



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER

Título del proyecto:
Procesamiento de imágenes termográficas en Matlab para detección predictiva de fallas en el generador eléctrico de la Hidroeléctrica Sopladora.
Línea de investigación:
Automatización y control de procesos con aplicaciones en la industria
Campo amplio de conocimiento:
Ingeniería, industria y construcción.
Autor:
Freddy Eduardo Calle Jara
Tutor:
Mgs. René Ernesto Cortijo Leyva

Quito - Ecuador

2023

APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, **René Ernesto Cortijo Leyva** con C.I: **1719010108** en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: **PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS EN MATLAB PARA DETECCIÓN PREDICTIVA DE FALLAS EN EL GENERADOR ELÉCTRICO DE LA HIDROELÉCTRICA SOPLADORA.**

Elaborado por: **Freddy Eduardo Calle Jara**, de C.I: **103403234**, estudiante de la Maestría: **ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**, resolución: **RPC-SO-09-No.265-2021**, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 15 de marzo del 2023

**RENE
ERNESTO
CORTIJO
LEYVA**

Firmado
digitalmente por
RENE ERNESTO
CORTIJO LEYVA
Fecha:
2023.03.15
18:42:09 -05'00'

Firma

DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, Freddy Eduardo Calle Jara, con C.I.: 0103403234, autor del proyecto de titulación denominado: Procesamiento de imágenes termográficas en Matlab para detección predictiva de fallas en el generador eléctrico de la Hidroeléctrica Sopladora. Previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y Automatización.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
3. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito, D.M., 15 de marzo de 2023.



Firmado electrónicamente por:
**FREDDY EDUARDO
CALLE JARA**

Firma

Índice

APROBACIÓN DEL TUTOR	I
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	II
INFORMACIÓN GENERAL	1
Contextualización del tema.	1
Problema de investigación	4
Objetivo general.	5
Objetivos específicos.	6
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos	6
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	7
Contextualización general del estado del arte.	7
Proceso investigativo metodológico.	10
CAPÍTULO II: PROPUESTA	11
Fundamentos teóricos aplicativos.	11
Termografía	11
Descripción de la propuesta.	17
Estructura general.	18
Explicación del aporte.	25
Estrategias y/o técnicas.	29
Validación de la propuesta.	29
Matriz de articulación de la propuesta.	32
Análisis de resultados. Presentación y discusión.	33
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	37

ANEXOS	40
ANEXO 1: LINEAS DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN.	40
ANEXO 2: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA.	47
ANEXO 3: INFORME DE ORIGINALIDAD (TURNITIN).	50
ANEXO 4: DE APROBACIÓN DEL TUTOR.	53

Índice de tablas

1.	Característica técnicas del generad de la Central Hidroeléctrica Sopladora	3
2.	Emisividad de metales	14
3.	Descripción de perfil de validadores	30
4.	Criterios de evaluación	30
5.	Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Oswaldo Alejandro Zhañay Soliz	31
6.	Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Roberto Carlos Guerrero Ochoa	31
7.	Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Martín Fernando Cárdenas Vera.	31
8.	Matriz de articulación	32
9.	Evaluación Magíster Oswaldo Alejandro Zhañay Soliz	47
10.	Evaluación Magíster Roberto Carlos Guerrero Ochoa	48
11.	Evaluación Magíster Martín Fernando Cárdenas Vera.	49

Índice de figuras

1.	Esquema general del sistema de carga de agua.	2
2.	Terminales A y B de la salida del generador 13.8 KV de la Central Hidroeléctrica Sopladora.	4
3.	Termografías capturadas de un disco duro en calentamiento y enfriamiento (izquierda en falso color) e interpretación en niveles de gris durante el calentamiento (derecha en niveles de gris).	8
4.	Proceso de la segmentación	9
5.	Espectro Electromagnético.	11
6.	Imagen térmica e imagen real.	12
7.	Radiación térmica de un objeto.	13
8.	Campo de Visión <i>FOV</i> de una cámara termográfica,	15
9.	Campo de visión Instantánea <i>IFOV</i> de una cámara termográfica.	16
10.	<i>IFOV</i> - <i>FOV</i>	16
11.	<i>IFOV</i> 3X	17
12.	Diagrama del Proceso a desarrollar	19
13.	Visualización de la pantalla Command Window	20
14.	Panel de programación	20
15.	Imágenes leídas mediante el explorador de archivos	21
16.	Selección manual del ROI	22
17.	Aplicación de la máscara a imagen IR	22
18.	Máscara de las zonas con mayor temperatura	24
19.	Etiquetado de las zonas con mayor temperatura	24
20.	Visualización de los resultados	25
21.	Pantalla principal de la aplicación	26
22.	Configuración de la temperatura máxima, mínima y potencia de generación.	26
23.	Botón para cargar las imágenes.	27
24.	Imágenes IR y real a ser procesadas.	27
25.	Selección de la ROI	28
26.	Selección de la ROI	28

27.	Visualización de las zonas con mayor temperatura	29
28.	Resultado con la configuración 1	33
29.	Configuración 2	34
30.	Configuración 3	35
31.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 1)	40
32.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 2)	41
33.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 3)	42
34.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 4)	43
35.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 5)	44
36.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 6)	45
37.	Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 7)	46
38.	Informe de originalidad hoja 1	50
39.	Informe de originalidad hoja 2	51
40.	Informe de originalidad hoja 3	52
41.	Acta de aprobación del tutor	53

INFORMACIÓN GENERAL

Contextualización del tema.

La mayoría de las industrias en la actualidad están actualizando sus sistemas a la nueva era de la industria 4.0, una de las técnicas más importantes que se maneja dentro de esta industria es la detección predictiva de fallas por varios métodos, uno de ellos es mediante la temperatura emitida por imágenes que se obtienen de las cámaras termográficas.

La técnica utilizada por las cámaras termográficas es transformar la radiación infrarroja que emiten los cuerpos en el rango de la temperatura en una imagen, a la cual se le denomina como imagen termográfica, estas cámaras termográficas son capaces de anticiparse al efecto por la modificación de la temperatura de los elementos.

Muchas empresas utilizan también el procesamiento de imágenes para analizar los patrones de comportamiento en esas imágenes y adelantarse o aumentar el valor estadístico predictivo de una fuente.

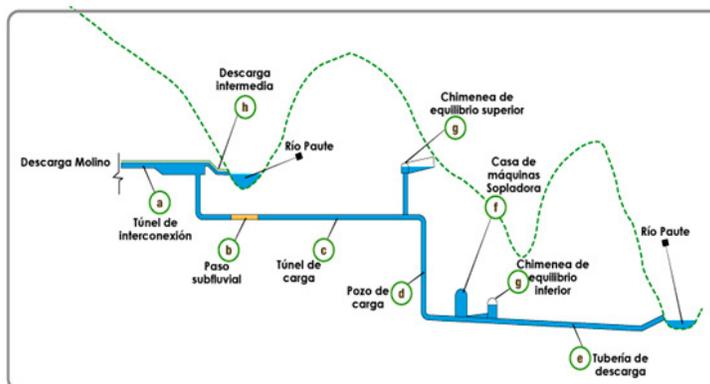
El mantenimiento predictivo en la actualidad es considerado de gran importancia, debido a que nos anticipamos a las fallas sin la necesidad de parar la producción, aumentando la confiabilidad y disponibilidad de la planta.

La Central Hidroeléctrica Sopladora tiene una potencia instalada de 487 MW, pertenece al Complejo Hidroeléctrico del Río Paute y es la tercera central hidroeléctrica mas grande del país y la tercera en ubicación del complejo hidroeléctrico, para su generación utiliza las aguas turbinadas de la Central Hidroeléctrica Molino que es la más antigua e importante del país. La Central Hidroeléctrica Sopladora es un proyecto que se que esta ubicado en el canto Sevilla de Oro de la provincia del Azuay y limita con el cantón Santiago de Méndez de la provincia de Morona Santiago.

La Central Hidroeléctrica Sopladora utiliza las aguas turbinadas de la Central Hidroeléctrica Molino, estas aguas a través de dos túneles de descarga y un túnel de derivación evacuan las aguas hacia la cámara de interconexión, dicha cámara almacena el volumen necesario de agua para garantizar el flujo necesario 150 m³/seg de ingreso a las turbinas para el funcionamiento en su potencia nominal. Desde la cámara de interconexión hay un túnel que de manera directa conecta al sistema de carga de la Central Sopladora y de esta forma llegar a las 3 turbinas del tipo Francis ubicadas en casa de máquinas.

Figura 1

Esquema general del sistema de carga de agua.



Nota: Fuente:(Ministerio de energías y minas, 2022)

En el interior de la central hidroeléctrica Sopladora desarrollan sus labores personal las áreas de mantenimiento eléctrico, electrónico, metrología, mecánico, civil, personal de operación y personal administrativo siendo aproximadamente 40 personas, quienes son los encargados de mantener la disponibilidad y confiabilidad de la planta siempre en los índices más altos

La Central Hidroeléctrica Sopladora esta compuesta por tres generadores del tipo síncronos de tres fases de eje vertical, en la Tabla 1 se detalla las características técnicas.

Tabla 1*Característica técnicas del generad de la Central Hidroeléctrica Sopladora*

Descripción	Valor
Tipo	Suspendido
Fases	3
Modo de enfriamiento	aire
Dirección de rotación	Sentido horario vista hacia arriba
Capacidad nominal.	180 MVA
Tensión nominal.	13.8 Kv
Corriente de Fase nominal.	7530.7 A
Factor de Potencia nominal.	0,9
Conexión.	Y
Tensión de excitación en vacío.	81 V
Corriente de excitación en vacío.	1074 A
Tensión de excitación nominal.	202 V
Corriente de excitación nominal.	1791 A
Frecuencia nominal.	60 Hz
Velocidad nominal.	360 rpm
Velocidad de embalamiento nominal.	590 rpm.
Numero de polos.	20
Sobreexcitación.	+ 89.6 MVAR

Nota: Fuente: Propia

El generador de la Central Hidroeléctrica Sopladora genera en sus terminales una tensión de salida de 13.8 KV con 3 fases, debido a las altas corrientes que circulan por cada fase el conductor se divide 4 barras que están situadas en la parte superior del cuarto del generador, en estas barras se conectan los cables llamados juntas flexibles que son las encargadas de acoplar o a las barras de fase aislada, estas barras son de material de aluminio y huecas en su interior encerradas individualmente, a través de las barras de fase aislada se llega al transformador principal para elevar la tensión a 230 kV y conectarse al sistema nacional interconectado (S.N.I).

Figura 2

Terminales A y B de la salida del generador 13.8 KV de la Central Hidroeléctrica Sopladora.



