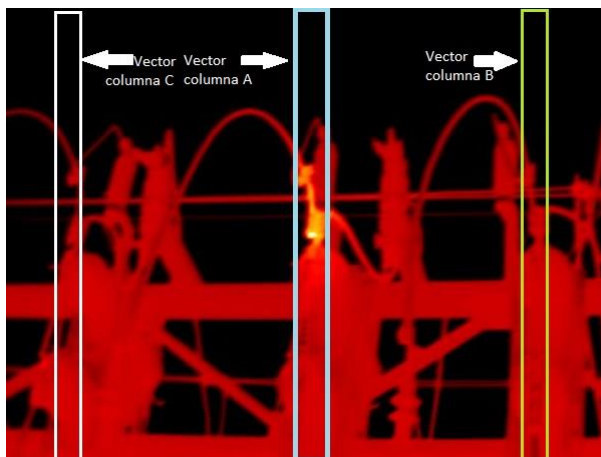


Figura 22: Análisis comparativo cualitativo de los seccionadores

El análisis cualitativo consiste en identificar las diferencias visuales entre cada seccionador de ellos se elegirá aquel que posea el punto más caliente de los tres dispositivos revisados.

Debido a que las imágenes se encuentran con la paleta de colores falsos usada para metales calientes la mayor temperatura se distingue con un color amarillento y si a esto se lo traduce a escala de grises estará asociada al color blanco con una valoración de pixel cercana a 255.

El vector columna A de la Figura 22 es el que posee la mayor variación de información en cuanto a los valores de pixelamiento, sin embargo se requiere saber la temperatura que le corresponde a cada pixel la cual tiene que ser correspondiente con la posición elemento de la matriz que se obtiene del conjunto de datos que se puede exportar del software SMART VIEW. En el software SMART VIEW se establece el área de estudio a exportar Figura 23. De manera que la adquisición de los datos sea la más efectiva. Se selecciona toda el área que corresponde a la imagen en si ya que de esta se podrá obtener un arreglo matricial que tendrá una dimensión de 240x320 elementos la cual al ordenarlos coinciden en posición y proporcionalidad con los elementos de la imagen termográfica convertida a escala de grises.

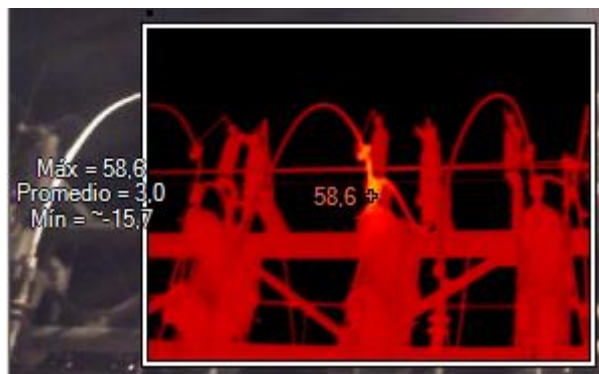


Figura 23: Smart View selección del área para exportar datos.

El archivo .txt exportado Figura 24 posee la información correspondiente a temperatura por cada posición de la matriz, de aquí será necesario encontrar el punto más caliente que se visualizó en la Figura 22 identificada mediante los marcadores la cual es de 58.6°C. De manera que al ubicar la posición de esta temperatura en la matriz se identificará la columna a la cual pertenece.

El proceso mencionado para obtener el vector columna facilitará la creación de variables en el espacio Workspace de MATLAB, esto para hacer uso de la función de “polifyt” en el editor.

Figura 24: Archivo exportado del software Smart View

3.3.2.2 Obtención del modelo del sistema.

El sistema basa su funcionamiento en una relación matemática que realiza la conversión de Pixeles a °C mediante el uso de una función. La función a ser usada habrá pasado dos pruebas la primera se evalúa encontrando el error medio cuadrático entre el vector columna de la función y el vector

columna de las temperaturas exportadas ya que estos son los que contienen la información más relevante de la imagen en contexto general.

Para encontrar el modelo se trabajó con un total de 12 imágenes termográficas de las cuales 5 poseen afectaciones en los seccionadores, razón por la cual se formó dos vectores columnas de 1200x1 ya que cada vector es de 240 x1 y serán insertadas en el espacio de variables de MATLAB Figura 25, el vector columna g_i el cual contiene los valores de pixelamiento de la imagen termográfica y el vector columna g_s , este contiene los valores correspondientes a la temperatura del fichero de temperatura importado.

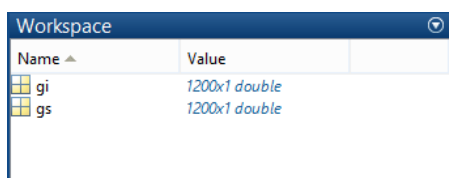


Figura 25: vectores columna

Es necesario realizar la gráfica de la nube de dispersión conformado por los puntos de coordenadas (Pixel, °C) Figura 26 esto permitirá crear una idea del polinomio que se ajuste a la tendencia que tendrá la proporcionalidad Pixel/°C.

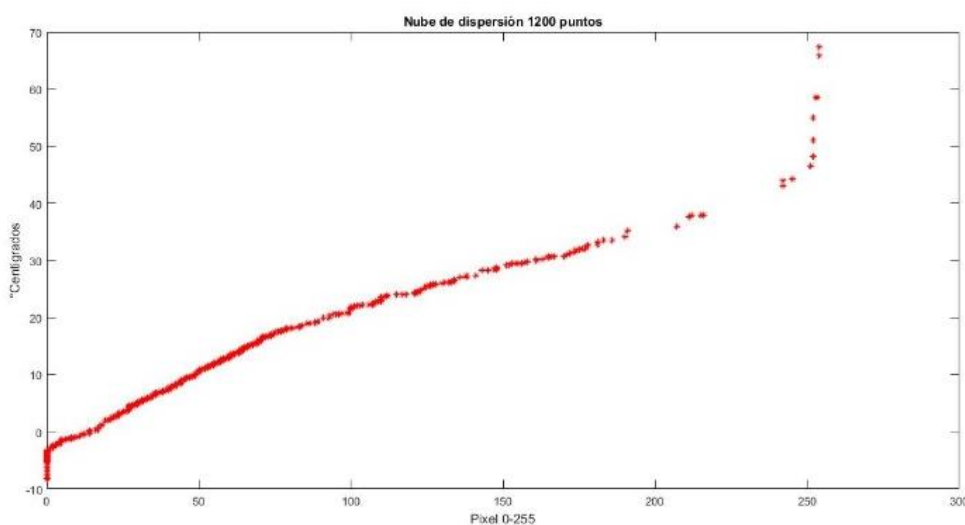
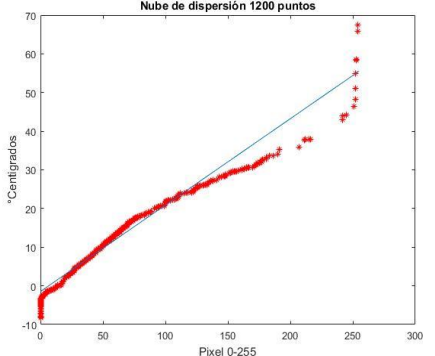
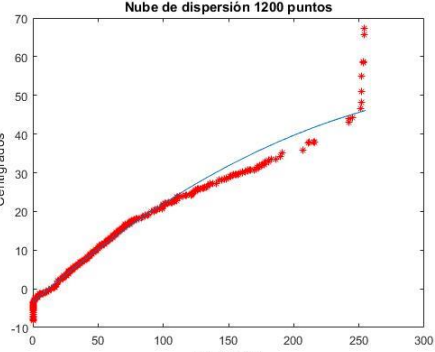
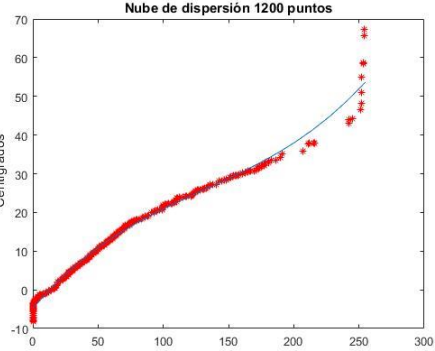


Figura 26: Nube de dispersión 1200 puntos

A primera vista el polinomio que se ajustaría sería el de primer grado o una línea recta, evaluando el polinomio mediante el comando “polyval” se obtiene los siguientes resultados Tabla 8.

Tabla 8

Análisis del error medio cuadrático de la respuesta de cada polinomio.

Función	EMC (Error medio cuadrático)	Respuesta de la regresión
$f(x_i) = 0.1161x_i + 7.2180$	2,0023	
$f(x_i) = -0.000227x_i^2 + 0.1333x_i + 7.1172$	1,4705	
$f(x) = 0.00000745x^3 - 0.00234x^2 + 0.2330x + 6.8718$	0,9371	

De los modelos mostrados el que mejor resultado presenta es el polinomio de tercer grado en comparación de los otros polinomios que se alejan de la

nube cuando se evalúa funciones que se acercan al valor de 255 del pixelamiento Figura 27.