Nota: Fuente:Propia

Las juntas flexibles se utilizan para aislar las vibraciones del generador de las barras de fase aislada estáticas (IPB), estas a la vez proporcionan un pequeño ajuste posicional inducido térmicamente entre los terminales del generador y el IPB.

Problema de investigación

Garantizar el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas 24 horas al día 365 días al año evitando costosas averías y paradas no programadas, mejorando disponibilidad, confiabilidad y fiabilidad de las instalaciones, es algo a lo que la Central Hidroeléctrica Sopladora se enfrenta a diario, a fin de mantener la central siempre operativa, se tiene establecido planes de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo con órdenes de trabajo asignadas a cada área, como parte de estos mantenimientos se utilizan equipos y herramientas que ayudan con una mayor facilidad y confiabilidad en cualquier plan de mantenimiento predictivo es la termografía.

Las centrales Hidroeléctricas son de alto costo económico por lo que la continuidad del ser-

vicio depende mucho de su confiabilidad y disponibilidad de los equipos, siendo de mucha importancia la detección temprana de fallas eléctricas o mecánicas en los bornes del generador eléctrico de 13,8KV.

La Central Hidroeléctrica Sopladora esta compuesto por varios sistemas como eléctricos, electrónicos, mecánicos, neumáticos, hidráulicos donde cada uno de ellos son de suma importancia para la continuidad del servicio, dentro del sistema eléctrico esta el generador que es el encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, y ser transportada a través del transformador de potencia (13.8 KV - 230 KV) al sistema nacional interconectado, el método que se utiliza para para acoplar eléctricamente la salida del generador al transformador de potencia es mediante juntas flexibles que son ajustadas con terminales de conexión.

Debido a la alta vibración por la rotación de las turbinas, las juntas y pernos que conectan las barras de la salida del generador están expuestas sufrir incremento en la temperatura que podría acumularse hasta el punto de fundir las conexiones y provocar averías con parada de la planta e incluso se pueden producir incendios, para controlar que no exista un sobrecalentamiento en las juntas de los terminales se asigna una orden de trabajo al área de mantenimiento eléctrico semestralmente para que se realice una inspección utilizando la técnica de la termografía, tomando imágenes con una cámara termográfica.

Esta actividad la desarrolla puntualmente un técnico con certificado nivel 1 en termografía, para lo cual procede a tomar las imágenes manualmente en sitio, de las 3 juntas de las barras de los 3 generadores que existen en la Central Hidroeléctrica Sopladora, valiéndose específicamente de la experiencia y de otros factores como la potencia, temperatura, y la constante de emisividad realiza un análisis de todas las imágenes, para luego emitir un informe con el diagnóstico de si es necesario una intervención de mantenimiento en los terminales de las juntas flexibles.

Por todo lo expuesto anteriormente se hace necesario desarrollar un sistema automatizado de procesamiento de imágenes térmicas que emita un diagnóstico, y así no prescindir de un técnico, al mismo tiempo disminuimos la probabilidad que exista error humano en la valoración.

Objetivo general.

Desarrollar un sistema de procesamiento de imágenes termográficas en Matlab para detección predictiva de fallas en el generador eléctrico de la Hidroeléctrica Sopladora

Objetivos específicos.

- Contextualizar los fundamentos teóricos sobre mantenimiento predictivo, termografía y procesamiento de imágenes en Matlab.
- Determinar la metodología para el diagnóstico del estado de los terminales del generador Hidroeléctrico de 13,8 KV.
- Diseñar una aplicación en la herramienta de software Matlab que permita detectar de forma temprana fallas en los terminales del generador Hidroeléctrico de 13,8 KV mediante procesamiento de imágenes.
- Validar mediante pruebas de funcionamiento.

Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos

Representa un aporte social y económico ya que al mantener en óptimo estado de funcionamiento los terminales del generador con una confiabilidad superior al 99 %, por lo tanto garantiza el suministro de energía eléctrica a los hogares e industrias del país, permitiendo que se beneficien de este servicio básico.

La Central Hidroeléctrica Sopladora es la tercera hidroeléctrica del complejo hidroeléctrico Río Paute y la tercera más grande del país luego de Coca Codo Sinclair y la Central Molino. Según datos recopilados del observatorio de electricidad y el ministerio de energía y minas este proyecto hidroeléctrico ha aportado una energía neta de 2.770 GWh al sistema nacional interconectado S.N.I. esto a permitido consolidar y fortalecer el proyecto de cambio de la matriz energética del Ecuador llegando abastecer el 13 % de la demanda de consumo de energía eléctrica en todo el país, esto es el equivalente a lo que consumen 1,8 millones de familias del país cada año. Observatorio de electricidad (2020)

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Contextualización general del estado del arte.

Según Neita Duarte, Peña Rodríguez et al. (2014) .^{El} mantenimiento predictivo se basa en establecer una relación entre una variable física y el desgaste o estado de una pieza o máquina, mediante el monitoreo de las condiciones de operación con el fin de detectar fallas sin interferir en el funcionamiento del equipo y evitando que alcancen afectar o detener la producción”.

La Universidad Tecnológica de Pereira en el año 2011, (Olarde et al., 2011) publica en su revista un trabajo titulado Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo, tiene como finalidad indicar la importancia, las ventajas y aplicaciones de la termografía en el mantenimiento predictivo. De esta manera parte de de un sustento teórico que cuando la temperatura se incrementa en un equipo o dispositivo es porque algo anormal esta ocurriendo en el funcionamiento u operación, es lo que se denomina Termografía, el dispositivo que captura la radiación térmica y convierte en imágenes es la cámara termográfica, con la ayuda de los manuales de los fabricantes donde indican la temperatura normal de funcionamiento, el personal de mantenimiento tiene una referencia si algo es anormal. Las aplicaciones de la termografía son múltiples en el campo de mantenimiento.

- Infraestructura eléctrica de alta y baja tensión.
- Motores eléctricos, generadores, bobinados.
- Hornos, calderas e intercambiadores de calor.
- Instalaciones de climatización.

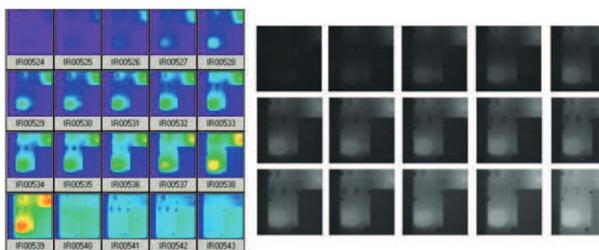
Concluye que las cámaras termográficas nos ayudan a obtener valores exactos de temperatura sin la necesidad de contacto físico y con los equipos en operación, esto es una ventaja porque se guarda la seguridad del técnico y evita paradas de mantenimiento al equipo, otra ventaja es que se puede encontrar fallas que son invisibles para el ojo humano y ayudan a prevenir paradas que ocasionan grandes pérdidas económicas.

En el año 2015 la Universidad de Cauca mediante el departamento de física (Fierro et al., 2015) realiza una investigación titulada Análisis de termografías infrarrojas dinámicas mediante técnicas de procesamiento de imágenes, y publica en la revista Ciencia y Desarrollo, tiene como finalidad evaluar meto-

dologías para establecer las fuentes de calor que afectan al dispositivo, también caracterizar los materiales observados y encontrar tendencias que permitan inferir comportamientos en los dispositivos. La investigación inicia o parte del principio de la conducción del calor donde involucran variables y constantes como la temperatura, la conductividad térmica, la distribución volumétrica de la fuente de calor y la difusividad térmica, mediante una cámara térmica se puede registrar la temperatura espacial y temporal de la superficie de un objeto. Para esto se realiza el montaje de una cámara IR SnapShot 525 de Infrared Solutions Inc. con una resolución de 120x120 píxeles y censa temperaturas desde de 0 a 650°, para eliminar el ruido que producen en las imágenes termográficas implementa un filtro pasa bajo Gaussiano y para el dominio del tiempo (promediado), también se aplica, el método del reflector difuso para compensar el efecto que produce la temperatura del fondo y afecta al objeto. Las imágenes las transforma de imágenes de falso color a imágenes en escala de grises donde el valor de cada píxel corresponde a un valor de temperatura Figura 3

Figura 3

Termografías capturadas de un disco duro en calentamiento y enfriamiento (izquierda en falso color) e interpretación en niveles de gris durante el calentamiento (derecha en niveles de gris).



Nota: Fuente:(Fierro et al., 2015)

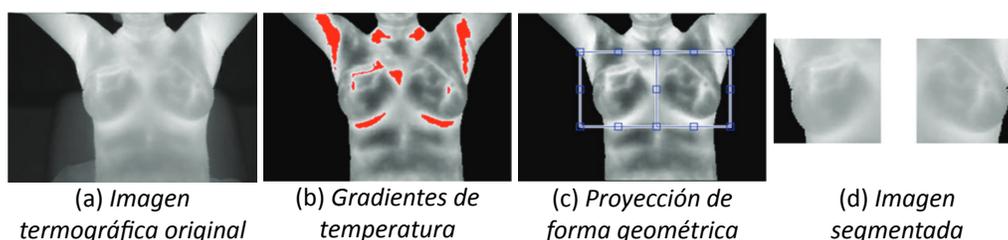
Utiliza histogramas para aclarar el panorama, también aplica la técnica de Laplaciano para la convolución en el procesamiento de imágenes. Abordada métodos con demasiada coherencia, por lo que se tiene una herramienta de caracterización del material y de posible predicción del comportamiento del calor al circular por el objeto. De manera precisa se determina la distribución de temperatura estática y dinámica en superficies de diferentes objetos. Se estimó la difusividad y las fuentes de calor por dos métodos: análisis de isothermas constantes y por combinación de operadores.

En el año 2014 la Universidad del Valle, Cali, Colombia mediante la Escuela de Electricidad y Electrónica (Guerrero et al., 2014) realizan un artículo titulado Segmentación automática de imágenes térmicas de la mama como apoyo a la detección de cáncer y realizan la publicación en la revista Sistemas y

Telemática, tiene como objetivo ayudar a la detección del cáncer de seno en sus inicios de formación y brindar información muy importante incrementando efectividad en la detección de cáncer utilizando imágenes, para ello mediante termografía se pretende coadyuvar a los métodos actuales, para lo cual desarrollan una propuesta que es la segmentación de la región de interés utilizando técnicas como la identificación de las regiones de alto gradiente de temperatura, detección de bordes y proyección de una forma geométrica.