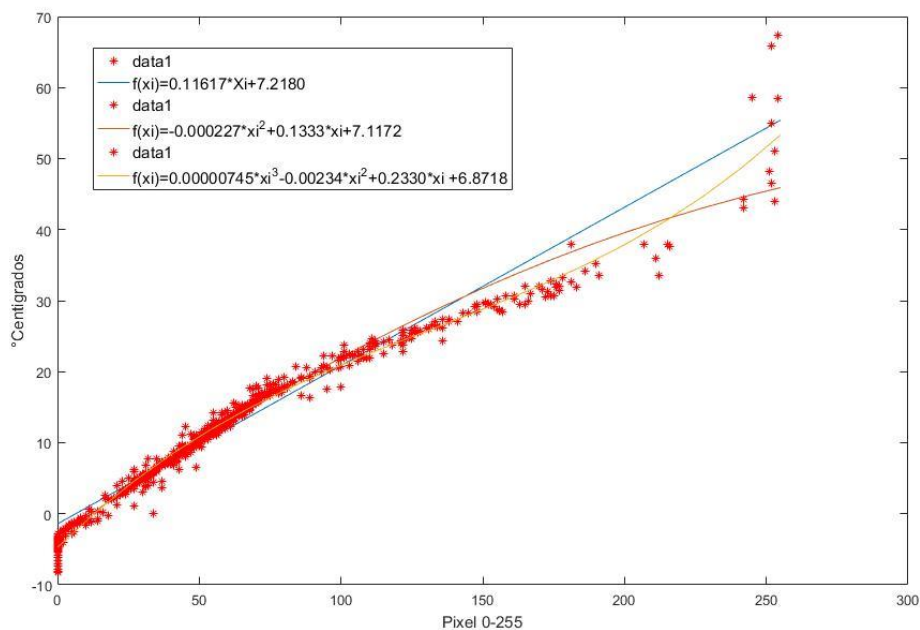


Figura 27: Ajuste de los tres polinomios a la nube de dispersión

3.3.2.3 Evaluación individual de cada uno de los polinomios.

De cada una de las 12 imágenes se obtuvo el vector columna con la mayor variación de pixelamiento lo cual permitirá evaluar el error de cada polinomio por imagen Tabla 9.

Tabla 9: Error medio cuadrático por cada polinomio e imagen

	Error Medio Cuadrático		
	$P(x)=ax+b$	$P(x)=ax^2+bx+c$	$P(x)=ax^3+bx^2+cx+d$
IR7	1,9995	2,3852	1,5674
IR8	0,8986	0,3912	0,4876
IR11	2,1031	1,2349	1,1672
IR12	2,1914	1,2858	0,9467

Continua 

IR15	2,8256	1,9009	1,2435
IR6	4,4352	4,3278	3,8323
IR9	2,2186	0,9962	1,5176
IR10	1,4474	0,8466	0,9961
IR13	3,9484	3,7628	3,3084
IR14	3,0398	2,1145	1,5403
IR16	5,0903	4,6504	4,0702
IR17	4,6978	3,888	3,3331
Promedio	2,9080	2,3154	2,0009

Del resultado de la Tabla 9 se identifica que el polinomio que mejor se ajusta a las diferentes imágenes es el de tercer grado.

Por este motivo la función polinómica a usar en el sistema de valoración, será la siguiente ecuación 14:

$$f(x)=0.00000745x^3-0.00234x^2+0.2330x +6.8718 \quad (14)$$

3.4 Desarrollo del Algoritmo para la Evaluación de los Seccionadores (AEIS).

El algoritmo AEIS Figura 28 y 29 se desarrolla en función de los parámetros establecidos en la tabla basada en la experiencia del mantenimiento de sistemas eléctricos y equipamiento mecánico (I.Infraspection, 2008).

Para ello se requerirá de la información que se obtendrá de la región de interés seleccionada por parte del usuario, para la posterior estimación en grados centígrados haciendo uso de la función polinómica indicada en el apartado anterior.

Se establecerá un valor de referencia con el nombre **deltat** el cual es un diferencial de temperatura obtenido de la diferencia de la temperatura promedio del área seleccionada menos la temperatura de referencia de los interruptores actuando bajo condiciones normales, 14,4[°C]

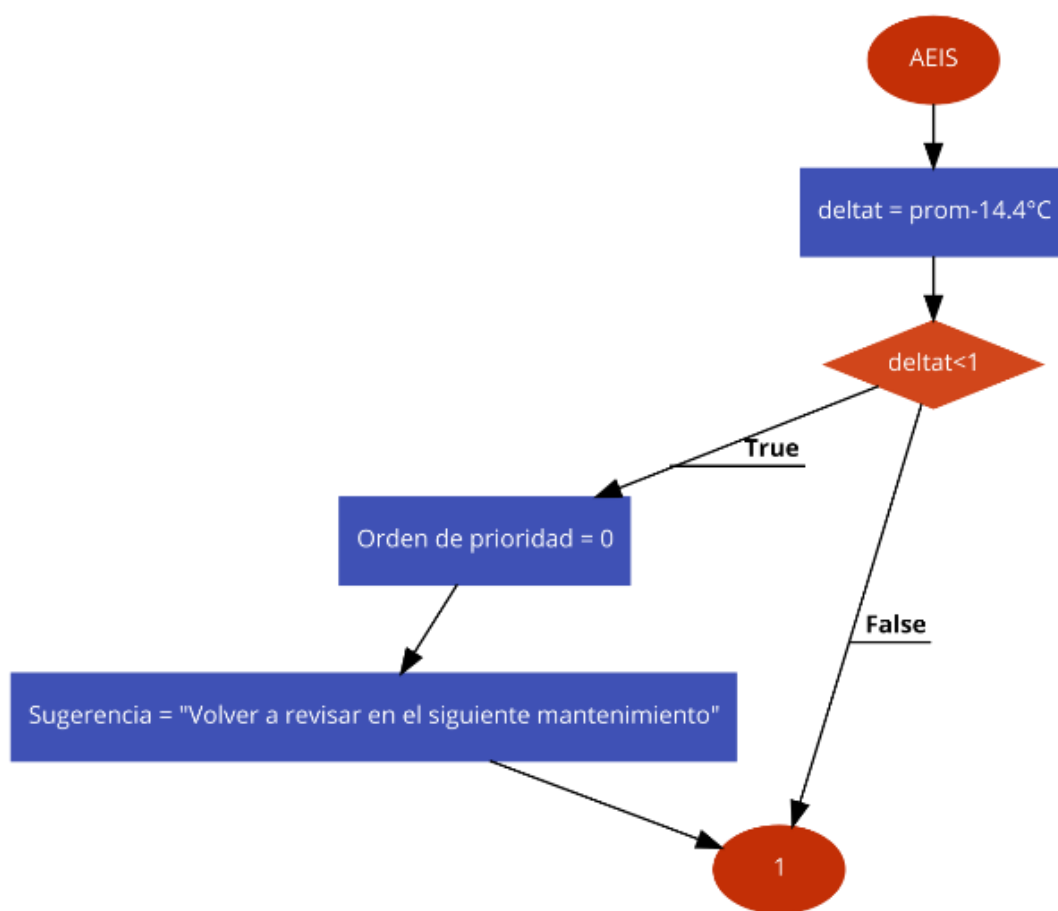


Figura 28: Algoritmo valoración interruptores parte 1

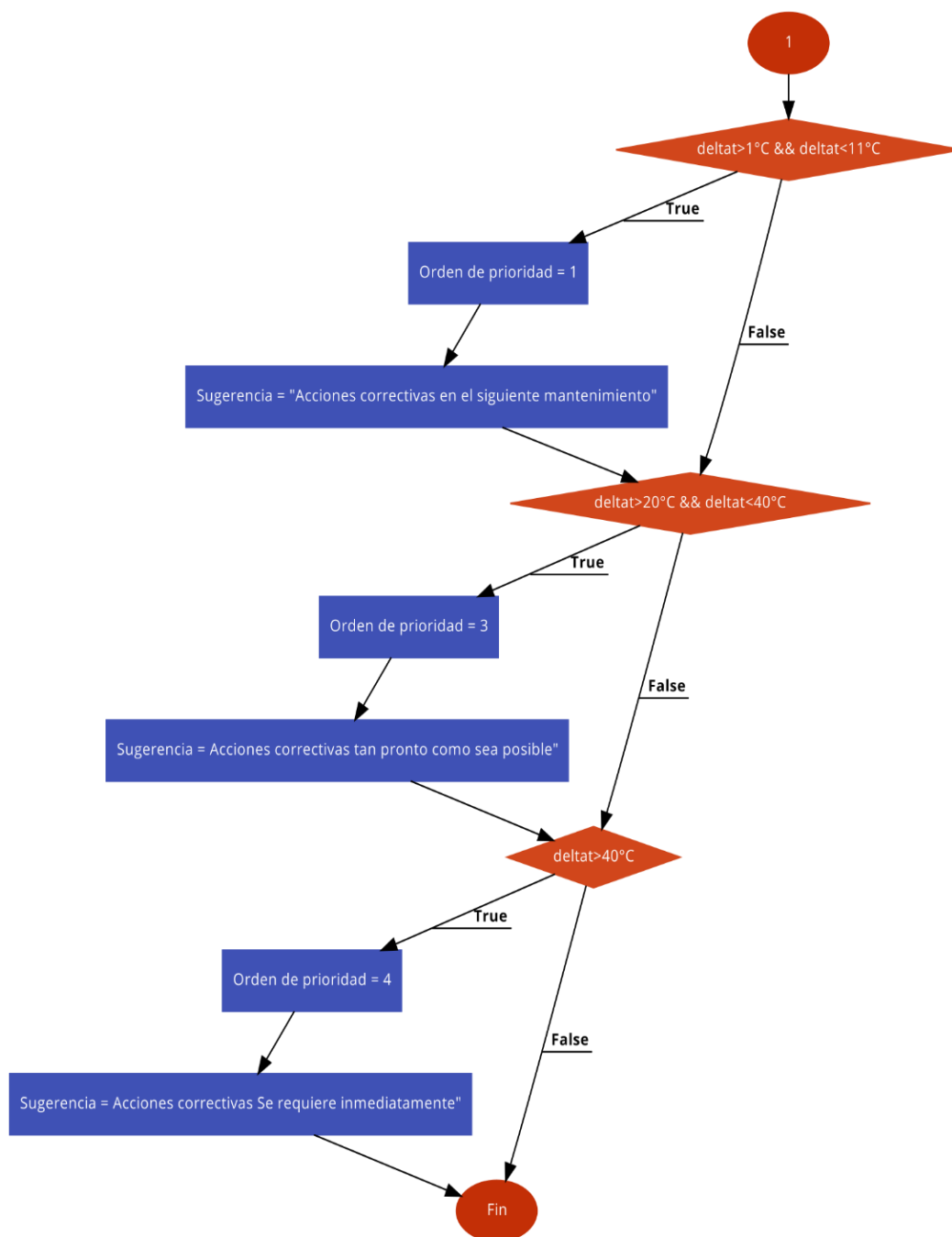


Figura 29: Algoritmo valoración interruptores parte 2

3.5 Librerías para realizar la interfaz gráfica

Windows Forms UI Applications

Windows Forms; es un componente de .Net Framework en la cual posee un conjunto de librerías de uso común para tareas de lectura y escritura en

archivos del sistema, así como al estar asociado al componente .Net Framework permite la ejecución de actividades de forma remota.