Figura 4

Proceso de la segmentación



Nota: Fuente:(Guerrero et al., 2014)

La imagen de la Figura 4a corresponde a una de las 40 capturadas con la cámara del sistema médico Teletherm, con un sensor infrarrojo MCT en un rango de 1.5 a 13 μ m, campo de visión FOV de 28x20°, resolución de 280x200 píxeles, a una temperatura controlada entre 20 a 25°C. Los resultados obtenidos son 67,5 % de las imágenes con buena segmentación y el 32,5 % mala segmentación, debido a una mala captura de la imagen o cuando las mamas son muy grandes. Se concluye que la técnica aplicada al ser sencilla puede ayudar a reducir tiempos de procesamiento de otras técnicas, también es necesario incluir un protocolo de captura de imágenes, ya que existe una variabilidad de las imágenes.

Las ventajas de realizar un mantenimiento predictivo utilizando el método de termografía y procesamiento de imágenes:

- Se realiza a larga distancia en condiciones normales de funcionamiento sin necesidad de apagar el generador.
- Reducción de pérdidas por paradas imprevistas.
- Inspección sin contacto garantizando la seguridad de vidas humanas.
- Evitar paros no programados.

- Reducción de costos por mantenimiento.
- Valorar las prioridades para la acción correctiva.
- Permite identificar el elemento defectuoso de manera precisa. Bautista Tonato y Solís Mora, 2014.

Proceso investigativo metodológico.

La investigación que se llevará a cabo esta desarrollada desarrollada bajo un enfoque cualitativo y cuantitativo, que según la definición de (Sampieri, 2014) estaría dentro de lo que se define como un enfoque mixto, en la primera etapa se utiliza el enfoque cuantitativo como es la toma de valores numéricos en el rango de temperatura que se obtiene con la ayuda de la cámara termográfica, para luego ser analizados en un enfoque cualitativo que de acuerdo a normas, estándares, historial de imágenes, se genera un diagnóstico.

CAPÍTULO II: PROPUESTA

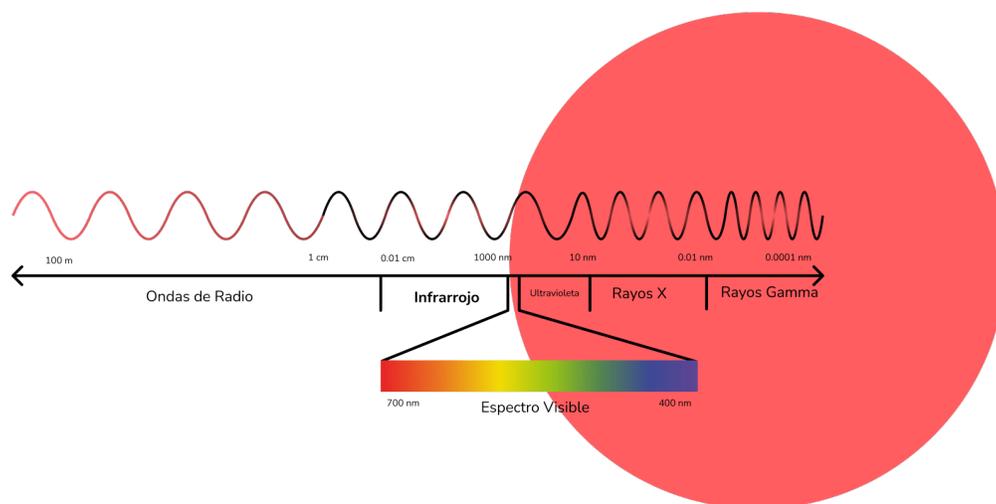
Fundamentos teóricos aplicativos.

Termografía

Los ojos del ser humano tienen la sensibilidad para captar e interpretar la radiación infrarroja y electromagnética con longitudes de onda que van desde $0.4\mu\text{m}$ hasta los $0.7\mu\text{m}$. todas las demás radiaciones se comportan como invisibles para el ojo del ser humano, la longitud de onda de la radiación infrarroja va desde $0.75\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$. (Flores Larsen & Hongn, 2012).

Figura 5

Espectro Electromagnético.



Nota: Fuente:(Niño Juan, 2020)

Según Flores Larsen y Hongn, 2012 La termografía infrarroja es un método no destructivo que permite determinar la distribución superficial de la temperatura de un objeto a distancia, presentando imágenes visibles de medida de radiación de energía infrarroja, a través de sensores especiales que se encargan de recoger la información.

Figura 6

Imagen térmica e imagen real.

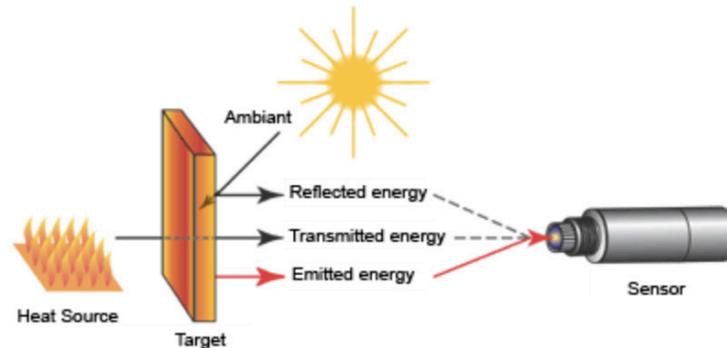


Nota: Fuente:(Niño Juan, 2020)

Ventajas de la medición de temperatura infrarroja sin contacto.

- Ahorra tiempo y acumula más datos.
- Anula el peligro en medición de objetos con movimiento, alto voltaje o inaccesibles.
- Medición de altas temperaturas arriba de los 1000°C, donde los termómetros de contacto no se utilizan.
- Se elimina la interferencia.
- Evita desgaste, contaminación sobre el objeto

Emisividad. Según Fluke Process (2023) La emisividad es la medición de la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja. La emisividad es calculado por la radiación térmica del objeto en comparación con la temperatura ambiente.

Figura 7*Radiación térmica de un objeto.*

Nota: Fuente:(Fluke Process, 2023)

La cantidad de radiación infrarroja emitido por un cuerpo indica la temperatura del objeto. Para una mejor comprensión la emisividad toma valores desde 0 para cuerpos muy brillantes hasta 1 que son los cuerpos negros.

Las cámaras termográficas tienen la opción de ajustar el valor de la emisividad y así incrementar la precisión para los distintos tipos de materiales como es el caso de los brillantes. Fluke Process (2023)

La Tabla 2 se muestra una lista de los materiales mas comunes con su respectiva emisividad, que nos sirve de referencia para la calibración y configuración de las cámaras termográficas al momento de realizar mediciones por infrarrojos, sirve como referencia para ajustar la emisividad en mediciones por infrarrojos. En esta se indica la emisividad ϵ de algunos de los materiales más comunes. La emisividad se representa por el símbolo ϵ

Tabla 2*Emisividad de metales*

Material	Temperatura	Valor de Emisividad
Acero laminado en frío	(93 °C)	0,75–0,85
Acero oxidado	(200 °C)	0,79
Acero superficie tratada térmicamente	(200 °C)	0,52
Aluminio laminado sin tratamiento	(170 °C)	0,04
Aluminio muy pulido	(100 °C)	0,09
Aluminio muy oxidado	(93 °C)	0,2
Aluminio no oxidado	(100 °C)	0,03
Aluminio no oxidado	(25 °C)	0,02
Cobre oxidado	(130 °C)	0,76
Cobre, laminado	(40 °C)	0,64
Cobre, pulido	(40 °C)	0,03

Nota: Fuente:(TESTO S.A, 2023)

Interpretación de la imagen térmica.

Técnicas de análisis de la imagen térmica.

Cámara Infrarroja. Según la Norma ASTM E (2009) "Una cámara termográfica es un instrumento fiable capaz de analizar y visualizar a distancia la distribución de temperatura de superficies completas con rapidez y precisión". Las aplicaciones y programas de termografía permiten facilitar la utilización, disminuir los tiempos de diagnóstico todo esto se ve reflejado en la disminución de costos.

La cámara termográfica almacena en un registro interno la intensidad de la radiación infrarroja, para luego con un procesamiento interno convertirla en una imagen visible que se puede interpretar por el ojo humano..

Las características más importantes de las cámaras termográficas son: la sensibilidad térmica, la precisión, la resolución espacial, la frecuencia de la imagen.

Sensibilidad térmica o NETD. La sensibilidad térmica, llamada NETD por sus siglas en inglés (*Noise Equivalent Temperature Difference*), es el ruido equivalente a la menor temperatura detectable, mientras más bajo es el NETD mejor se puede detectar un contraste térmico y oscila entre 50 - 100 mk

Precisión. Es el porcentaje de variación de temperatura medida con relación a su verdadera temperatura, las cámaras actuales oscilan entre $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$ para rangos los más extendidos.

Resolución espacial. Se la denomina IFOV (Instantaneous Field of View – Campo de visión instantáneo). Se expresa en miliradianes es el área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento.

Frecuencia de la imagen. Las imágenes en tiempo real tienen tasas de actualización de centenares de Hz (cuadros por segundos). Balageas (2007)

Campo de Visión. El Campo de Visión conocido también por sus siglas en inglés *FOV* (*Field of View*), es la superficie que la cámara termográfica puede visualizar Figura 8. Este campo de visión va a depender básicamente del tipo de lente que se utiliza, desde lentes con un gran angular para campos de visión grandes, y los lentes con teleobjetivo donde se obtiene una buena resolución espacial TESTO S.A (2023)

Figura 8

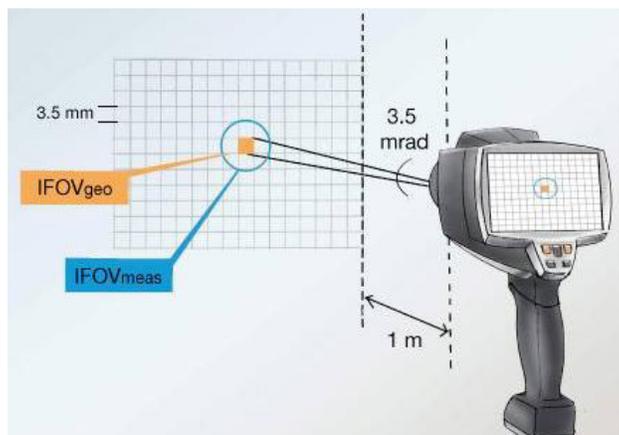
Campo de Visión FOV de una cámara termográfica,



Nota: Fuente:(TESTO S.A, 2023)

Campo de Visión Instantáneo . El Campo de Visión Instantáneo conocido también por sus siglas en inglés *IFOV* (*Instant Field of View*) se define como la proyección angular de un pixel, siendo el objeto mas pequeño que puede capturar la cámara termográfica a una distancia determinada. Figura 8. EL IFOV viene dado en *mrad* (*miliradianes*).