De esta manera Windows Forms presenta al desarrollo del sistema una variedad de controles para el uso en formas y respuesta a las acciones del usuario, necesarias para establecer las regiones de interés, así como la presentación de forma amigable de los resultados de la evaluación.

De esto se identificará lo siguiente:

Evento: Es cuando un usuario realiza una acción sobre un control, de manera seguida la aplicación recurrirá al código establecido para el mismo y procesará el evento cuando este ocurra, a esto se lo identificará como evento.

Controles: Windows Forms contiene una variedad de controles que se puede ubicar sobre una forma, entre estos se encuentran botones, cuadros de texto, botones circulares y otros para el desarrollo de páginas web. Sólo será necesario seleccionar uno de estos y ubicarlo sobre la forma, para que se le pueda asignar un evento.

3.6 Desarrollo de la interfaz gráfica

En el entorno de Microsoft Visual Studio se creará un nuevo proyecto en la pestaña Archivo>Nuevo Proyecto, al cual se lo asignará el nombre de Sistema de Valoración para Interruptores Seccionadores, SistemaVIS. esto sobre una plantilla vacía de C++, **Figura 30**.

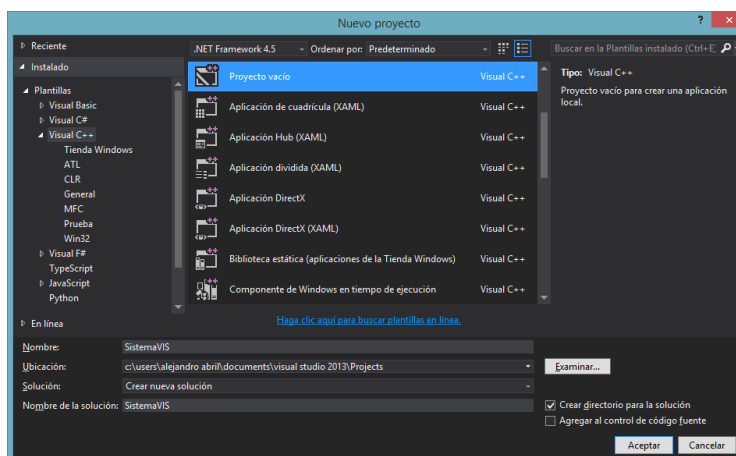


Figura 30: Creación de un nuevo proyecto, SistemaVIS.

En la ventana para explorador de soluciones se agregará un nuevo elemento, Figura 31 dando click derecho sobre el nombre del proyecto, en este caso SistemaVIS.

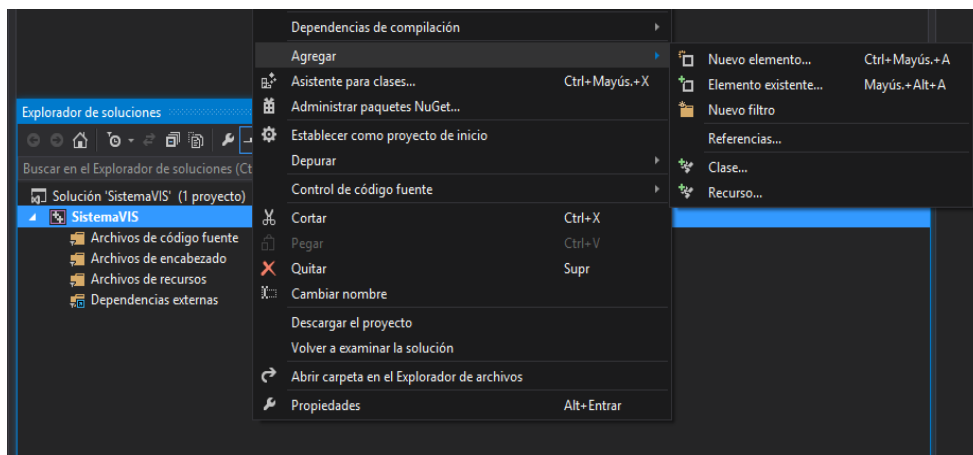


Figura 31: Adición elemento UI para el SistemaVIS

En este se escogerá de las opciones de Visual C++, la opción de UI para Windows Forms Figura 31, el nuevo elemento se mantendrá con el nombre de MyForm.h, finalmente se agrega el elemento.

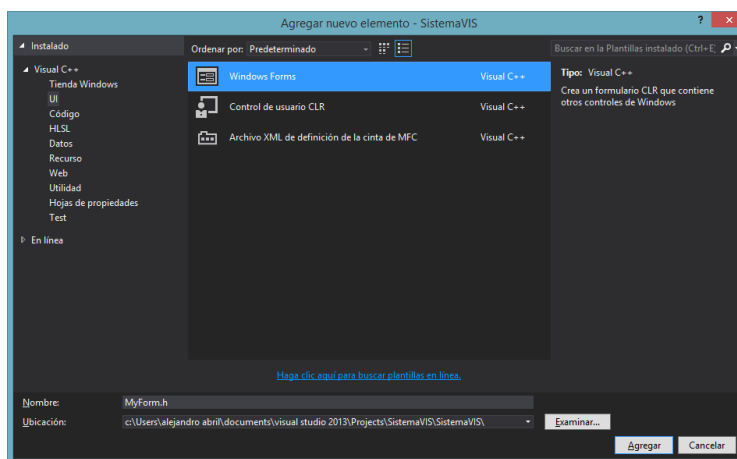


Figura 32: Agregar elemento UI al SistemaVIS

Se obtiene la forma o el llamado form, el cual es el espacio que se presentará al usuario, así como los controles y las propiedades de cada elemento en la sub ventana controles y propiedades respectivamente Figura 33.

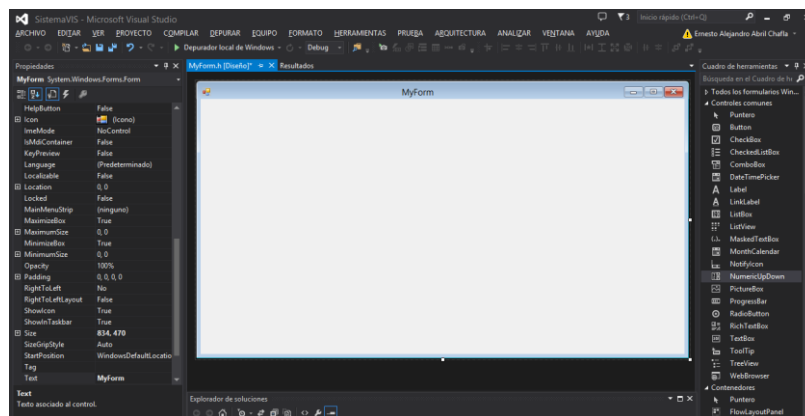


Figura 33: Inicialización de la forma para el SistemaVIS.

Para la correcta ejecución del programa se requerirá de las siguientes configuraciones:

- Es necesario que la interfaz sea compatible con CLR, para ello se buscará en Configuraciones del proyecto > General > Compatible con Common Language Runtime Figura 34.

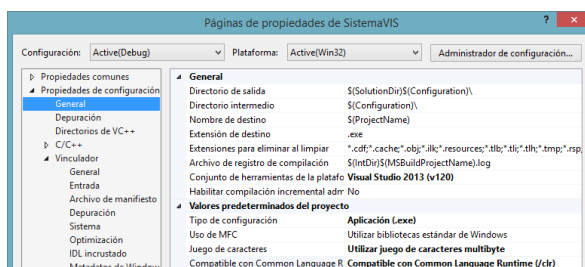


Figura 34: Configuración general SistemaVIS

- En la pestaña Sistema >> Subsistema, escoger Windows(/SUBSYSTEM:WINDOWS), Figura 34.

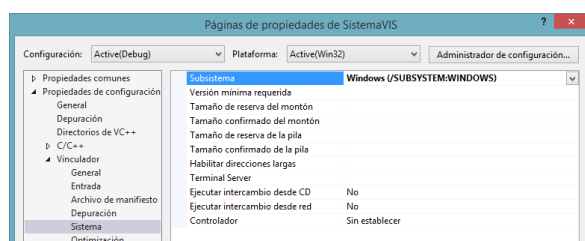


Figura 35: Configuración subsistema SistemaVIS

- En Vinculador>Avanzadas el punto de entrada es main Figura 35.

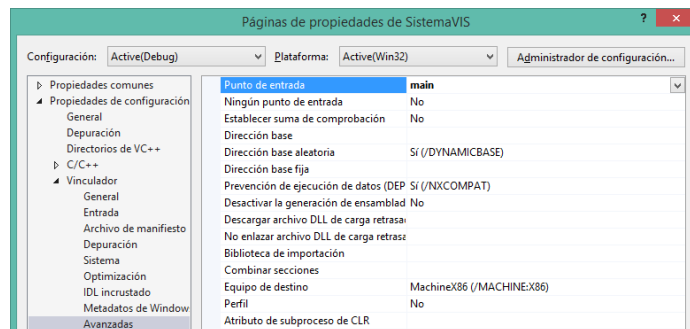


Figura 36: Configuración avanzada SistemaVIS.

El espacio en el cual se desarrollará la interfaz, será el form en el cual se añadirán los botones, cuadros de texto e imagen, como se muestra en la distribución de la Figura 37.

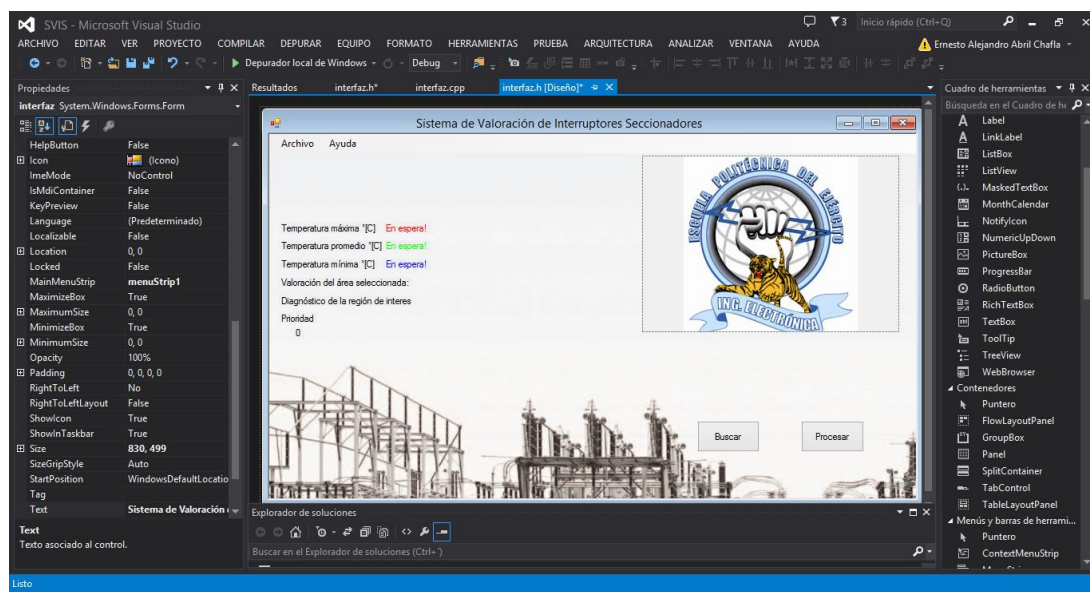


Figura 37: Distribución de botones, cuadros de texto e imágenes, SistemaVIS.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Pruebas del funcionamiento del sistema

Abrir el Sistema de Valoración para Interruptores Seccionadores de Medio Voltaje, se abrirá la siguiente ventana, Figura 38.



Figura 38: SVIS ventana principal

Presionar la pestaña Archivo>>Abrir o pulsar el botón Buscar, Figura 38.



Figura 39: SVIS abrir archivo

Escoger una imagen termográfica en formato .JPEG y presionar Abrir, Figura 40.

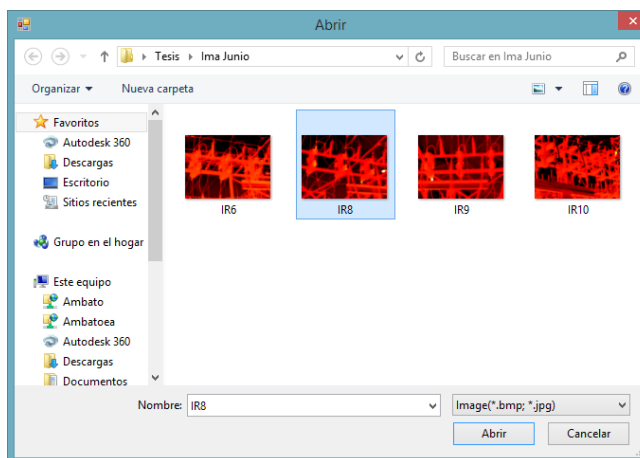


Figura 40: SVIS seleccionar ventana principal,

Inicialmente se cargará la imagen seleccionada en el panel derecho de la interface, Figura 41.



Figura 41: SVIS imagen a ser procesada

Pulsar el botón Procesar, seguido se visualizará las partes que posean una temperatura superior a 14 [°C] en color blanco en el panel izquierdo de la interface.

La imagen generada servirá como guía para analizar el estado de diferentes contactos con una temperatura superior a los 14 [°C], ya que esta

es la temperatura referencial por operatividad normal los contactos interruptores seccionadores, Figura 42.

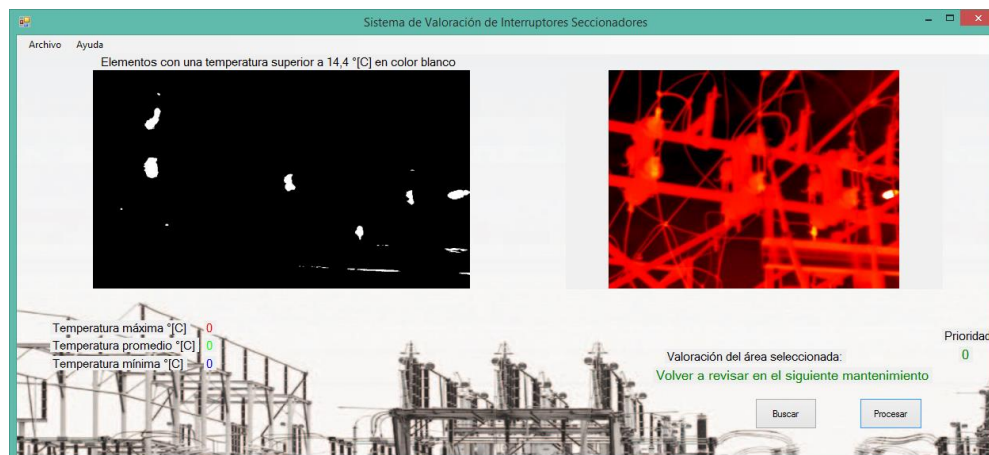


Figura 42: SVIS filtrado de los elementos con una temperatura superior a 14 [°C].

A la vez aparecerá una segunda ventana, Figura 43 con el nombre Sistema Experimental Evaluación Seccionadores. En esta ventana se podrá fijar marcadores por medio de la selección de la región de interés haciendo uso del mouse para el análisis de temperatura en las partes que sean necesarias.

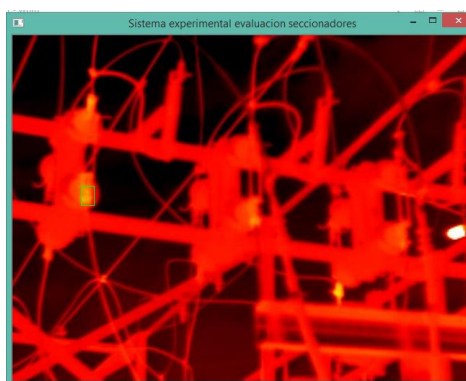


Figura 43: SVIS ventana para establecer marcadores.

Después de seleccionar la región de interés, aparecerá una tercera ventana con los siguientes indicadores: Tmax el cual indica la temperatura máxima, Tprom la temperatura promedio, Tmin la temperatura mínima. Todos estos correspondientes a la sección interna del rectángulo color verde, Figura 44.



Figura 44: SVIS ventana con los indicadores de temperatura de la región de interés.

Presionar nuevamente el Botón “Procesar”, para que el sistema determine el estado del área seleccionada y el nivel de prioridad, Figura 45.

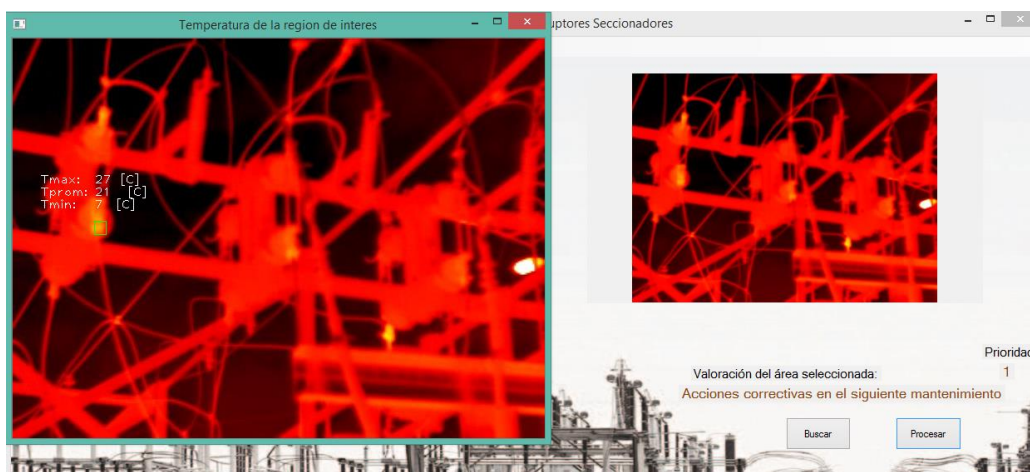


Figura 45: SVIS valoración del estado del área seleccionada.

En caso de haber terminado de analizar la imagen se puede seleccionar otra imagen, Figura 46 Pulsando el botón “Buscar” y seleccionando la imagen requerida, de manera que se repite el proceso antes mencionado.



Figura 46: SVIS selección de una imagen.

Las pruebas del sistema consisten en determinar la valoración de cada seccionador que se encuentre en la imagen termográfica, siguiendo el orden mostrado en la Figura 47. Siendo la ventana con el nombre “Temperatura de la región de interés” del Sistema de Valoración para Interruptores Seccionadores (SVIS) y la imagen de la derecha es la de la ventana de trabajo del Software SmartView.

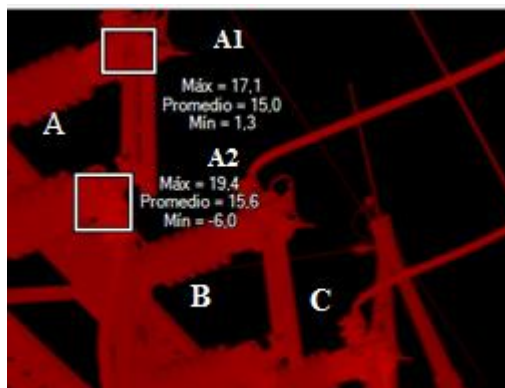


Figura 47: Orden para la adquisición de imágenes

Comenzando con la imagen termográfica IR6, de esta se escoge el seccionador A, con los bornes A1 y A2 Figura 48.