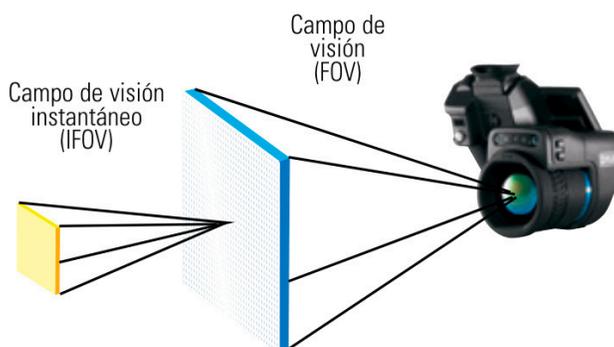
Figura 9
 Campo de visión Instantánea IFOV de una cámara termográfica.



Nota: Fuente:(TESTO S.A, 2023)

Para capturar objetos grandes con la cámara termográfica tenemos que alejarnos para que cuadre en la imagen, pero al alejarse se pierde información de las mediciones.

Figura 10
 IFOV - FOV



Nota: Fuente:(FLIR SYSTEM, 2018)

Objeto medible más pequeño. Objeto medible más pequeño conocido también por sus siglas en inglés *IFOVmeans* (*measured instantaneous field of view*), según TESTO S.A (2023) es la designación del objeto más pequeño cuya temperatura se puede medir de forma precisa con una cámara termográfica. Al IFOVmeas también se le llama marca de medición.

A continuación se explica con un ejemplo el *IFOVmeas* y su importancia de este parámetro.

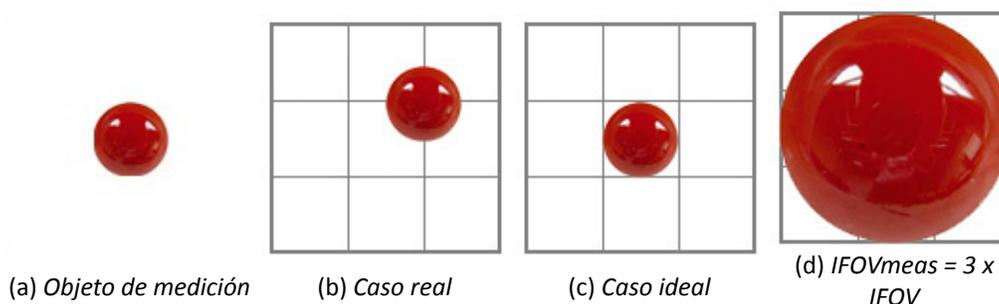
En la Figura 11a se observa la punta de un alfiler con fondo de una pared.

En la Figura 11b se puede observar un caso real donde la cabeza del alfiler forma parte de 4 píxeles/bolómetro. Por esta razón la temperatura medida por el bolómetro no corresponde ni con la temperatura del alfiler ni la pared, debido a que el bolómetro hace un cálculo del promedio de los dos valores.

En la Figura 11c se puede observar un caso ideal donde la cabeza del alfiler encaja exactamente en el tamaño de un píxel/bolómetro.

Sólo si un objeto es tres veces mayor Figura 11d que el tamaño del objeto visible más pequeño es decir un píxel del detector se le conoce como $IFOV_{meas}$, queda cubierto por completo. En este píxel se detecta la temperatura verdadera del objeto medido.

Figura 11
IFOV 3X



Nota: Fuente:(TESTO S.A, 2023)

Descripción de la propuesta.

La detección temprana en el aumento de temperatura de las juntas flexibles del acople entre las barras del generador y el transformador utilizando el análisis de las imágenes térmicas, en primera instancia identificamos la zona donde está ubicado los terminales, para luego mediante proceso de imágenes separara la región de interés conocido también por sus siglas en inglés *ROI (Region of Interest)* donde a través de pernos y conectores se unen las juntas flexibles a las barras del generador y del transformador.

En la actualidad esta actividad es desarrollada de manera manual, es decir el técnico realiza la captura de la imagen para luego ser analizada y emitir su diagnóstico principalmente en base a su experiencia, en otros trabajos proponen la automatización de este diagnóstico utilizando procesamiento digital

de imágenes y con la ayuda de técnicas que permiten automatizar como la segmentación, binarización y filtros. (Olarte et al., 2011)

Para lograr este objetivo, se desarrolló una propuesta donde se utiliza las técnicas principales para el procesamiento digital de imágenes como es el uso de la segmentación que esta basado en los cambios de altos gradientes de la temperatura, conjuntamente con la binarización y filtrado nos permite encontrar el trazado de bordes, como parte final tenemos la extracción de la ROI correspondientes a las zonas con las temperaturas más altas, utilizando como herramienta el software MATLAB.

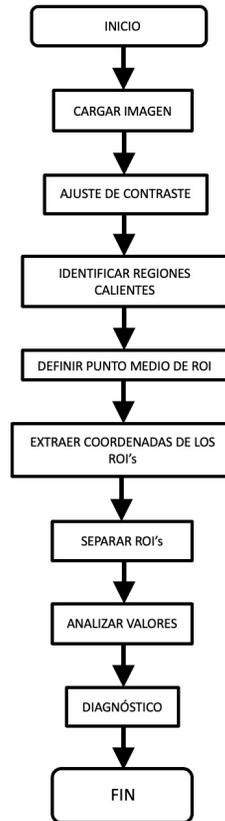
Esta propuesta se puede utilizar como una base de un procesamiento previo al análisis de un mantenimiento predicativo en los terminales de conexión de las barras del transformador y las barras del generador a través de las juntas flexibles de conexión.

Estructura general.

En la Figura 12 se muestra el diagrama del proceso a seguir para desarrollar el Procesamiento de imágenes termográficas en Matlab para detección predictiva de fallas en el generador eléctrico de la Hidroeléctrica Sopladora en el acople de las juntas flexibles y las barras aisladas del transformador.

Figura 12

Diagrama del Proceso a desarrollar

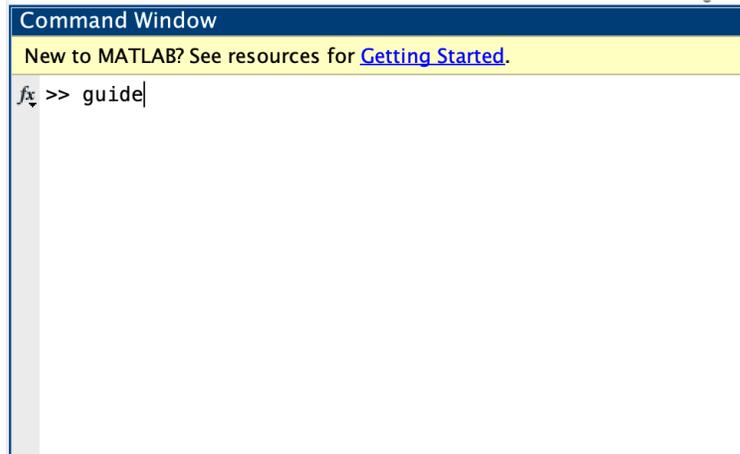


Nota: Fuente: Propio

Generar Panel de Programación. Iniciamos abriendo el software *MATLAB Version: 9.7.0.1190202 (R2019b)*, en el área de *Command Window* escribimos *guide*

Figura 13

Visualización de la pantalla Command Window

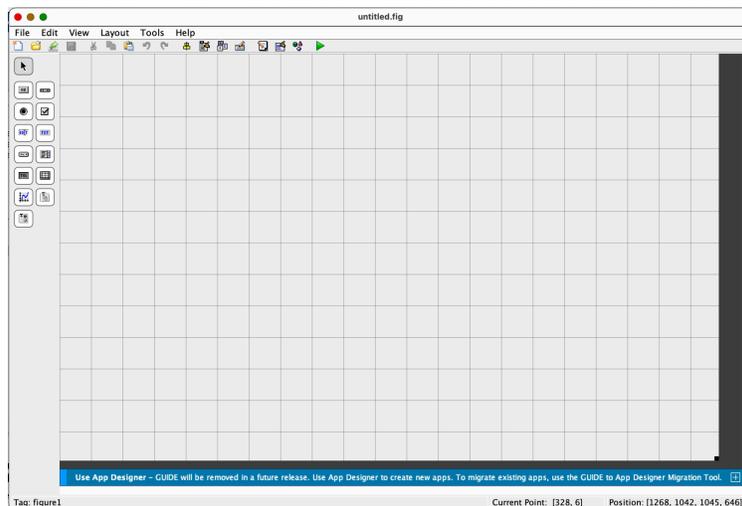


Nota: Fuente: Autor

se abre una ventana emergente y seleccionamos *Create New GUI - Blank GUI (Default)* se nos abre una panel, mediante la ayuda de la paleta de herramientas ubicado a la izquierda del panel insertamos, áreas de dibujos, botones, cuadros de texto, leyendas; necesarias para generar un entorno amigable con el usuario, grabamos el proyecto con el nombre *termografia_generador*.

Figura 14

Panel de programación

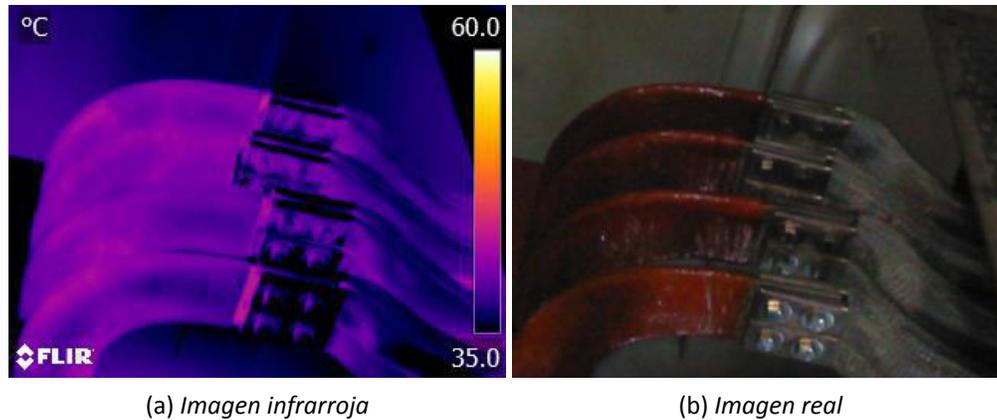


Nota: Fuente: Autor

Cargar Imagen Ir y Real IR. Con la ayuda del comando *uigetfile* nos permite seleccionar a través del explorador de archivos las imágenes IR y real, la dimensión de las imágenes son de 320x240, como se puede observar las dos imágenes tienen el mismo tamaño para no tener inconveniente al momento de superponerlas.