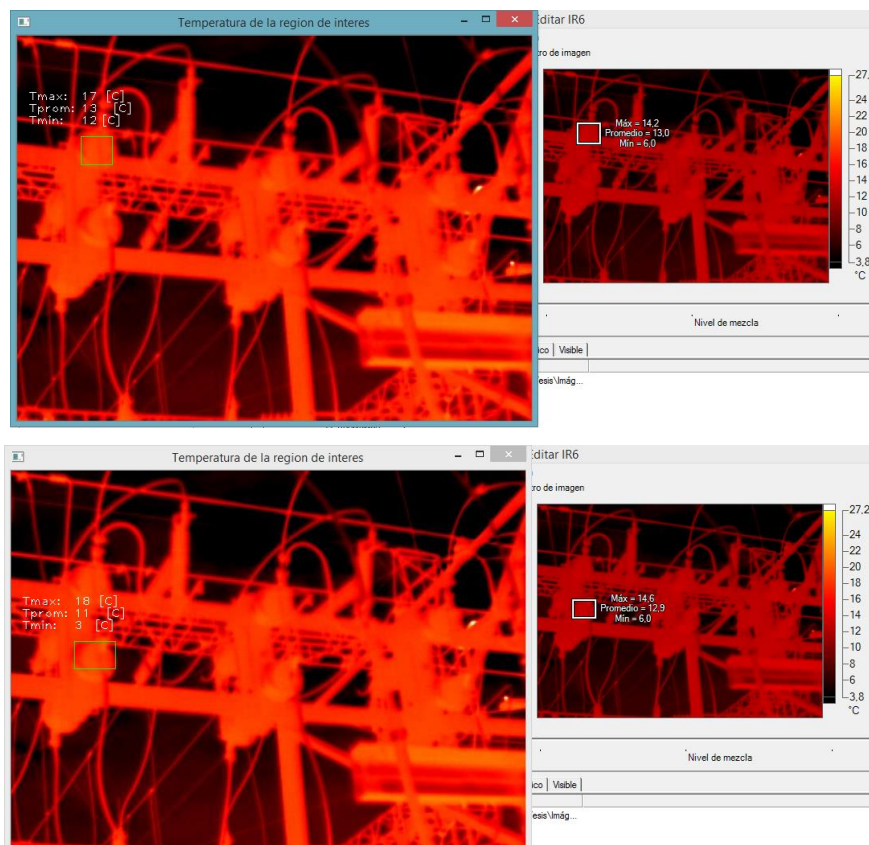


Figura 48: SVIS IR6 seccionador A, con las regiones A1 y A2

De esta manera el Sistema de Valoración entrega una prioridad 0 y sugiere volver a revisar en el siguiente mantenimiento las dos regiones. Figura 49



Figura 49: SVIS imagen IR6 seccionador A Valoración del área seleccionada

Luego se procederá con el seccionador B y lo bornes B1 y B2, Figura 50

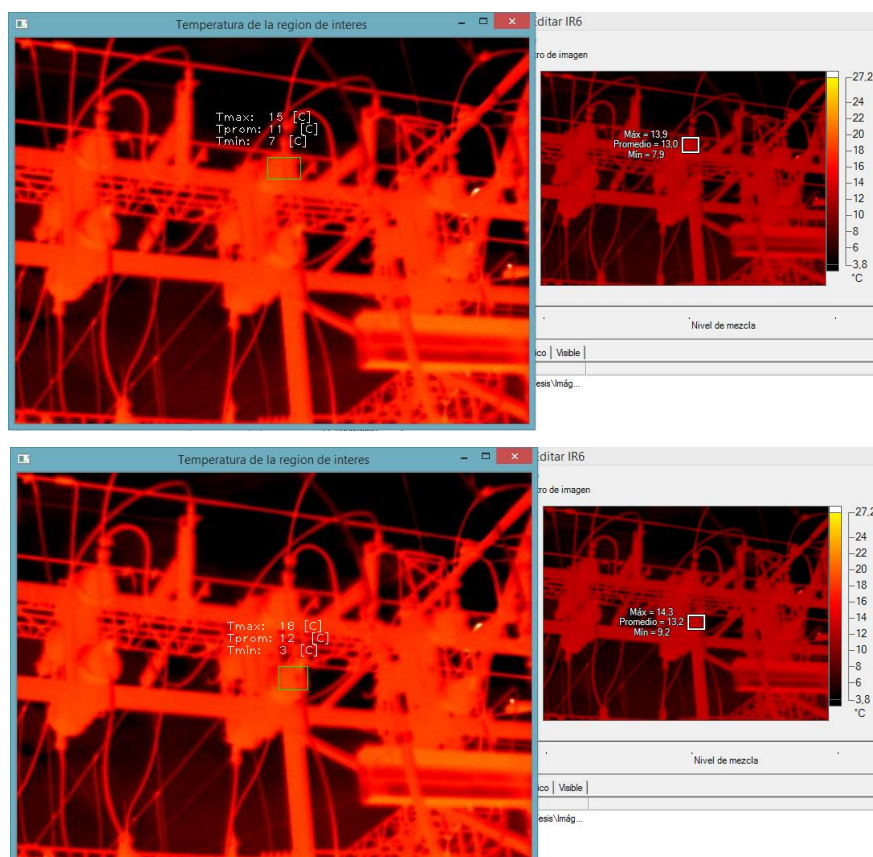


Figura 50: SVIS IR6 seccionador B, con las regiones B1 y B2.

Para el seccionador B de la imagen IR6 el SVIS en ambos casos entrega una prioridad 0 y sugiere volver a revisar en el siguiente mantenimiento las dos regiones. Figura 51.



Figura 51: SVIS imagen IR6 seccionador B Valoración del área seleccionada.

Finalmente se analiza el seccionador C, con las regiones C1 y C2, Figura 52

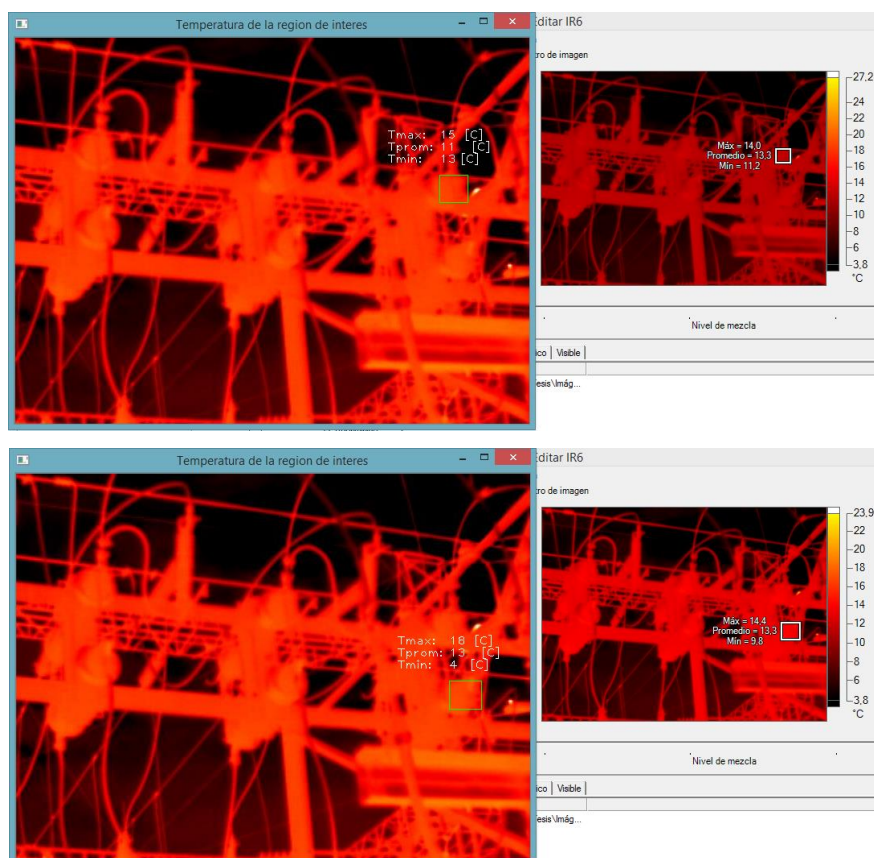


Figura 52: SVIS IR6 seccionador C, con las regiones C1 y C2.

Para el seccionador C de la imagen IR6 el SVIS en ambos casos entrega una prioridad 0 y sugiere volver a revisar en el siguiente mantenimiento las dos regiones. Figura 53.



Figura 53: SVIS imagen IR6 seccionador B Valoración del área seleccionada.

De esta manera se procede con 11 imágenes más, obteniendo la siguiente Tabla 10 y 11 de valoraciones.


Tabla 10

Coefficientes de correlación y determinación en las mediciones del Sistema de Valoración de los Interruptores Seccionadores por cada polinomio.