Figura 15

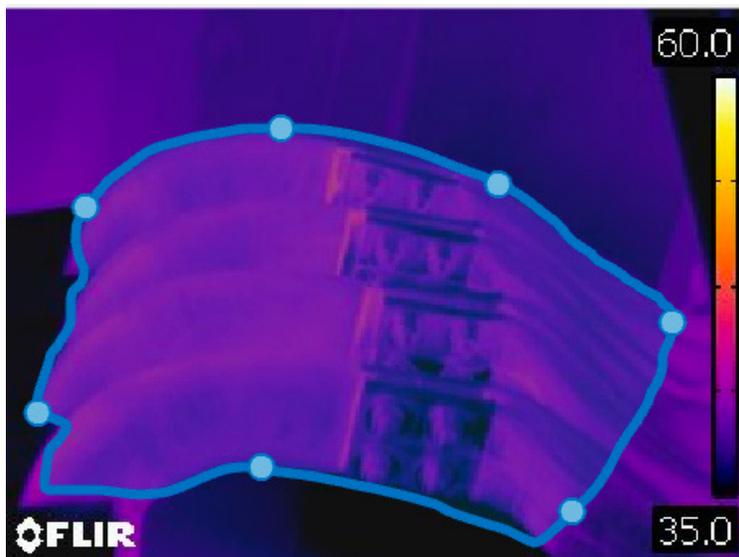
Imágenes leídas mediante el explorador de archivos



Nota: Fuente: Autor

Selección de ROI en imagen IR. La región de interés ROI para nuestro análisis es el conjunto de las barras a la salida del generador, para lo cual seleccionamos de forma manual con la ayuda del comando *drawfreehand*.

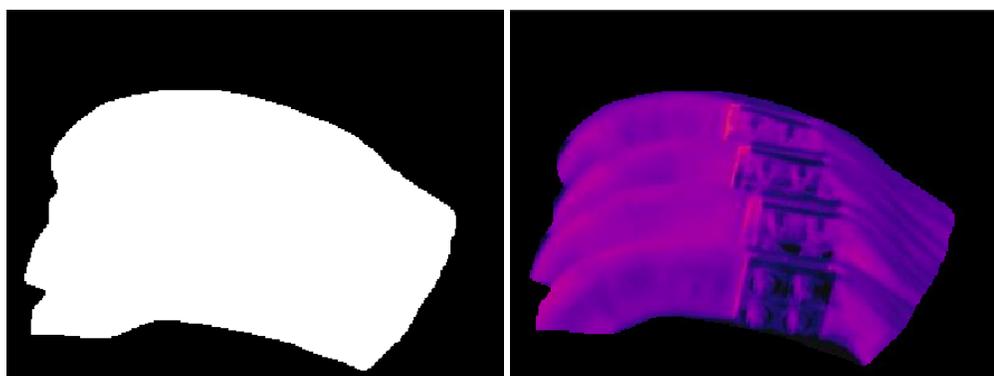
Figura 16
Selección manual del ROI



Nota: Fuente: Autor

Al mismo tiempo que seleccionamos manualmente la ROI se genera automáticamente una máscara a blanco y negro con valores lógicos 1 y 0, la cual nos servirá en una primera etapa para procesar la imagen en la región de nuestro interés, para lo cual multiplicamos la imagen IR con la máscara.

Figura 17
Aplicación de la máscara a imagen IR



(a) *Máscara de la ROI*

(b) *Resultado de la multiplicación máscara - IR*

Nota: Fuente: Autor

Generación de matriz de temperaturas. Hasta el momento se a trabajado con las imágenes IR, máscara y real teniendo como información únicamente la intensidad del color, debido a esta razón es

necesario insertar una matriz del tamaño 320x240 que contenga el valor de la temperatura en cada píxel.

La matriz de temperatura se generó mediante el procesamiento de la barra de colores y valores de temperatura que da como información la imagen IR, este procedimiento es muy importante porque a partir de estos valores podemos lograr un análisis y cuantificación de las temperaturas.

Teniendo la matriz de temperaturas procedemos a multiplicar por la máscara de blanco y negro, para obtener un arreglo con los valores de temperatura en cada píxel dentro de la ROI, para visualizar la temperatura de un píxel se posiciona con el cursor, se emplea el comando *impixelinfo*.

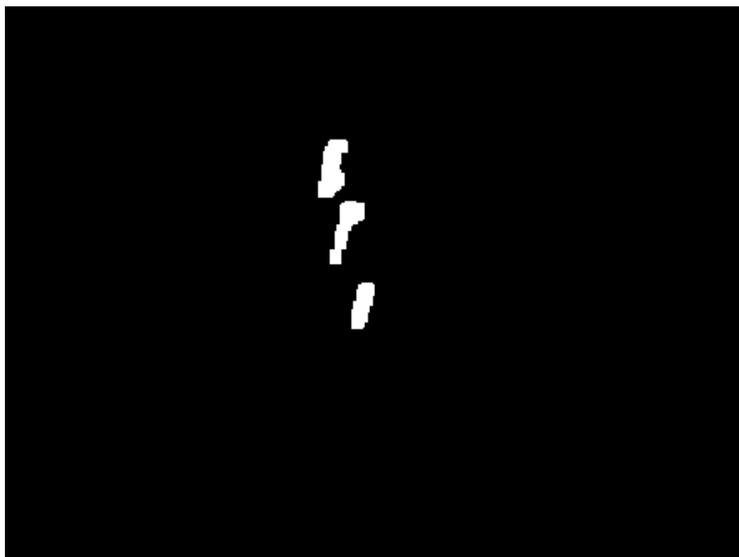
Detección de las zonas con la mayor temperatura. Seguidamente se separa las zonas con mayor temperatura de la ROI siguiendo el siguiente método

- Se aplica un filtro espacial para eliminar el ruido y suavizar la imagen.
- Se binariza la imagen convirtiendo los píxeles que están bajo el umbral en ceros y los píxeles que están sobre el umbral en unos, el valor del umbral se obtiene del píxel con el valor de temperatura más alto.
- Además se utilizó una operación morfológica del tipo *Strel*, que ayuda a suavizar los contornos de las áreas encontradas, los bordes se detectan por ser puntos en los que los valores de píxeles adyacentes de la imagen cambian de forma significativa
- Adicionalmente se utilizó el comando *imfill*, el cual elimina todas las zonas que no son de interés.

Obteniendo como resultado la máscara que contiene las zonas con mayor temperatura.

Figura 18

Máscara de las zonas con mayor temperatura

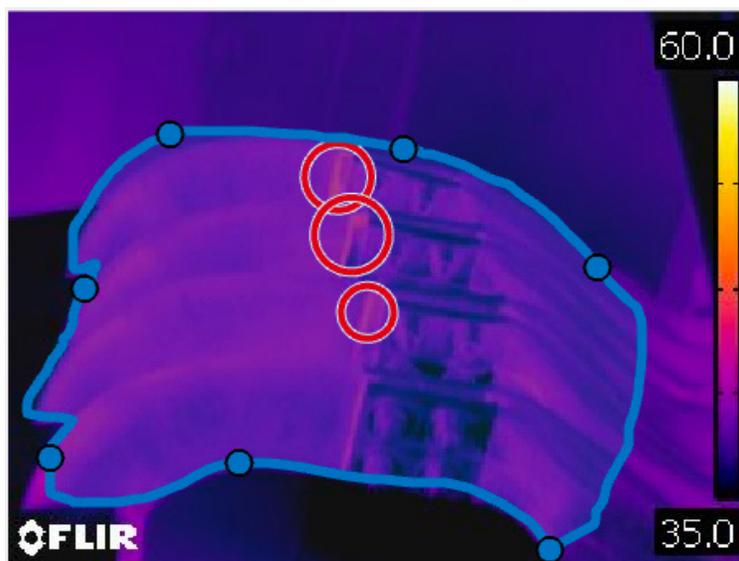


Nota: Fuente: Autor

Visualización de resultados. Con la ayuda de los comandos *bwlabel* y *regionprops* se obtiene información de las zonas con mayor temperatura, para etiquetar y señalar en la imagen IR original.

Figura 19

Etiquetado de las zonas con mayor temperatura



Nota: Fuente: Autor

Finalizado este proceso, se obtuvo la temperatura más alta y el mensaje del tipo de sobrecalentamiento, permitiendo al operario tomar una decisión para el mantenimiento.

Figura 20

Visualización de los resultados



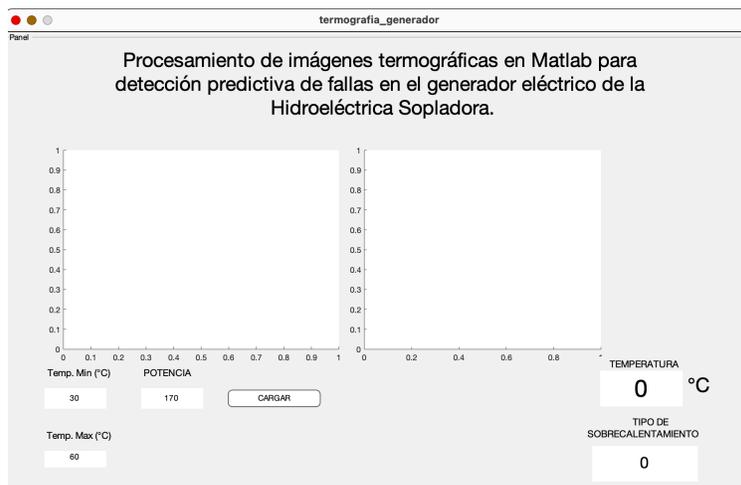
Nota: Fuente: Autor

-
-

Explicación del aporte.

Para utilizar la aplicación de Procesamiento de imágenes termográficas en Matlab para detección predictiva de fallas en el generador eléctrico de la Hidroeléctrica Sopladora, se debe seguir las siguientes instrucciones.

Abrir la aplicación haciendo click en el icono.

Figura 21*Pantalla principal de la aplicación*

Nota: Fuente: Autor

Configuramos en la pantalla principal los valores de temperatura mínima y temperatura máxima de la barra de temperaturas de la imagen IR, se recomienda siempre tomar las imágenes en un rango de 30°C a 60° que es el rango de probabilidad de la temperatura a medir.

En el cuadro de *Potencia* escribimos el valor de la potencia de generación al momento de capturar las imágenes, se recomienda realizar la toma de imágenes a la potencia máxima del generador que es 170MW, este valor está cargado por defecto.

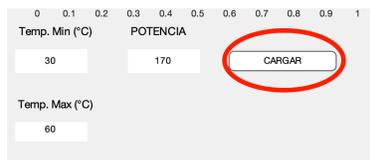
Figura 22*Configuración de la temperatura máxima, mínima y potencia de generación.*

Nota: Fuente: Autor

Pulsamos sobre el botón *CARGAR* inmediatamente emerge una ventana para seleccionar el archivo que contiene la imagen IR a ser procesada, inmediatamente nos pedirá seleccionar la imagen real.

Figura 23

Botón para cargar las imágenes.



Nota: Fuente: Autor

Figura 24

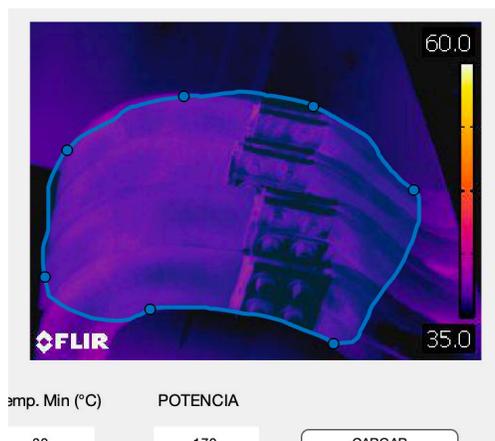
Imágenes IR y real a ser procesadas.



Nota: Fuente: Autor

En este paso con la ayuda del mouse seleccionamos el contorno de nuestra región de interés, haciendo click y manteniendo presionado el botón del mouse seguimos el contorno de las barras, que es el interés de este análisis

Figura 25
Selección de la ROI



Nota: Fuente: Autor

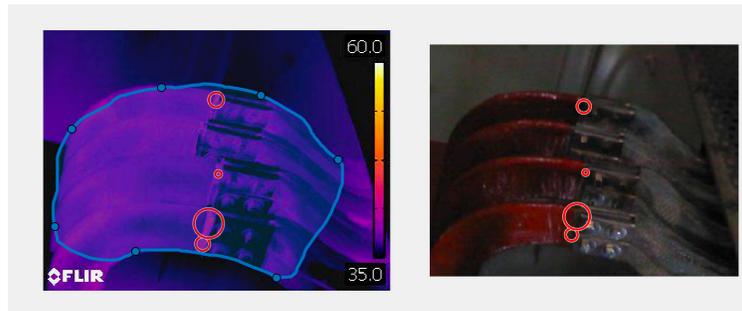
Automáticamente la aplicación inicia con el procesamiento de la imagen, dando como resultado la temperatura máxima encontrada, analiza si el sobrecalentamiento es normal, moderado o severo, esta información es muy valiosa ya que de esto depende si amerita un mantenimiento próximo.

Figura 26
Selección de la ROI



Nota: Fuente: Autor

La aplicación luego de realizar el procesamiento de la imagen tiene el alcance de señalar con circulo rojo en la imagen IR y real las zonas donde las temperaturas son altas, dando la posibilidad que el técnico sepa puntualmente en que parte de las barras tiene dicha temperatura.

Figura 27*Visualización de las zonas con mayor temperatura*

Nota: Fuente: Autor

Estrategias y/o técnicas.

Se decidió desarrollar la aplicación en el software MATLAB porque es una plataforma de programación y cálculo numérico para analizar datos, también permite desarrollar algoritmos y crear modelos en muchas áreas científicas.

Las técnicas que se aplico con la ayuda de este software a través de las herramientas matemáticas son: conversión de imágenes, filtros adaptativos, binarización, segmentación, operaciones morfológicas, señalización; siendo todos estos pasos necesarios para obtener como resultado un resultado confiable.

Validación de la propuesta.

Para la elección de especialistas se ha considerado un perfil acorde a los siguientes criterios: formación académica relacionada con el tema de investigación, experiencia académica y/o laboral orientada a la gestión administrativa y motivación para participar. La siguiente tabla presenta información detallada de los actores seleccionados para la validación del modelo.

Tabla 3*Descripción de perfil de validadores*

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación	Cargo
Oswaldo Alejandro Zhañay Soliz	20	Magíster en Administración de Empresas	Supervisor de Mantenimiento Electrónico CELEC EP.
Roberto Carlos Guerrero Ochoa	8	Magíster en Gestión de Proyectos	Supervisor de Mantenimiento Electrónico CELEC EP.
Martín Fernando Cárdenas Vera	8	Magíster en Electrónica y Automatización	Supervisor de Mantenimiento Electrónico CELEC EP.

Los objetivos perseguidos mediante la validación son los siguientes:

- Validar la metodología de trabajo aplicada en el desarrollo de la investigación.
- Aprobar los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas.
- Redefinir (si es necesario) el enfoque de los elementos desarrollados en la propuesta, considerando la experiencia de los especialistas.

- Constatar las posibilidades potenciales de aplicación del modelo de gestión propuesto.

Tabla 4*Criterios de evaluación*

Criterios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el modelo de gestión y su representatividad en la generación de valor público.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del modelo considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías propias de la gestión por resultados de manera sistémica y articulada.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son conducentes, concernientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

Tabla 5

Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Oswaldo Alejandro Zhañay Soliz

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica					✓
Factibilidad				✓	
Pertinencia					✓

Tabla 6

Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Roberto Carlos Guerrero Ochoa

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica				✓	
Factibilidad					✓
Pertinencia					✓

Tabla 7

Escala de evaluación. Elaborada por: Magíster Martín Fernando Cárdenas Vera.

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica					✓
Factibilidad					✓
Pertinencia					✓

Matriz de articulación de la propuesta.

En la presente matriz se sintetiza la articulación del producto realizado con los sustentos teóricos, metodológicos, estratégicos-técnicos y tecnológicos empleados.

Tabla 8

Matriz de articulación

Ejes o partes principales del proyecto		Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon.
1	Definición de las imágenes intrarojas, así como las variables de entrada a considerar y variables de salida a visualizar.	1.1 Tablas comparativas de las imágenes. 1.2 .Definición de las variables. 1.3 Matemáticas aplicadas. 1.4 Procesamiento de imágenes.	Termografía.	Revisión bibliográfica de procesamiento de imágenes y termografía. Revisión de páginas web de plataformas para desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada.
2	Diseño de sistemas de procesamiento de imágenes, aplicaciones y programación.	2.1 Definición de la imagen IR. 2.2 Definición de tipo de filtros. 2.3 Tabla de definición de la región de interés. 2.4 Tabla de definición de información asociada la región de interés.	Procesamiento digital de imágenes.	Revisión bibliográfica de aplicaciones de procesamiento digital de señales.
3	Desarrollo y pruebas de funcionamiento de aplicación.	3.1 Programación de filtros de imágenes. 3.2 Programación de la región de interés. 3.3 Comparación de la región de interés con valores temperatura. 3.4 Compilación y descarga de aplicación.	Termografía. Procesamiento digital de imágenes.	Revisión de la ayuda en línea del software. del software. Pruebas de funcionamiento.

Análisis de resultados. Presentación y discusión.

Se realiza la prueba de una misma captura de imagen con diferentes características.

Imagen de la Barra A de la Unidad de generación 1.

Configuración 1.

Rango de temperatura de captura: 30 a 60°.

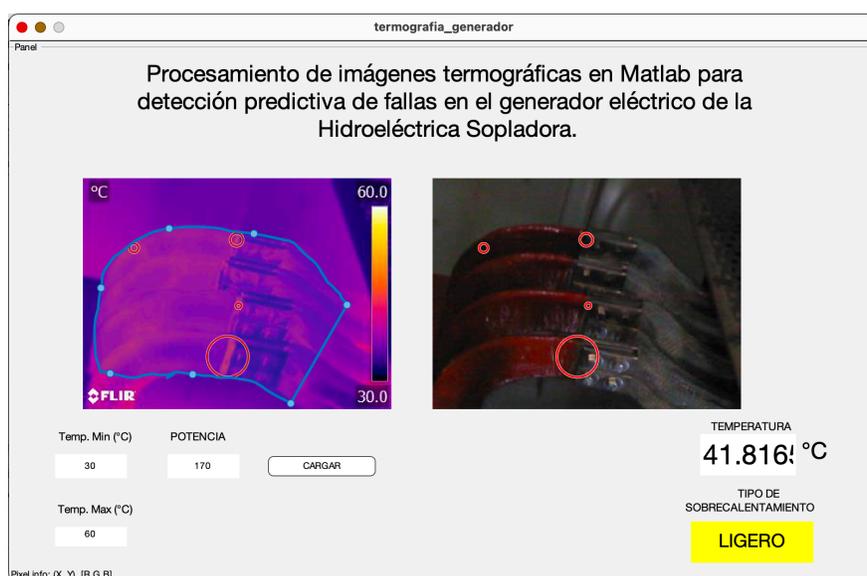
Paleta de colores: Iron.

Potencia: 170MW

Distancia del objetivo: 2.5 m.

Figura 28

Resultado con la configuración 1



Nota: Fuente: Autor

Configuración 2

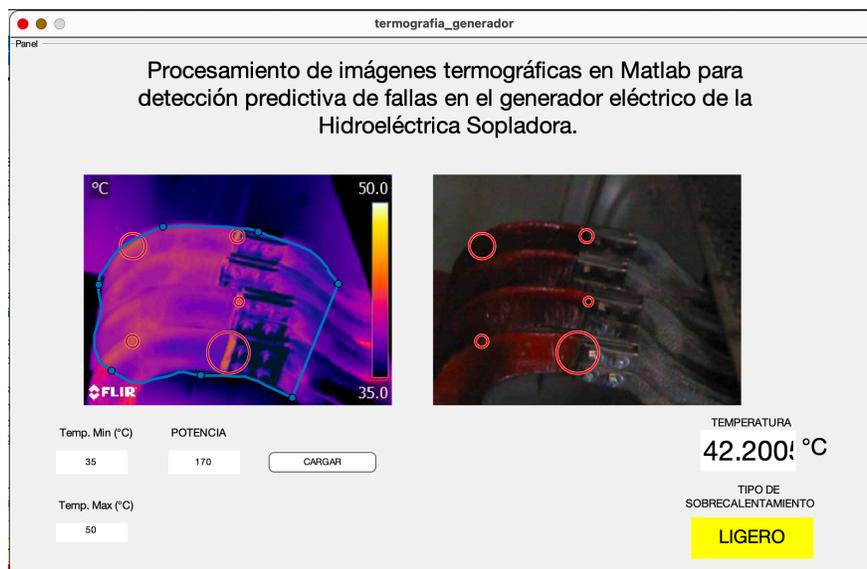
Rango de temperatura de captura: 35 a 50°C.