		Puntos A.	SmartView	$f(x_i)=0,2229x_i - 1,4249$	$f(x_i)=-0,0004x_i^2 + 0,2935x_i - 3,4673$	$f(x_i)=0,00004524x_i^3 - 0,001792x_i^2 + 0,3905x_i - 4,7317$			
S1			Valor Real [°C]	Valor M. [°C]	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	Valor M. [°C]	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	Valor M. [°C]	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
IR6	A1		12,8	9	14,44	10	7,84	11	3,24
	A2		12,9	9	15,21	10	8,41	11	3,61
	B1		13	9	16	9	16	11	4
	B2		11,9	9	8,41	9	8,41	11	0,81
	C1		12,3	10	5,29	10	5,29	11	1,69
	C2		13,2	9	17,64	10	10,24	11	4,84
IR7	A1		14,1	10	16,81	10	16,81	11	9,61
	A2		13,9	11	8,41	11	8,41	12	3,61
	B1		22,8	32	84,64	25	4,84	27	17,64
	B2		37,8	35	7,84	26	139,24	31	46,24
	C1		12,2	10	4,84	10	4,84	11	1,44
	C2		13,1	11	4,41	10	9,61	11	4,41
IR8	A1		14,6	12	6,76	13	2,56	13	2,56
	A2		15,4	15	0,16	17	2,56	14	1,96
	B1		13,3	10	10,89	10	10,89	11	5,29
	B2		13,4	13	0,16	14	0,36	13	0,16
	C1		12,9	10	8,41	10	8,41	11	3,61
	C2		14,3	12	5,29	12	5,29	13	1,69
IR9	A1		14	10	16	10	16	11	9
	A2		14,3	12	5,29	12	5,29	13	1,69
	B1		12,8	10	7,84	10	7,84	11	3,24
	B2		13,3	10	10,89	10	10,89	11	5,29
	C1		13,6	10	12,96	10	12,96	11	6,76
	C2		13,5	10	12,25	10	12,25	11	6,25

Continua 

S2	IR10	A1	13,9	12	3,61	12	3,61	13	0,81
		A2	13,5	11	6,25	13	0,25	13	0,25
		B1	12,4	11	1,96	12	0,16	12	0,16
		B2	14,4	12	5,76	12	5,76	13	1,96
		C1	13,9	11	8,41	12	3,61	13	0,81
		C2	13,6	12	2,56	12	2,56	13	0,36
	IR11	A1	12,1	10	4,41	10	4,41	11	1,21
		A2	ND						
		B1	11,2	10	1,44	10	1,44	11	0,04
		B2	13,7	10	13,69	10	13,69	13	0,49
		C1	13,7	12	2,89	14	0,09	11	7,29
		C2	13,5	10	12,25	14	0,25	11	6,25
	IR12	A1	14,1	10	16,81	11	9,61	12	4,41
		A2	18,1	25	47,61	21	8,41	17	1,21
		B1	12,1	10	4,41	10	4,41	11	1,21
		B2	12,3	10	5,29	10	5,29	12	0,09
		C1	12,4	11	1,96	11	1,96	12	0,16
		C2	13	10	9	11	4	12	1
	IR13	A1	10,9	9	3,61	9	3,61	10	0,81
		A2	12,5	9	12,25	9	12,25	11	2,25
		B1	10,3	10	0,09	10	0,09	12	2,89
B2		11,9	11	0,81	11	0,81	12	0,01	
C1		12,8	11	3,24	11	3,24	12	0,64	
C2		ND							
IR14	A1	13,7	11	7,29	12	2,89	12	2,89	
	A2	15,5	18	6,25	17	2,25	14	2,25	
	B1	14,1	11	9,61	11	9,61	13	1,21	
	B2	16,7	20	10,89	19	5,29	14	7,29	
	C1	14,1	13	1,21	13	1,21	13	1,21	
	C2	14,3	12	5,29	11	10,89	13	1,69	
IR15	A1	13,5	10	12,25	10	12,25	11	6,25	
	A2	13,6	10	12,96	10	12,96	11	6,76	
	B1	17,2	24	46,24	20	7,84	14	10,24	
	B2	13,7	10	13,69	10	13,69	11	7,29	
	C1	13,6	10	12,96	10	12,96	11	6,76	
	C2	13,3	10	10,89	10	10,89	11	5,29	
IR16	A1	13,4	14	0,36	14	0,36	14	0,36	
	A2	13,9	13	0,81	13	0,81	13	0,81	
	B1	12,3	12	0,09	11	1,69	12	0,09	
	B2	12,9	11	3,61	12	0,81	13	0,01	
	C1	12,1	11	1,21	12	0,01	12	0,01	
	C2	ND							


Continua 

S2	IR17	A1	15	15	0	14	1	14	1
		A2	15,6	15	0,36	15	0,36	15	0,36
		B1	14,2	13	1,44	13	1,44	13	1,44
		B2	13,9	14	0,01	13	0,81	14	0,01
		C1	17	17	0	17	0	16	1
		C2	ND						
					$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	626,57	$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	534,77	$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$
		S _e	4,5404	S _e	3,8751	S _e	1,7911		
		R	0,8683	R	0,8093	R	0,9188		
		R ²	0,7539	R ²	0,6550	R ²	0,8442		


Tabla 11

Errores relativos en las mediciones del Sistema de Valoración de los Interruptores Seccionadores por cada polinomio.

		Puntos A.	SmartView	$f(x_i)=0,2229x_i - 1,4249$	$f(x_i)=-0,0004x_i^2 + 0,2935x_i - 3,4673$	$f(x_i)=0,00004524x_i^3 - 0,001792x_i^2 + 0,3905x_i - 4,7317$			
		Valor real [°C]	Valor M. [°C]	$\epsilon_r = \frac{\Delta_x}{X}$	Valor M. [°C]	$\epsilon_r = \frac{\Delta_x}{X}$	Valor M. [°C]	$\epsilon_r = \frac{\Delta_x}{X}$	
S1	IR6	A1	12,8	9	0,2969	10	0,2188	11	0,1406
		A2	12,9	9	0,3023	10	0,2248	11	0,1473
		B1	13	9	0,3077	9	0,3077	11	0,1538
		B2	11,9	9	0,2437	9	0,2437	11	0,0756
		C1	12,3	10	0,1870	10	0,1870	11	0,1057
		C2	13,2	9	0,3182	10	0,2424	11	0,1667
	IR7	A1	14,1	10	0,2908	10	0,2908	11	0,2199
		A2	13,9	11	0,2086	11	0,2086	12	0,1367
		B1	22,8	32	0,4035	25	0,0965	27	0,1842
		B2	37,8	35	0,0741	26	0,3122	31	0,1799
		C1	12,2	10	0,1803	10	0,1803	11	0,0984
		C2	13,1	11	0,1603	10	0,2366	11	0,1603
	IR8	A1	14,6	12	0,1781	13	0,1096	13	0,1096
		A2	15,4	15	0,0260	17	0,1039	14	0,0909
		B1	13,3	10	0,2481	10	0,2481	11	0,1729
		B2	13,4	13	0,0299	14	0,0448	13	0,0299
		C1	12,9	10	0,2248	10	0,2248	11	0,1473
		C2	14,3	12	0,1608	12	0,1608	13	0,0909

Continua 

S1	IR9	A1	14	10	0,2857	10	0,2857	11	0,2143
		A2	14,3	12	0,1608	12	0,1608	13	0,0909
		B1	12,8	10	0,2188	10	0,2188	11	0,1406
		B2	13,3	10	0,2481	10	0,2481	11	0,1729
		C1	13,6	10	0,2647	10	0,2647	11	0,1912
		C2	13,5	10	0,2593	10	0,2593	11	0,1852
S2	IR10	A1	13,9	12	0,1367	12	0,1367	13	0,0647
		A2	13,5	11	0,1852	13	0,0370	13	0,0370
		B1	12,4	11	0,1129	12	0,0323	12	0,0323
		B2	14,4	12	0,1667	12	0,1667	13	0,0972
		C1	13,9	11	0,2086	12	0,1367	13	0,0647
		C2	13,6	12	0,1176	12	0,1176	13	0,0441
	IR11	A1	12,1	10	0,1736	10	0,1736	11	0,0909
		A2	ND						
		B1	11,2	10	0,1071	10	0,1071	11	0,0179
		B2	13,7	10	0,2701	10	0,2701	13	0,0511
		C1	13,7	12	0,1241	14	0,0219	11	0,1971
		C2	13,5	10	0,2593	14	0,0370	11	0,1852
	IR12	A1	14,1	10	0,2908	11	0,2199	12	0,1489
		A2	18,1	25	0,3812	21	0,1602	17	0,0608
		B1	12,1	10	0,1736	10	0,1736	11	0,0909
		B2	12,3	10	0,1870	10	0,1870	12	0,0244
		C1	12,4	11	0,1129	11	0,1129	12	0,0323
		C2	13	10	0,2308	11	0,1538	12	0,0769
IR13	A1	10,9	9	0,1743	9	0,1743	10	0,0826	
	A2	12,5	9	0,2800	9	0,2800	11	0,1200	
	B1	10,3	10	0,0291	10	0,0291	12	0,1650	
	B2	11,9	11	0,0756	11	0,0756	12	0,0084	
	C1	12,8	11	0,1406	11	0,1406	12	0,0625	
	C2	ND							
IR14	A1	13,7	11	0,1971	12	0,1241	12	0,1241	
	A2	15,5	18	0,1613	17	0,0968	14	0,0968	
	B1	14,1	11	0,2199	11	0,2199	13	0,0780	
	B2	16,7	20	0,1976	19	0,1377	14	0,1617	
	C1	14,1	13	0,0780	13	0,0780	13	0,0780	
	C2	14,3	12	0,1608	11	0,2308	13	0,0909	
IR15	A1	13,5	10	0,2593	10	0,2593	11	0,1852	
	A2	13,6	10	0,2647	10	0,2647	11	0,1912	
	B1	17,2	24	0,3953	20	0,1628	14	0,1860	
	B2	13,7	10	0,2701	10	0,2701	11	0,1971	
	C1	13,6	10	0,2647	10	0,2647	11	0,1912	
	C2	13,3	10	0,2481	10	0,2481	11	0,1729	

Continua 

	A1	13,4	14	0,0448	14	0,0448	14	0,0448
	A2	13,9	13	0,0647	13	0,0647	13	0,0647
IR16	B1	12,3	12	0,0244	11	0,1057	12	0,0244
	B2	12,9	11	0,1473	12	0,0698	13	0,0078
	C1	12,1	11	0,0909	12	0,0083	12	0,0083
	C2	ND						
S2	A1	15	15	0,0000	14	0,0667	14	0,0667
	A2	15,6	15	0,0385	15	0,0385	15	0,0385
IR17	B1	14,2	13	0,0845	13	0,0845	13	0,0845
	B2	13,9	14	0,0072	13	0,0647	14	0,0072
	C1	17	17	0,0000	17	0,0000	16	0,0588
	C2	ND						
			$\bar{\epsilon}_r$	0,1829	$\bar{\epsilon}_r$	0,1607	$\bar{\epsilon}_r$	0,1076
			$\bar{\epsilon}_r$ %	18,29	$\bar{\epsilon}_r$ %	16,07	$\bar{\epsilon}_r$ %	10,76

Tomando en cuenta las distancias y el error relativo al hacer uso del polinomio de tercer grado al capturar las imágenes termográficas, Tabla 12, por otra parte al identificar el mínimo y máximo error y analizando cualitativamente las dos imágenes a las cuales les corresponde se observa la diferencia en el detalle de la imagen termográfica al trabajar en un rango de temperatura de 4 [°C] a 40[°C] y una temperatura ambiente de 10 [°C], Tabla 12.