Paleta de colores: Iron.

Potencia: 170MW

Distancia del objetivo: 2.5 m.

Figura 29
Configuración 2



Nota: Fuente: Autor

Configuración 3.

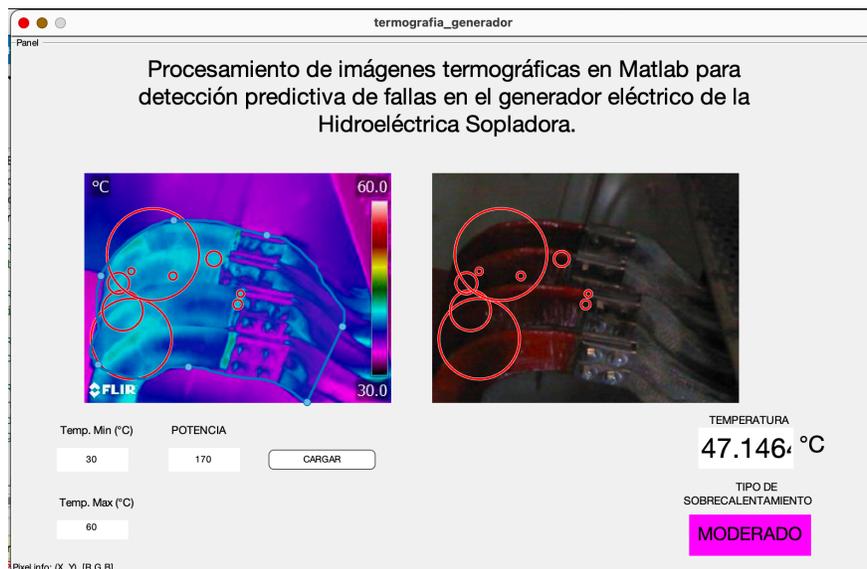
Rango de temperatura de captura: 30 a 60°.

Paleta de colores: Rainbow HC.

Potencia: 170MW

Distancia del objetivo: 2.5 m.

Figura 30
Configuración 3



Nota: Fuente: Autor

Como se puede observar los resultados de cada imagen difieren entre cada uno de ellos, esto es debido a que cambia la tonalidad de la imagen y se produce un alto gradiente en los bordes de la imagen.

Se realizó el análisis con 10 imágenes obteniendo los mejores resultados de confiabilidad, cuando la cámara está configurada en un rango de temperatura de 30 a 60° y con una paleta de colores tipo Iron.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto , se logró cumplir con el objetivo principal planteado, que es la detección predictiva de falla utilizando procesamiento digital de señales con el software MATLAB.

La gran ventaja de la termografía es que no se necesita parar la producción y no necesita contacto es decir se lo puede realizar en un rango de zona segura.

Se requiere de mucha experiencia para elegir las constantes que se adapten a la necesidad y poder aprovechar de manera óptima las funciones de programación.

RECOMENDACIONES

Para proyectos futuros y como una mejora se recomienda crear una base de datos de las imágenes IR y agrupar según sea su criticidad del sistema, para desarrollar nuevos proyectos aplicando inteligencia artificial.

Teniendo este proyecto como base se puede generar muchas mejoras ampliando el campo de aplicación a otros sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

ASTME, I. (2009). ASTME E1316. <https://www.astm.org/e1316-22a.html>

Balageas, D. L. (2007). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires*.

Bautista Tonato, J. N., & Soñis Mora, V. S. (2014). *Desarrollo del mantenimiento predictivo mediante la técnica de la termografía para evaluar el correcto funcionamiento de la subestación oriente y alimentador totoras de la empresa eléctrica Ambato SA* (B.S. thesis).

Cuevas, E., Zaldivar, D., & Pérez, M. (2016). *Procesamiento digital de imágenes con MATLAB & Simulink*. Ra-Ma.

Ferrada Sepúlveda, L. A. (2012). Diseño de rodete de turbina hidráulica tipo Pelton para microgeneración.

Fierro, E. P., Montenegro, D. B., & Velasco, M. P. (2015). Análisis de termografías infrarrojas dinámicas mediante técnicas de procesamiento de imágenes.(Analysis of Dynamic Infrared Thermographies through the Application of Image Processing Techniques.) *Ciencia en Desarrollo*, 6(1), 127-132.

FLIR SYSTEM. (2018). RELACIÓN DE TAMAÑO DE PUNTO. https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/17-1465/17-1465_ES.pdf

Flores Larsen, S. E., & Hongn, M. E. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas.

Fluke Process. (2023). What is Emissivity? <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity%7B%5C%%7D3F>

Fonseca-Junior, M., Holanda-Bezerra, U., Cabral-Leite, J., & Reyes-Carvajal, T. L. (2015). Maintenance management program through the implementation of predictive tools and TPM as a contribution to improving energy efficiency in power plants. *Dyna*, 82(194), 139-149.

Guerrero, S. R., Loaiza, H., & Girón, A. D. R. (2014). Segmentación automática de imágenes térmicas de la mama como apoyo a la detección de cáncer. *Sistemas y Telemática*, 12(30), 25-34.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGRAW-HILL.

Juan, R. Q., & Mario, C. M. (2011). Redes neuronales artificiales para el procesamiento de imágenes, una revisión de la última década. *RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, 9(1), 7-16.

- Ministerio de energías y minas. (2022). CENTRAL HIDROELÉCTRICA “SOPLADORA”. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/central-hidroelectrica-sopladora/>
- Neita Duarte, L. Y., Peña Rodríguez, E. O., et al. (2014). Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo.
- Niño Juan. (2020). ¿Qué es la termografía Infrarroja? <https://konideas.com/que-es-la-termografia-infrarroja/>
- Normalización Española. (2018). Norma Española UNE-EN 13306. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060338>
- Observatorio de electricidad. (2020). CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOPLADORA. <https://observatorioelc.ister.edu.ec/central-hidroelectrica-sopladora/>
- Olarte, W., Botero, M., & Zabaleta, B. C. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et technica*, 2(48), 253-256.
- Soto, S., & Roger, N. (2006). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo-DOE RUN PERÚ.
- Soto Baltodano, E. F. (2017). *Propuesta de una guía técnica para la aplicación de la Termografía Infrarroja en el mantenimiento predictivo de los principales equipos industriales presentes en las industrias nicaragüenses, en el período comprendido de Agosto a Diciembre del 2017* (B.S. thesis).
- TESTO S.A. (2018). Tabla de emisividades. <https://static-int.testo.com/media/bd/b7/179e2db5dca8/Emissivity-table-ES.pdf>
- TESTO S.A. (2023). Campo de visión, objeto visible más pequeño y zona de medición. https://www.testo.com/es-ES/Campo+de+visi%C3%B3n%7B%5C%%7D2C+objeto+visible+m%C3%A1s+peque%C3%B1o+y+zona+de+medici%C3%B3n/services_knowledgebase_thermography_measurement_spot
- Torres, A. D. (1996). Procesamiento digital de imágenes. *Perfiles Educativos*, (72).

ANEXOS

ANEXO 1: LINEAS DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN.

Figura 31

Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 1)

```

% --- Executes on button press in p1.
function p1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to p1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

filter={'*.jpg'; '*.png'; '*.jpeg'}; % tipos de archivos para abrir
file_image=uigetfile(filter); %comando para abrir explorador y buscar imagen
I=imread(file_image); %lee la imagen
Igray=rgb2gray(I);
Idouble=im2double(Igray);

filter={'*.jpg'; '*.png'; '*.jpeg'}; % tipos de archivos para abrir
file_image=uigetfile(filter); %comando para abrir explorador y buscar imagen
R=imread(file_image); %lee la imagen

axes(handles.axes6); %activo para dibujar en pantalla axes2
imshow(R)
impixelinfo

%%%%%SE GENERA LA MÁSCARA CON EL ROI
axes(handles.axes1); %activo para dibujar en pantalla axes1
imshow(I) %Visualiza imagen original
%J,rect]=imcrop(I); %comando para cortar y guardo en J los valores y en rect las coordenadas
roi = drawfreehand(); %Selección manual de la ROI
mask = roi.createMask(); %Crea mascara de la ROI (imagen blanco y negro)

%axes(handles.axes2); %activo para dibujar en pantalla axes2
maskl=bwlabel(mask); %convierto la mascara a un valor logico
Id=im2double(I); %convierto imagen original a valores dobles
Ir=Id .* maskl; % Operación and Roi de imagen original
Iroi=im2uint8(Ir); %convierte de valor logico a RGB
% imshow(Iroi)
% impixelinfo %visualiza info de los pixeles

```

Nota: Fuente: Autor

Figura 32*Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 2)*

```

% axes(handles.axes3); %activo para dibujar en pantalla axes3
Iroj=Iroi(:,1); %obtego la capa roja de la imagen
Ibw=im2bw(Iroj,0.415); %convierte de grises a blanco y negro (binaria)
S=strel('square',12); % creo un strel square de 12x12
Ibwm=imdilate(Ibw,S); % operación morfológica de la imagen blanco y negro
Ibwr=imfill(Ibwm, 'holes'); %relleno los agujeros
% imshow(Ibwm)
% impixelinfo

% axes(handles.axes4); %activo para dibujar en pantalla axes4
tmin=str2double(get(handles.Tmin,'String')); %returns contents of Tmax as a double
tmax=str2double(get(handles.Tmax,'String')); %returns contents of Tmax as a double
paso=1/255; %calculo del paso en 255 posiciones de 0 a 1
tpaso=(tmax-tmin)/255; %calculo el paso del rango de temperatura
set(handles.ed_prueba,'String',paso) %escribo el paso en pantalla
Itemp=(Idouble/paso)*tpaso+tmin; %se genera la matriz de temperatura
Itemp=Itemp .* maskI; %se aplica mascara de ROI a matriz de temperatura (MATRIZ TEMPERATURA)
% imshow(Itemp)
% impixelinfo
% imwrite(Itemp,'temperatura.jpg')

% axes(handles.axes5); %activo para dibujar en pantalla axes3
h=fspecial('average');
If=imfilter(Ir,h,'replicate');
%Ifrgb=rgb2gray(Iroi);
%Ifg=rgb2gray(Ifrgb);
tmaxima=max(max(Itemp));
%set(handles.ed_temp,'String',tmaxima);
U=((tmaxima-2)-tmin)/(tmax-tmin);
Ifbw=im2bw(If,U);
st=strel('square',5);
Imbw=imdilate(Ifbw,st);
Ifill=imfill(Imbw,'holes');
% imshow(Ifill) %mascara de las zonas de calor
% impixelinfo