Tabla 12

Error relativo promedio en las mediciones realizadas con el SVIS y la distancia de cada una.

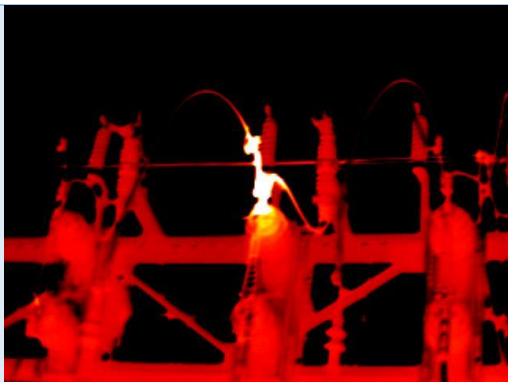
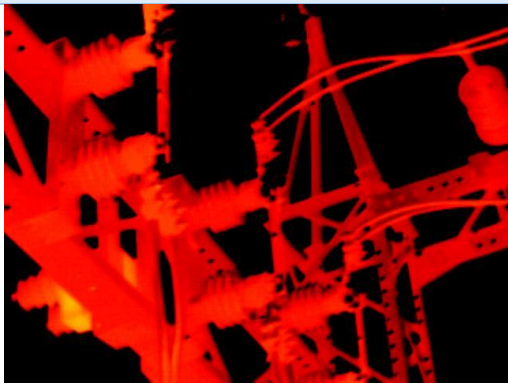
	$\epsilon_r = \frac{\Delta_x}{X} \times 100\%$	Distancia[m]
IR6	13	8,3
IR7	16	13,4
IR8	10	8,2
IR9	17	13,6
IR10	6	6,3
IR11	10	8,5
IR12	7	6,7
IR13	9	6,3

Continua 

IR14	10	9,5
IR15	19	7,4
IR16	3	3,2
IR17	5	3,7

Tabla 13

Diferencia del detalle en las imágenes termográficas con menor y mayor error relativo en las mediciones con el SVIS

	Imagen	$\epsilon_r = \frac{\Delta_x}{X}$ $\times 100\%$	Distancia[m]
IR15		19	7,4
IR16		3	3,2

Finalmente se presenta la valoración por cada seccionador haciendo uso del polinomio de tercer grado y las directrices típicas de evaluación (I.Infraspection, 2008), Tabla 14.

Tabla 14

Valoración de cada seccionador por medio SVIS y el software SmartView

	Áreas de intereseés	Valoración	Valoración	
		SmartView	SVIS	
S1	IR6	A1	0	0
		A2	0	0
		B1	0	0
		B2	0	0
		C1	0	0
		C2	0	0
	IR7	A1	0	0
		A2	0	0
		B1	4	4
		B2	2	2
		C1	0	0
		C2	0	0
IR8	A1	4	0	
	A2	4	4	
	B1	0	0	
	B2	0	0	
	C1	0	0	
	C2	0	0	
IR9	A1	0	0	
	A2	0	0	
	B1	0	0	
	B2	0	0	
	C1	0	0	
	C2	0	0	
S2	IR10	A1	0	0
		A2	0	0
		B1	0	0
		B2	0	0
		C1	0	0
		C2	0	0

Continua 

	A1	0	0
	A2	N/D	N/D
IR11	B1	0	0
	B2	0	0
	C1	0	0
	C2	0	0
	A1	0	0
IR12	A2	4	4
	B1	0	0
	B2	0	0
	C1	0	0
	C2	0	0
IR13	A1	0	0
	A2	0	0
	B1	0	0
	B2	0	0
	C1	0	0
	C2	N/D	N/D
IR14	A1	0	0
	A2	4	4
	B1	0	0
	B2	4	4
	C1	0	0
	C2	0	0
IR15	A1	0	0
	A2	0	0
	B1	4	4
	B2	0	0
	C1	0	0
	C2	0	0
IR16	A1	0	0
	A2	0	0
	B1	0	0
	B2	0	0
	C1	0	0
	C2	N/D	N/D
IR17	A1	4	0
	A2	4	4
	B1	0	0
	B2	0	0
	C1	4	4
	C2	N/D	N/D

4.2 Análisis de resultados

Ya que el sistema basa su funcionamiento en función matemática, aplicada a los valores de pixelamiento de una imagen térmica, existirá la reproducibilidad de la medida de temperatura si se analiza exactamente la misma región de interés, esto a su vez se asociaría con la confiabilidad del sistema.

Sin embargo las medidas obtenidas presentan errores sistemáticos, esto se debe a que los valores de temperatura se obtienen por medio de una formulación matemática.

De la Tabla 10 se presentan los indicadores de bondad de ajuste para cada polinomio, estos permitieron conocer que tanto se relacionan las funciones polinomiales, y las áreas específicas de estudio o puntos de análisis.

Entre los polinomios de primer grado y segundo grado el error típico de estimación es superior a las 3 unidades en comparación con el polinomio de tercer grado el cual posee un error de 1,7911 unidades lo cual se constata con el error relativo total de la Tabla 10 de los polinomios de grado 1 y 2 el cual es superior al 16% en comparación con el error relativo total del polinomio de tercer grado que es del 10,76%. De manera que al considerar este último polinomio para el sistema de valoración se obtendrá una precisión del sistema del 89,24%.

Por otra parte el polinomio de tercer grado posee un coeficiente de correlación de 0,91 y entregando a la vez un coeficiente de determinación de 0,84 que presenta el modelo para asociar la temperatura promedio de la región de interés de la imagen termográfica obtenida mediante la función matemática y la temperatura real.

Los parámetros mencionados indican que el polinomio más idóneo para ser usado en el sistema es el de tercer grado.

En lo que respecta al detalle o calidad de la imagen termográfica, esta asociada directamente con la distancia en la cual se toma la fotografía, ya

que a una distancia de 3 [m], el error relativo por medición de temperatura será menor del 5%.

4.3 Comprobación de hipótesis

4.3.1 Demostración de la hipótesis mediante Chi-cuadrado

De una muestra de 69 pruebas de funcionamiento, se demuestra que el Sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas permite evaluar interruptores seccionadores de medio voltaje. En la Tabla 15 se establece dos clases, la primera como; **Evalúa (frecuencia esperada)** hipótesis de trabajo, la cual indica la cantidad de pruebas en las que el sistema diferencia la temperatura de las estructuras que sujetan los seccionadores y la segunda como **No Evalúa (frecuencia observada)** como hipótesis nula, en el caso que el sistema no diferencia la temperatura de las estructuras y los seccionadores. Además se presentan tres categorías, cada categoría, contiene un intervalo de temperatura, siendo las temperaturas de **11-20 [°C]** aquellas que con un orden de prioridad entre 3 y 4 que representan un bajo nivel de gravedad en el desperfecto. La categoría de **21-30[°C]** y mayores a **30[°C]** corresponde a un alto nivel de gravedad en el desperfecto por conexión de los seccionadores.

Tabla 15

Comprobación de la hipótesis mediante Chi cuadrado

	11-20[C]	21-30[C]	>30[C]
Evalúa	47	4	2
No Evalúa	19	0	0
$\frac{(F_{esp.}-F_{obs})^2}{F_{esp.}}$	16,68	4	2
	$\sum \frac{(F_{esp.}-F_{obs})^2}{F_{esp.}}$		22,68
	df=(f-1)(c-1)		2
	a=0.05		5,99

De la tabla 15, se comprueba hipótesis ya que la sumatoria de Chi-cuadrado para 2 grados de libertad es 22,68 es mayor que 5,99 valor que fue obtenido mediante la tabla de Chi-cuadrado para 2 dos grados de libertad y un nivel de significación de 0,05.

El sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas permite evaluar interruptores seccionadores de medio voltaje, como se evidencio en la Tabla 14, la cual es un recuento de las valoraciones entregadas por el sistema desarrollado, con un total de 69 aciertos de 72 pruebas.

El sistema al realizar el procesamiento de las imágenes termográficas tendrá una precisión del 89,24%, un coeficiente de determinación de 0,84 y un error típico de estimación del 1,7911[°C] en las mediciones de temperatura que realice sobre los interruptores seccionadores, con una rango de operación de 4 a 40 [°C], una temperatura ambiente de 10[°C] y una distancia de captura no mayor a 8 [m].

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El Sistema de valoración consiguió estimar y valorar la temperatura por medio de una imagen térmica en formato .JGPEG estableciendo parámetros de precisión del 89% cercanos a los que tendría un sistema comercial, propio de un equipo termográfico sin mencionar que estos últimos requieren de archivos tipo .is2 para realizar la misma tarea.
- El Sistema de valoración no es tipo propietario debido a que el sistema basa su funcionamiento en el procesamiento de imágenes y sólo requerirá de las mismas para que el operario analice diferentes interruptores seccionadores, sin que se tome en cuenta la marca del equipo que origino la imagen termográfica.
- El desarrollo del Sistema de valoración basado en el procesamiento de imágenes termográficas usando las librerías de software libre OpenCV, permitió la implementación de un algoritmo para establecer las regiones de interés por medio de la actividad del mouse, de manera que al área seleccionada se le pueda aplicar una función polinómica para la medición de la temperatura.
- La plataforma UI en la cual se creó la interfaz para el usuario permite conjugar, el uso de eventos mostrados en ventanas estáticas y también el uso de ventanas dinámicas, siendo éstas últimas las más transparentes al usuario y en las cuales se puede realizar el proceso de selección de las áreas de interés.
- El diseñador al sólo hacer uso de ventanas estáticas, limitará al usuario de su sistema el ubicar las mismas en otra posición, ya que estas estarán

contenidas en la interfaz sin opción de desplazamiento a comodidad o peor aún en caso de ser necesario maximizarla o minimizarla.