```

Nota: Fuente: Autor

Figura 33*Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 3)*

```

[L N]=bwlabel(Ifill);
prop=regionprops(L,'all');

axes(handles.axes6); %activo para dibujar en pantalla axes1

for n=1:N
    centro=prop(n).Centroid;
    diametro=prop(n).MajorAxisLength;
    viscircles(centro, diametro/2,'Color','r');
end

axes(handles.axes1); %activo para dibujar en pantalla axes1

for n=1:N
    centro=prop(n).Centroid;
    diametro=prop(n).MajorAxisLength;
    viscircles(centro, diametro/2,'Color','r');
end

axes(handles.axes6); %activo para dibujar en pantalla axes4
%%%Se aplica filtro a imagen original

for n=1:N
    M=prop(n).PixelList;
    [r S]=size(M);
    p=0;
    for i=1:r
        col=M(i,1);
        fil=M(i,2);
        p=Itemp(fil,col)+p;
    end
    Tmean(1,n)=p/r;
    Tmaxt=max(max(Tmean));

```

Nota: Fuente: Autor

Figura 34

Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 4)

```
t0=35;
t80=35.5;
t90=36.62;
t100=37.5;
t110=37.72;
t120=38.02;
t130=38.8;
t140=40.4;
t150=41.76;
t160=43.3;

pot=str2double(get(handles.potencia,'String'));
if (pot>=0)&&(pot<80)
    tempgen=t0;
elseif (pot>=80)&&(pot<90)
    tempgen=t80;
elseif (pot>=90)&&(pot<100)
    tempgen=t90;
elseif (pot>=100)&&(pot<110)
    tempgen=t100;
elseif (pot>=110)&&(pot<120)
    tempgen=t110;
elseif (pot>=120)&&(pot<130)
    tempgen=t120;
elseif (pot>=130)&&(pot<140)
    tempgen=t130;
elseif (pot>=140)&&(pot<150)
    tempgen=t140;
elseif (pot>=150)&&(pot<160)
    tempgen=t150;
elseif (pot>=160)&&(pot<=174)
    tempgen=t160;
end
```

Nota: Fuente: Autor

Figura 35*Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 5)*

```

A=tempgen*1.03;
B=tempgen*1.15;
C=tempgen*1.3;
|
|
if (tmaxima<=tempgen)
    set(handles.ed_prueba,'String','NORMAL','BackgroundColor','g');
elseif (tmaxima>tempgen)&&(tmaxima<A)
    set(handles.ed_prueba,'String','LIGERO','BackgroundColor','y');
elseif (tmaxima>A)&&(tmaxima<B)
    set(handles.ed_prueba,'String','MODERADO','BackgroundColor','M');
elseif (tmaxima>=B)
    set(handles.ed_prueba,'String','SEVERO','BackgroundColor','r');
end

function Tmin_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Tmin (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Tmin as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Tmin as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Tmin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Tmin (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

Nota: Fuente: Autor

Figura 36

Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 6)

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Tmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Tmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function potencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to potencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of potencia as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of potencia as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function potencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to potencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

Nota: Fuente: Autor

Figura 37*Líneas de programación de la aplicación (Pantalla 7)*

```

function ed_prueba_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ed_prueba (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ed_prueba as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ed_prueba as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ed_prueba_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ed_prueba (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ed_temp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ed_temp (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ed_temp as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ed_temp as a double

```

Nota: Fuente: Autor

ANEXO 2: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA.

Tabla 9

Evaluación Magíster Oswaldo Alejandro Zhañay Soliz

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica					✓
Factibilidad				✓	
Pertinencia					✓

OSWALDO
ALEJANDRO
ZHANAY SOLIZ

Firmado digitalmente por OSWALDO
ALEJANDRO ZHANAY SOLIZ
DN: cn=OSWALDO ALEJANDRO
ZHANAY SOLIZ, c=EC, o=SECURITY
DATA S.A. 2, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION,
email=waldoz@gmail.com
Fecha: 2023.03.20 08:30:20 -05'00'

Firma

Tabla 10

Evaluación Magíster Roberto Carlos Guerrero Ochoa

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica				✓	
Factibilidad					✓
Pertinencia					✓

ROBERTO CARLOS GUERRERO OCHOA

Firmado digitalmente por
ROBERTO CARLOS GUERRERO
OCHOA
Fecha: 2023.03.20 08:27:27
-05'00'

Firma

Tabla 11*Evaluación Magíster Martín Fernando Cárdenas Vera.*

CRITERIOS	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Des-acuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Des-acuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					✓
Aplicabilidad					✓
Conceptualización					✓
Actualidad					✓
Calidad Técnica					✓
Factibilidad					✓
Pertinencia					✓



Firmado electrónicamente por:
**MARTIN FERNANDO
 CARDENAS VERA**

Firma

ANEXO 3: INFORME DE ORIGINALIDAD (TURNITIN).**Figura 38***Informe de originalidad hoja 1*

FREDDY EDUARDO CALLE JARA

por Angelo Geovanny Mendoza Varela

Fecha de entrega: 18-mar-2023 07:41a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2039988747

Nombre del archivo:

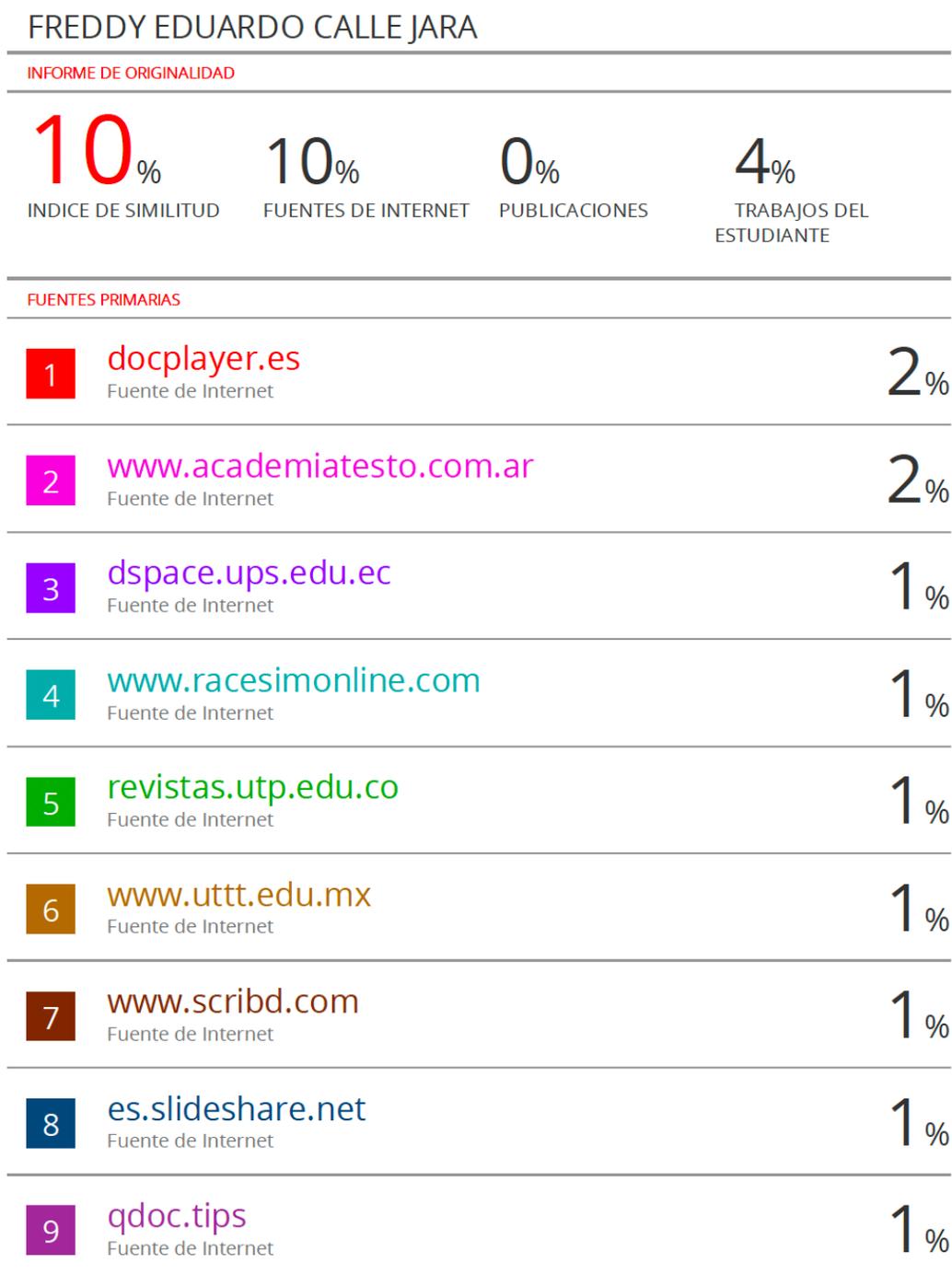
1729_Angelo_Geovanny_Mendoza_Varela_FREDDY_EDUARDO_CALLE_JARA_46071_916396347.pdf (96.83K)

Total de palabras: 4865

Total de caracteres: 25980

Nota: Fuente: Turnitin

Figura 39
Informe de originalidad hoja 2



Nota: Fuente: Turnitin

Figura 40*Informe de originalidad hoja 3*

10 **sistemamid.com** Fuente de Internet **1%**

**Angelo
Geovanny
Mendoza
Varela**

Firmado digitalmente por Angelo
Geovanny Mendoza Varela
DN: cn=Angelo Geovanny
Mendoza Varela, gn=Angelo
Geovanny Mendoza Varela
o=Ecuador INEC, ou=Universidad
Tecnologica Israel ou=Comisión
TIC / DRT
e=amendoza@uisrael.edu.ec
Motivo: Estoy aprobando este
documento
Ubicación:
Fecha: 2023-03-18 08:18:05:00

Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía Activo

Nota: Fuente: Turnitin

ANEXO 4: DE APROBACIÓN DEL TUTOR.

Figura 41

Acta de aprobación del tutor

APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, **René Ernesto Cortijo Leyva** con C.I: **1719010108** en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: **PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS EN MATLAB PARA DETECCIÓN PREDICTIVA DE FALLAS EN EL GENERADOR ELÉCTRICO DE LA HIDROELÉCTRICA SOPLADORA.**

Elaborado por: **Freddy Eduardo Calle Jara**, de C.I: **103403234**, estudiante de la Maestría: **ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**, resolución: **RPC-SO-09-No.265-2021**, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 15 de marzo del 2023

RENE
ERNESTO
CORTIJO
LEYVA

Firmado digitalmente por
RENE ERNESTO
CORTIJO LEYVA
Fecha:
2023.03.15
18:42:09 -05'00'

Firma