- De las 69 evaluaciones de temperatura obtenidas por el Sistema de valoración usando el polinomio de tercer grado se pudo constatar que de los tres polinomios obtenidos, el de tercer grado es el que posee un mayor coeficiente de determinación R 0,84 y un menor error de estimación Se 1,7911.
- El coeficiente de determinación del polinomio de tercer grado R 0,84 aparte de indicar la fuerte relación que existe entre las medidas reales y las obtenidas por el sistema, muestra la fuerte relación del modelo obtenido de la nube de dispersión de los 1200 puntos y los bornes de conexión de los diferentes seccionadores evaluados.
- El Sistema de valoración al realizar más de 60 evaluaciones de bornes de conexión en imágenes captadas a distancias comprendidas entre los 4 y 13,8 [m] tendrá una precisión del 89,24% en las mediciones de temperatura.
- El Sistema de valoración entregará las evaluaciones de temperatura de los bornes de conexión de los interruptores seccionadores unipolares tipo cuchilla con un error relativo menor al 4%, al procesar las imágenes captadas a una distancia de 4[m] obtenidas de un equipo de gama media.
- En función de los parámetros; precisión y determinación se puede considerar al Sistema de valoración como un instrumento enfocado en el área del mantenimiento eléctrico en medio y alto voltaje y herramienta complementaria para la interpretación de ensayos o pruebas no destructivas basadas en imágenes termográficas.

- El sistema de valoración basa sus evaluaciones de temperatura en función de las variaciones en el pixelamiento que reflejan gráficamente el diferencial de temperatura entre los distintos elementos, seccionadores y estructuras, siendo esta la información primaria del sistema.
- En las imágenes termográficas cada pixel de la imagen corresponde a una medida de temperatura ya que inicialmente la cámara termográfica capta el nivel de radiación infrarroja lo transforma a un nivel de temperatura y a la vez da el detalle de temperatura en las imágenes.
- Los bornes de conexión de los interruptores seccionadores tienden a presentar una temperatura superior en comparación a la estructura que los soporta, esto es porque la unión mecánica de dos diferentes metales ante el paso de una elevada corriente produce este efecto térmico, permitiendo que el sistema de valoración diferencie las temperaturas de los conectores con falencias y las estructuras.
- Se consiguió establecer un filtro por binarización para que el Sistema de valoración excluya de forma preliminar y automática los elementos con fallas que posean una temperatura superior $14,4[^\circ\text{C}]$, sin embargo si en la imagen presenta fuentes de luz como lámparas se requiere de una selección manual de las áreas de interés.

5.2 Recomendaciones

- Para posteriores desarrollos es recomendable hacer de uso de un equipo de gama alta para la adquisición de las imágenes termográficas, de manera que se consiga un mejor detalle de cada imagen consiguiendo mejorar la precisión en las valoraciones de temperatura.
- La adquisición de las imágenes se las deberá realizar en las horas de la noche y con máxima carga, de esta forma se evita lecturas en falso que podrían dar las superficies metálicas bajo efectos de la luz solar.

- Ante la presencia de los puntos calientes en los bornes de conexión de los interruptores seccionadores es necesario realizar los ajustes necesarios con el equipo adecuado fijando la presión establecida por los fabricantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANSI/NETA. (2011). *STANDARD FOR MAINTENANCE TESTING SPECIFICATIONS for Electrical Power Equipment and Systems*. United States of America: InterNational Electrical Testing Association.
- Ariza, F. (2006). Caracterización de imágenes termográficas de pararrayos presentes en subestaciones eléctricas. *Universidad Industrial de Santander*, 18-19.
- Bagavathiappan S, L. B. (2013). Infrared thermography for condition monitoring a review. *Infrared Phys. Technology*, 35-55.
- Che-Wung, H., Kyung-Nam , J., & Sun-Chul , J. (2012). Diagnosis of MV Power Cables for Nuclear Power Plants. *International Council on Electrical Engineering*, 317-320.
- Corsi. (2015). New frontiers for infrared. *Opto-Electron*, 3-25.
- Corsi, C. (2010). History highlights and future trends of infrared sensors. *J. Mod. Opt.*, 1663–1686.
- Douglas Figueroa, L. E. (2005). *Prácticas de Laboratorio de Física*. Venezuela: Equinoccio.
- Estratégicos, M. C. (2015). Balance Energético Nacional 2015. *Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables*, 29-30.
- Fariba Khodayar, S. S. (2015). Infrared thermography and NDT: 2050 horizon. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 210-231.
- Feng, Z., Kun , Y., Kaihua , Z., Yanlei , L., Kaipin, X., & Yufang, L. (2015). An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum. *Infrared Physics & Technology*, 275–280.
- Fluke. (2014). Introducción a los fundamentos de la termografía. *Utilización cámara termica*, 7-8.
- Fluke. (2014). Software SmartView. *Uso cámara térmica*, 14-15.
- Glavaš, H., Józsa, L., & Barić, T. (2016). Infrared thermography in energy audit of electrical installations. *Technical gazette*, 1533-1539.
- Glowacz, A., & Glowacz, Z. (2017). Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology*, 7–16.
- Gonzáles, J. (2010). Estudio de mantenimiento en patios de subestaciones del sistema eléctrico del estado nueva Esparta utilizando técnica de termovisión con la cámara Thermacam P65. *Universidad de oriente*, 117-127.
- Hayes, N. (1999). *Foundatio of Psychology*. España-Madrid.
- I.Infraspection. (2008). Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment. *Infraspection Institute*, 96.
- Ignacio Bejarano, R. S. (2015). Reconocimiento de caracteres mediante imágenes en contadores de gas en entornos reales. *Universidad Complutense de Madrid*, 12-13.

- J. Mora, G. C. (2004). Atención de Fallas en Subestaciones de Transmisión de Energía. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 183-190.
- Knueppel, K. (2015). Struggles in School or Work May Be Caused by a Functional Vision Problem. *Vision Therapy*.
- Lahiri, B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., & Philip, J. (2012). Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology*, 221–235.
- Lian Guo, S. L. (2014). Analysis on Internal Defects of Electrical Equipments in Substation Using Heating Simulation for Infrared Diagnose. *China International Conference on Electricity Distribution*, 39-42.
- Liang , G., Shaoyu, L., Ming, L., Jixian, M., Lifang , X., & Qing, Y. (2014). Analysis on internal defects of electrical equipments in substation analysis on internal defects of electrical equipments in substation using heating simulation for infrared diagnose using heating simulation f or infrared diagnose. *2014 China International Conference on Electricity Distribution*, 39-42.
- Maior, L., Liberini, M., Campanella, D., Astarita, A., Esposito, S., Boccardi, S., & Meola, C. (2017). Infrared thermography for monitoring heat generation in a linear friction welding process of Ti6Al4V alloy. *Infrared Physics & Technology*, 325-328.
- Mariusz, M., Koprowski, R., & Wróbel, Z. (2015). Methods of face localization in thermograms. *Biocybernetics and Biomedical engineering*, 138-146.
- Moghadam P, V. S. (2014). The next generation of thermography devices. *Thermosense: Thermal Infrared Appl. XXXVI*, 14-19.
- Mohd Rafi, I. D. (2007). Diagnosis of MV Oil Filled Cable Terminations with X- Ray Imaging and Infrared (IR) Thermography. *America Journal of Applied Sciences*, 168-170.
- Moore, H. (2007). *Matlab para ingenieros*. México DF, México: Pearson Educación.
- Novalés, A. (2010). *Análisis de Regresión*. Madrid: Universidad Complutense.
- Novizona, Maleka, A., Bashira, N., & Asilaha, N. (2013). Thermal Image and Leakage Current Diagnostic as a Tool for Testing and Condition Monitoring of ZnO Surge Arrester. *Jurnal Teknologi*, 27-32.
- OpenCV. (2013). Documents about OpenCV. *OpenCV API Rerefence*, 3-4.
- Peeters, J., Ribbens, B., Dirckx, J., & Steenack, G. (2016). Determining directional emissivity numerical estimation and experimental validation by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 344-350.
- Rambli, A. B. (2016). Automated calibration for optical see-through head mounted display using display screen space based eye tracking . *3rd International Conferece on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*, (págs. 448-453). Malaysia.
- Rochín, J. (2011). *Teoría y Psicología*. México.
- Rogalski, A. (2010). Infrared detectors. *Taylor & Francis*.
- Schlessinger, S. a. (1989). Infrared Technology Fundamentals. *Optical Science and Engineering*, 55-74.

- Scott, W. (1989). Falcon Eye FUR, GEC Helmet Aid F-16 Mission Flexibility. *Aviation Week and Space Technology*, 33-35.
- Tomás, J. (2014). Aberrometría ocular: aplicaciones clínicas y limitaciones de los sensores de frente de onda. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, (págs. 93-105). España.
- Vidas S, M. P. (2013). A handheld 3D thermography system for energy auditing. *Energy Build*, 445-460.
- WEG. (04 de Agosto de 2017). WEG. Recuperado el 22 de Agosto de 2017, de WEG: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Generaci%C3%B3n%2CTransmisi%C3%B3n-y-Distribuci%C3%B3n/Seccionador/Seccionador-Monopolar-Tipo-Cuchilla-%28GB%29/Seccionador-Monopolar-Tipo-Cuchilla-%28WSFC%29/p/MKT_WTD_HOOK_STICK_DISCONNECTOR
- Widjaja Putra, B., & Soni, P. (2017). Evaluating NIR-Red and NIR-Red edge external filters with digital cameras for assessing vegetation indices under different illumination. *Infrared Physics & Technology*, 148–156.

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: ERNESTO ALEJANDRO ABRIL CHAFLA.

En la ciudad de Latacunga a los 24 días del mes de agosto de 2017.

Aprobado por:



.....
Ing. Armando Álvarez Salazar
DIRECTOR DEL PROYECTO



.....
Ing. Franklin Silva Monteros
DIRECTOR DE LA CARRERA



.....
Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO