

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA
INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR
IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN ARTIFICIAL
EN LA CIUDAD DE JAÉN, 2024.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA.**

Autor(es): Bach. Gary Dailer Monja Tavara

Bach. Yhanmarco Rivera Saavedra

Asesor: Mg. Ing. Lenin Franchescoletth Núñez Pintado

Línea de investigación: Automatización y Control Industrial

JAÉN – PERÚ

2025

Gary Dailer Monja Tavera Yhanmarco Rivera Saave...

IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3425559293

104 páginas

Fecha de entrega

26 nov 2025, 2:01 p.m. GMT-5

13.425 palabras

80.866 caracteres

Fecha de descarga

26 nov 2025, 2:05 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

5_INFORME_FINAL-PROYECTO-DE-TESIS_-_GARY_DAILER_MONJA_TAVARA.pdf

Tamaño del archivo

7.4 MB



Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 4% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día jueves 11 de diciembre del 2025, siendo las 17:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Secretario : Dr. Walter Linder Cabrera Torres
Vocal : Mg. José Andrés Fernández Mera

Para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- () Trabajo de Investigación
(X) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN ARTIFICIAL EN LA CIUDAD DE JAÉN, 2024"**

Presentado por los bachilleres: **Gary Dailer Monja Tavera y Yhanmarco Rivera Saavedra**, de la Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

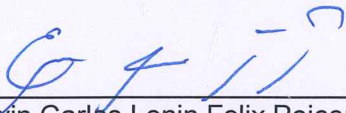
Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

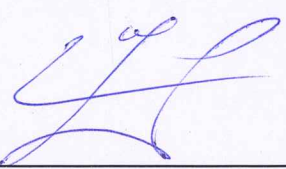
(X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (16) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 18:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando con la suscripción de la presente.


Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Presidente Jurado Evaluador


Dr. Walter Linder Cabrera Torres
Secretario Jurado Evaluador


Mg. José Andrés Fernández Mera
Vocal Jurado Evaluador

“Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, Gary Dailer Monja Tavera, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 77130699.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN ARTIFICIAL EN LA CIUDAD DE JAÉN, 2024”. Asesorado por Mg. Ing. Lenin Franchescoeth Núñez Pintado. El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 14 de enero del 2026.



Gary Dailer Monja Tavera

“Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, Yhanmarco Rivera Saavedra, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 74555102.

Declaro bajo juramento que:

7. Soy Autor del trabajo titulado:

“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN ARTIFICIAL EN LA CIUDAD DE JAÉN, 2024”. Asesorado por Mg. Ing. Lenin Franchescoeth Núñez Pintado. El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

8. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
9. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
10. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
11. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
12. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 14 de enero del 2026.



Yhanmarco Rivera Saavedra

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I.- INTRODUCCIÓN	9
1.1. Antecedentes de la investigación.	10
1.1.1. A nivel internacional.....	10
1.1.2. A nivel nacional.	12
1.2. Planteamiento del Problema.....	15
Formulación del Problema.....	17
1.3. Justificación.....	18
1.3.1. Justificación técnica:	18
1.3.2. Justificación Económica:.....	18
1.3.3. Justificación social:	18
1.3.4. Justificación práctica:	18
1.3.5. Justificación teórica:.....	19
1.3.6. Justificación metodológica:.....	19
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo general	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
II. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1. Objeto de estudio:	20
Ubicación geográfica del área de estudio	20
Métodos	21
Población:	22
Muestra:	22
Muestreo:	22

Procedimiento:.....	22
III. RESULTADOS	45
3.1.- Desarrollar el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial	45
3.2.- Poner en funcionamiento el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.	48
3.2.1.- Validación de funcionamiento del sistema.	48
EJECUCIÓN DE PRUEBAS.....	53
Trafo N.º 1	55
Trafo N.º 2	57
Trafo N.º 3.....	59
Trafo N.º 4.....	61
Trafo N.º 5.....	63
3.3.- Realizar una evaluación técnica y económica del sistema implementado.	64
IV.- DISCUSIÓN	69
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
V.I.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
AGRADECIMIENTO	78
DEDICATORIA.....	79
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sensor de imagen térmica infrarroja (IR).	23
Tabla 2 Módulo de desarrollo ESP32-CAM.	24
Tabla 3 El ESP32-WROOM-32.	26
Tabla 4 Dron DJI Mini 4k Fly More.	31
Tabla 5 Batería Power Bank.	33
Tabla 6 Características de la cámara térmica.	46
Tabla 7 Prueba de validación de la cámara térmica	49
Tabla 8 Costos de componentes necesarios para este proyecto.....	67
Tabla 9 Datos del sistema implementado.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas.	21
Figura 2 Sensor MLX 90640 – BAA de imagen térmica infrarroja y temperatura.....	24
Figura 3 Módulo de desarrollo ESP32-CAM.....	25
Figura 4 ESP32-WROOM-32 (38 pines).	27
Figura 5 ESP32-CAM.	28
Figura 6 Visualización de la cámara térmica en el Python.....	29
Figura 7 Cables dupont hembra - Macho.	30
Figura 8 Interruptor Mini Switch de 2 pines.	31
Figura 9 Dron DJI Mini 4K Fly More.	33
Figura 10 Batería Power Bank 10,000 mAh.....	34
Figura 11 Diseño del Circuito electrónico.....	35
Figura 12 Montaje de la cámara térmica.	36
Figura 13 Impresión de la estructura en la impresora 3D.....	37
Figura 14 Ensamble de la cámara térmica.....	38
Figura 15 Código de programación en el programa Arduino IDE, para uno de los módulos del ESP32-CAM que está en modo AP.	39
Figura 16 Código de programación en el Arduino IDE, para la programación en el ESP32-CAM, que hace stream de video.....	40
Figura 17 Código en el otro modulo del ESP32-WROOM-32 que envía datos térmicos desde el sensor MLX90640-BAA, programado en el Arduino IDE.	41
Figura 18 El programa Python.	42
Figura 19 Inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén.	44

Figura 20 Fotografía de un transformador.....	44
Figura 21 El sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.....	47
Figura 22 Fotografía capturada de un transformador mediante la visión artificial.	47
Figura 23 Lecturas del motor de la motocicleta	50
Figura 24 Prueba con la cámara	51
Figura 25 Prueba con la cámara	51
Figura 26 Prueba con la cámara	52
Figura 27 Prueba con la cámara	52
Figura 28 Los cinco transformadores inspeccionados en la ciudad de Jaén.....	54
Figura 29 Inspección del transformador cerca del Mercado Amojú, en la ciudad de Jaén.	55
Figura 30 Fotografía capturada de un transformador mediante la visión artificial Transformador cerca del Mercado Amojú.....	56
Figura 31 Inspección del transformador en la calle Contisuyo en la ciudad de Jaén.	57
Figura 32 Transformador de la calle Contisuyo.	58
Figura 33 Inspección del transformador en la calle el sol, en la ciudad de Jaén.....	59
Figura 34 Transformador en la calle el sol.	60
Figura 35 Inspección aérea del transformador por imagen térmica con visión artificial, en la calle Paracas, Urb. Nueva Villa.	61
Figura 36 Transformador de la calle Paracas, Urb. Nueva Villa.....	62
Figura 37 Inspección aérea del transformador por imagen térmica con visión artificial, en la calle Chinchaysuyo.....	63
Figura 38 Transformador de la calle Chinchaysuyo.....	64

RESUMEN

En la ciudad de Jaén, la creciente demanda energética hace necesario mejorar la inspección de transformadores eléctricos, ya que los métodos Manuales presentan riesgos y limitaciones en seguridad, precisión y acceso. Por este motivo, la investigación tuvo como objetivo implementar un sistema para inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial para evaluar el estado operativo de los transformadores. El método utilizado fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo, nivel descriptivo y un diseño tecnológico, utilizando un dron como soporte para la cámara térmica y poder registrar y analizar las temperaturas. Para Validar la calibración del sistema se realizaron pruebas comparativas con dos multímetros, empleando como referencia el calentamiento del motor de una motocicleta. Como resultados en la inspección se obtuvo un registro de temperaturas de cinco transformadores, todos dentro del rango normal de operación según manuales técnicos. La evaluación técnica confirmó que el sistema mide temperaturas con precisión (mientras menor sea el tamaño del objeto a medir mayor será el error de lectura). En el aspecto económico, el proyecto mostro ser rentable al obtener un VAN DE S/. 14, 103.93 y una TIR del 99.86%.

Palabras clave: Visión artificial, imágenes térmicas, transformadores eléctricos, dron.

ABSTRACT

In the city of Jaén, the growing energy demand necessitates improved inspection of electrical transformers, as manual methods present risks and limitations in terms of safety, accuracy, and accessibility. Therefore, this research aimed to implement an aerial inspection system for transformers using thermal imaging with machine vision to assess their operational status. The method used was applied, with a quantitative approach, descriptive level, and technological design, utilizing a drone to support the thermal camera and record and analyze temperatures. To validate the system's calibration, comparative tests were performed with two multimeters, using the heating of a motorcycle engine as a reference. The inspection yielded temperature readings for five transformers, all within the normal operating range according to technical manuals. The technical evaluation confirmed that the system accurately measures temperatures (the smaller the object being measured, the greater the reading error). Economically, the project proved profitable, achieving a net present value (NPV) of S/. 14,103.93 and an internal rate of return (IRR) of 99.86%.

Keywords: Machine vision, thermal imaging, electrical transformers, drone.

I.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el avance de la tecnología de drones y su integración con sistemas de visión artificial ha transformado múltiples sectores, incluyendo la industria eléctrica. Estas herramientas permiten realizar inspecciones rápidas, seguras y precisas, optimizando los procesos de mantenimiento preventivo y reduciendo riesgos para el personal técnico. En la ciudad de Jaén, donde la demanda energética crece de forma constante, el mantenimiento de transformadores eléctricos en óptimas condiciones es esencial para garantizar la continuidad y calidad del servicio. Sin embargo, los métodos tradicionales de inspección manual presentan limitaciones en términos de seguridad, eficiencia y capacidad de acceso a equipos en operación.

Frente a esta problemática, la presente investigación desarrolla e implementará un sistema de inspección aérea de transformadores mediante imágenes térmicas con visión artificial, utilizando un dron comercial como plataforma de vuelo. El sistema integra un sensor térmico MLX90640-BAA conectado mediante protocolo I²C a un microcontrolador ESP32-WROOM-32, encargado de recibir y transmitir la matriz de temperaturas. Asimismo, incorpora un módulo ESP32-CAM para la transmisión en tiempo real de imágenes visuales, una batería portátil para la autonomía energética y un soporte estructural diseñado en SolidWorks para la integración de los componentes.

El procesamiento de las imágenes térmicas se realiza mediante una interfaz desarrollada en Python para PC, apoyada en algoritmos programados en Arduino IDE, lo que permite identificar variaciones de temperatura significativas en los transformadores inspeccionados. Esta propuesta busca mejorar la precisión y eficiencia de las inspecciones, reduciendo el tiempo de evaluación y evitando cortes innecesarios del suministro eléctrico.

1.1. Antecedentes de la investigación.

1.1.1. A nivel internacional.

Calle Cadme, A. C. (2022) en su trabajo de titulación para obtener el título de ingeniero eléctrico con “Detención de fallas en bajantes de transformadores de distribución, mediante el análisis DEEP LEARNING, en imágenes termográficas”, de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca – Ecuador. Su objetivo fue detectar anomalías en transformadores eléctricos en sistemas de distribución aplicando el análisis por DEEP LAERNING al analizar datos de imágenes térmicas. La metodología fue conseguir una cierta cantidad de imágenes térmicas de transformadores eléctricos, clasifico las imágenes de acuerdo al estado del transformador, luego procedió a entrenar el algoritmo con dichas imágenes con las redes neuronales convolucionales, para esta investigación se utilizó el software Matlab. Su recomendación fue usar el 80% de las imágenes para el entrenamiento y el otro 20% de las mismas para la validación. Concluyo que las redes neuronales convolucionales presentan mejor precisión que el modelo AlexNet, ya que en cuanto al entrenamiento con imágenes térmicas tuvo mayor rendimiento. A base de este proyecto nos ayudó evidenciar la eficacia del análisis térmica mediante la aplicación de la visión artificial en detección de fallas en transformadores, lo que oriento el uso de imágenes termográficas y procesamiento digital en el sistema propuesto.

Astudillo Cortez, V. P. (2022) en su trabajo de titulación para obtener el título de Magister en Electricidad con mención en Sistemas Eléctricos de Potencia, de la universidad técnica de Cotopaxi en Latacunga-Ecuador, titulada: “Identificación de fallas en los aisladores de una línea de transmisión mediante visión artificial”, tuvo como objetivo identificar las fallas de manera autónoma en los aisladores de porcelana de una red de transmisión de 13.8 kV haciendo uso de la visión artificial para determinar su estado. La metodología tomar imágenes para entrenar las redes

neuronales, para construir su base de datos utilizo 3000 imágenes de aisladores y clasificarlos según su estado, luego entrenar las redes neuronales, para la toma de imágenes uso un dron DJI mini 2 dado que sus características son las adecuadas para cumplir con el propósito deseado y evitar problemas al obtener las imágenes dado que en el lugar donde se realizó las pruebas está ubicado en la sierra de Ecuador. Como conclusión llego que las redes neuronales usadas para esta investigación tuvieron una exactitud de un 94%. A base de este proyecto nos ayudó a demostrar la eficacia del uso de drones y visión artificial para la detección de fallas en componentes eléctricos, lo que sirvió de referencia para la captura y análisis térmico aéreo en transformadores de distribución.

Núñez Ortega, J. E. (2021) en su tesis para obtener el grado de licenciado en ciencias de la universidad autónoma del Estado de Morelos titulada “Detección visual automática de cadena de aisladores dañadas en líneas de transmisión a través de imágenes aéreas”, su objetivo es realizar un sistema de visión por computadora que clasifique de manera precisa si una cadena de aisladores de una torre de transmisión eléctrica se encuentra dañada o no. La metodología consistió en crear una red neuronal convolucional siamesa usando pocas imágenes como base de datos, usó imágenes tanto de entornos reales como echas a partir de simuladores, las imágenes reales las descargó de portal web Flickr, las cantidad de imágenes utilizadas en su base de datos para el entrenamiento de su red neuronal fue de 138, todas ellas segmentadas (los aisladores en fondo negro), uso 69 imágenes de aisladores en buen estado y 69 de aisladores con fallas, tuvo como resultado que las imágenes de entrada se fijaron a tener un tamaño de 300X300 pixeles, además se utilizó el lenguaje Python y las librerías de Numpy y OpenCV. Se concluyo el modelamiento y ejecución de una red convolucional siamesa con los mejores parámetros posibles dada la escasa cantidad de imágenes de aisladores. A base de este proyecto nos ayudó a verificar el estado de los transformadores aplicando criterios de la visión artificial, lo que sirvió de guía para el procesamiento térmico de imágenes capturadas por el sistema propuesta.

Varas Alava, J. A. (2022), en su trabajo elaborado para la titulación para obtener el título de ingeniero eléctrico, en Ecuador, titulada “Diagnóstico Visual – Térmico en sistemas eléctricos de subtransmisión y distribución con el uso de drones para efectuar mantenimientos”, Su objetivo fue desarrollar un modelo de mantenimiento con metodologías para diferentes tipos de mantenimientos haciendo uso de drones en las líneas de subtransmisión y distribución. La metodología consistió en obtener información de los datos de los componentes de una red, después tuvo que realizar revisiones del sistema eléctrico, usando el dron de manera visual y térmica, ya que el dron seleccionado fue DJI Mavic enterprise advance, el cual cuenta con cámara visual y cámara térmica (Rango: -40° C a 550° C). inspecciono sistemas eléctricos de 13.8 kv y 69kv, los softwares usados fueron Flir Tools y DJI Thermal Analysis. Concluyo que la utilización de drones para un mantenimiento predictivo en líneas eléctricas ayuda a tener diagnósticos exactos del estado de estas, y el costo de inspeccionar estos sistemas se ve reducido en comparación al método convencional que involucra mayor personal. A base de este proyecto nos ayudó a demostrar la efectividad del uso de drones con cámaras térmicas en el mantenimiento predictivo de sistemas eléctricos, sirviendo de referencia para la inspección térmica aérea de transformadores con el sistema desarrollado.

1.1.2. A nivel nacional.

Rivas Sullcaccori, M. L. y Okawara Contreras, I. D. (2023) En su trabajo de titulación para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico de la universidad tecnológica del Perú de Lima – Perú. Titulada “Diseño e implementación de un dron vtol con estación de control para medición de variables atmosféricas”, su objetivo es diseñar e implementar un dron VTOL con la estación de control para realizar la medición de parámetros meteorológicos en diferentes niveles atmosféricos utilizando la norma VDI 2206. La metodología consiste en diseñar e implementar un circuito

meteorológico usando el microcontrolador STM32F103C8T6 se consigue la medición de datos meteorológicos del dron VTOL, usando su propia cámara del dron. Además, se usará el programa MATLAB, para obtener los datos climáticos. Se incluye también que se usaran el GCS (Es un sistema para controlar y monitorear drones desde cualquier lugar remoto). Entre sus resultados tuvo el promedio de las 197 mediciones, obteniendo los siguientes valores de 25.58 °C, 1011.28 kPa, 51.29 m.s.n.m., 65.25%. Concluyo que, en el sistema de adquisición de datos, genera un error promedio de 1.48%, 5.43%, 3.92%, respecto al valor real para mediciones de temperatura, humedad, altitud y presión respectivamente. A base de este proyecto nos ayudó evidenciar la viabilidad del uso de drones para la medición y transmisión de datos ambientales, lo que sirvió como referencia para la integración del sistema térmico y de control en el dron utilizado en esta investigación.

Vilca Choque, E. H. y Chura Quispe, O. A (2021) en su tesis para optar el título profesional de ingeniero mecánico electricista en la universidad nacional del altiplano de Puno, titulada “inspección preventiva mediante el uso del vehículo aéreo no tripulado (dron), para evitar interrupciones del suministro de energía en los elementos del sistema de distribución”. Su objetivo fue inspeccionar los sistemas eléctricos de distribución haciendo uso de un DRONE, para detectar posibles fallas que pongan en riesgo la continuidad del servicio de eléctrico en los sistemas de distribución. La metodología consistió en la inspección de los sistemas de suministro utilizando drones con el fin de evitar interrupciones del suministro de energía eléctrica, para este proyecto uso un dron DJI Phantom 4 pro con cámara de alta definición, para las imágenes térmicas uso la cámara Flir Duo y para obtener las coordenadas uso el GPS Garmin Etrex 10, en cada inspección que realizo con el dron registro las coordenadas UTM para realizar el informe de la inspección, la imágenes térmicas fueron analizadas visualmente y en base a su conocimiento y especificaciones de acuerdo a las líneas analizadas determino las condiciones del sistema. Al realizar la inspección obtuvo un 84% de

anomalías en los elementos inspeccionados, el 11% presentaban puntos calientes y el 1% de las SS.EE presentan averías en algunos de sus componentes. Concluyo que el uso del dron en la inspección de sistemas eléctricos ayuda a reducir el tiempo de inspección, reduce los riesgos a los que se exponen los trabajadores, y reduce el costo de esta tarea. A base de este proyecto nos ayudó a demostrar que la inspección preventiva con drones y cámaras térmicas mejora la detección de fallas y reduce riesgos laborales, sirviendo de base para la implementación del monitoreo térmico automatizado en transformadores eléctricos.

Huallpa Palomino, R. (2020); en su proyecto elaborado para obtener el título profesional ingeniero electricista, en Huancayo – Perú, titulada “Aplicación del sistema de aeronave pilotada a distancia para optimizar la supervisión del alimentador eléctrico de ingenio – Electrocentro S.A”, su objetivo fue aplicar el RPAS para optimizar la supervisión de las líneas de media tensión en el alimentador A4504 de Electrocentro. La metodología consistió en recopilar datos para la elaboración de la aplicación del sistema de aeronave pilotada, además utilizó los siguientes instrumentos: MapInfo, esto se utilizó para las coordenadas geográficas; luego se implementó programas de Google Earth, MapInr o Maps.me, para que tenga una precisa ubicación geográfica; usó el Dron RPAS PHANTOM 4 PRO para la supervisión de un sistema eléctrico con un nivel de tención de 13.2 kv, este modelo de drones tiene una autonomía de vuelo de aproximadamente 30 minutos, lo cual lo hace ideal para cumplir con el propósito, la inspección que realizo fue visual haciendo uso de la propia cámara integrada del dron, además que el autor tuvo que adquirir una licencia de piloto operador RPAS, ya que es un requisito para operar el Dron según MTC (Ministerio de transporte y comunicaciones MTC, 2000). Como resultado obtuvo que, en la supervisión con dron, se detectó 450 deficiencias tipificadas basándose a las normativas de OSINERGMIN. Concluyo que la información recopilada por el RPAS es más claras y objetivas debido a los ángulos que abarca en comparación a la supervisión tradicional, lo que permite evaluar con mayor claridad las

deficiencias. A base de este proyecto nos ayudó a evidenciar la eficiencia del uso de drones en la supervisión de sistemas eléctricos, lo que sirvió de referencia para implementar la inspección aérea y térmica de transformadores mediante el sistema propuesto.

1.2. Planteamiento del Problema

Hoy en día los drones vienen impactando en el mundo de la tecnología. Primero comenzó para entretenimiento o producción audiovisual. Para luego enfocarse en las áreas importantes para la sociedad. Además, con los drones se puede aplicar a la sostenibilidad en su uso en plantas de energía solar, eólica, estructuras, ganadería, agricultura, etc. Se incluye también que los drones combaten la deforestación en el medio ambiente, mediante el rastreo de las poblaciones silvestres, fauna y flora. A través de sus cámaras de los drones. La cámara de video del dron es de gran utilidad a la hora de sobrevolar grandes superficies ya que toma fotografías rápidas y precisas. (INGEODRONE, 2024)

Por otro lado, la inteligencia artificial está facilitando algunas tareas en la industria, dentro de la inteligencia artificial hay un campo llamado visión artificial, esta permite obtener información a partir de entradas visuales ya sea imágenes o videos.

La visión artificial actualmente está muy ligada a la industria con diversas aplicaciones como la inspección automatizada de productos y el control de calidad y también la robótica. (bcnvision, 2023).

En el sector energía también se usa la visión artificial, algunas empresas han implementado la visión artificial para la gestión de vegetación en líneas de transmisión, inspección de instalaciones de parques eólicos o de paneles solares, la inspección de infraestructura, etc.

La demanda energética en el país aumenta cada año, del 2022 al 2023 aumento un 3.6% según el ministerio de energía y minas (minas, 2023); con este

incremento también aumenta la red eléctrica, las subestaciones de distribución, etc., y con ello también aumenta el trabajo de mantenimiento de estas, lo cual demanda de personal calificado.

En el presente año 2024 se viene ejecutando dos obras de electrificación en el departamento de Cajamarca, se trata de obras trascendentales para el desarrollo de la población: ‘Sistema Electrificación Rural IV Etapa Jaén – Cajamarca’, que beneficiará a pobladores de 90 localidades ubicadas en los distritos de Jaén, Colasay, Santa Rosa, Huabal, Coranco y Bellavista. Por otro lado, la ‘Ampliación de Redes de la provincia de Jaén y Cutervo’, favorecerá a 304 localidades. Ambos proyectos beneficiarán a más de 45,000 pobladores. (MINEM, 2023)

En la ciudad de Jaén, la creciente demanda energética y la necesidad de garantizar un suministro eléctrico continuo y seguro han puesto de manifiesto la importancia de mantener en óptimas condiciones los transformadores eléctricos. Sin embargo, el método tradicional de inspección manual de estos equipos presenta diversas limitaciones, tales como:

Seguridad del personal: La inspección manual de transformadores implica riesgos significativos para el personal encargado, ya que deben acercarse a equipos que operan a tensiones elevadas.

Eficiencia operativa: El proceso de inspección manual es lento lo que puede resultar en tiempos prolongados de identificación de fallos, afectando la continuidad del servicio eléctrico.

Accesibilidad: Algunos transformadores se encuentran en ubicaciones de difícil acceso, complicando aún más la tarea de inspección y aumentando los costos operativos.

Precisión de la detección: La inspección visual y manual puede no ser suficiente para detectar fallos internos o anomalías en los transformadores, lo que puede derivar en averías inesperadas y costosos tiempos de inactividad.

Economía: la inspección tradicional de transformadores requiere que el equipo este desconectado de la red durante esta labor, generando pérdidas económicas a la concesionaria.

En este contexto, surge la necesidad de implementar un sistema de inspección aérea mediante el uso de un dron equipado con una cámara térmica y un sistema de visión artificial. Este sistema podría ofrecer una solución eficiente y segura para la detección temprana de anomalías en transformadores, mejorando así la confiabilidad del suministro eléctrico en la ciudad de Jaén.

La gravedad del problema radica en que los métodos actuales de inspección manual exponen al personal a riesgos eléctricos, prolongan los tiempos de diagnóstico y generan pérdidas económicas significativas por interrupciones del servicio eléctrico. Por ello, el desarrollo del sistema propuesto representa una alternativa tecnológica viable que contribuirá a mejorar la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico en la región.

En nuestra investigación propondremos la aplicación de estas dos tecnologías al sector eléctrico, específicamente para la inspección de transformadores eléctricos.

Formulación del Problema

¿Cómo implementar un sistema de inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén?

1.3. Justificación.

1.3.1. Justificación técnica:

Este proyecto de investigación se realizará por que se quiere implementar un sistema donde se combine la visión artificial y el uso de drones en la inspección de transformadores para que se pueda mejorar la eficiencia en la inspección de transformadores.

1.3.2. Justificación Económica:

Este proyecto de investigación se realizará por que la visión artificial y el uso de drones reducirá el tiempo de inspección de los transformadores energizados, para que esta actividad tenga la menor influencia económica.

1.3.3. Justificación social:

Este proyecto de investigación se realizará por que con el uso de la visión artificial se proyecta una mejor relación entre el servicio de energía eléctrica y la población, para que este sistema prevenga fallas de los transformadores y anule el riesgo de accidentes laborales del personal de la concesionaria.

1.3.4. Justificación práctica:

Este proyecto de investigación se realizará por que el uso de imágenes térmicas y visión artificial en la inspección de transformadores eléctricos proporciona una serie de ventajas para el servicio de la energía eléctrica. En primer lugar, permite una detección temprana de fallos y anomalías, lo que reduce el riesgo de interrupciones inesperadas y prolonga la vida útil de los transformadores. Además, esta metodología no invasiva permite realizar inspecciones sin necesidad de desconectar los equipos, para que así se pueda garantizar la continuidad del servicio eléctrico.

1.3.5. Justificación teórica:

Este proyecto de investigación se realizará por que se aplicaran teorías de transferencias de calor en el uso de imágenes térmicas y procesamiento digital de imágenes. La termografía detecta anomalías térmicas indicativas de fallos potenciales, mientras que la visión artificial analiza y clasifica estas imágenes con algoritmos avanzados para que podamos tener un diagnóstico preciso y temprano del estado de los transformadores.

1.3.6. Justificación metodológica:

Este proyecto de investigación se realizará por que el uso de imágenes térmicas y la visión artificial para la inspección de transformadores eléctricos se fundamenta en la necesidad de métodos eficientes, precisos y no invasivos para el mantenimiento predictivo de equipos. Esta metodología combina la termografía, que identifica cambios de temperatura asociados a posibles fallos, con sistemas de visión artificial que analizan las imágenes capturadas mediante algoritmos avanzados de procesamiento de datos. Esta integración permite una detección temprana y precisa de anomalías, para que de esta manera se reduzca el riesgo de fallos catastróficos y optimizando los programas de mantenimiento. Además, la automatización del análisis mejora la eficiencia operativa y proporciona datos valiosos para la toma de decisiones informadas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un sistema para inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén.

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.
- Poner en funcionamiento el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.
- Realizar una evaluación técnica y económica del sistema implementado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Objeto de estudio:

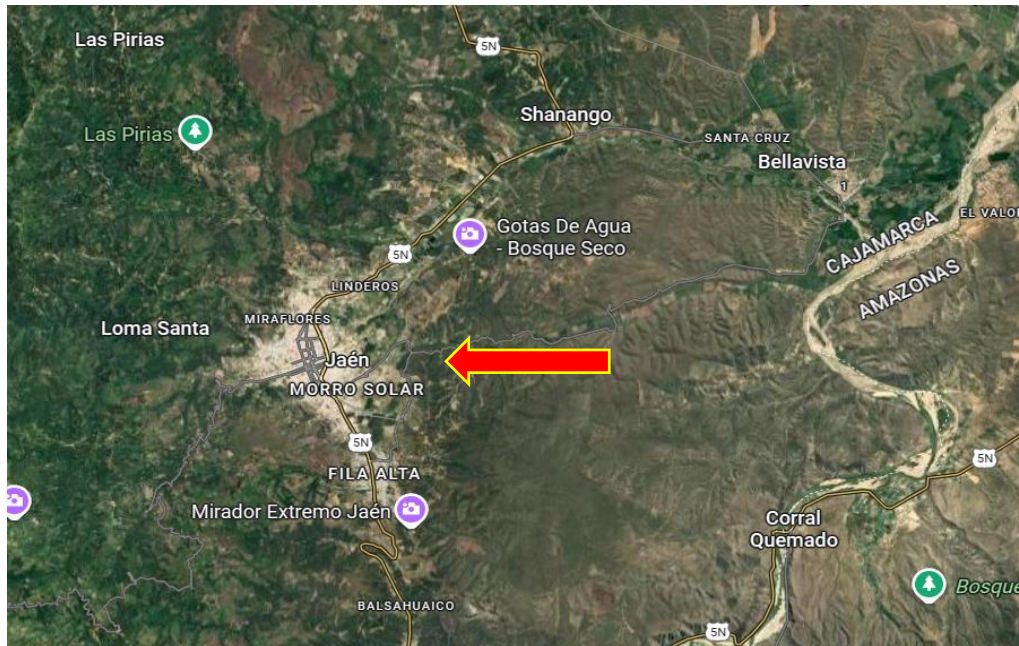
El objeto de estudio de esta investigación es la implementación y evaluación de un sistema para inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial, utilizando un dron equipado con sensor MLX90640 (cámara térmica) y el módulo de procesamiento esp32, con el objetivo de mejorar el monitoreo y diagnóstico preventivo de estos equipos en la ciudad de Jaén.

Ubicación geográfica del área de estudio

La inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial se realizó en el Distrito de Jaén, Provincia de Jaén, Departamento de Cajamarca, Perú.

Figura 1

Ubicación de la inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas.



Fuente: Mapa geográfico, capturado de Google Maps.

Métodos

Esta investigación es de tipo aplicada según (OECD, 2018) se basa en trabajos originales realizados para luego adquirir nuevos conocimientos; con un enfoque cuantitativo según (Mata Solis, 2019) estudia las cantidades de lo que se adquiere; nivel descriptivo según (Supo, 2023) se encarga de la descripción de fenómenos, hechos o acontecimientos en cualquier campo de conocimiento; y el diseño de la investigación es tecnológico según (Llamas , 2020) sirve en esencia para la búsqueda de soluciones a problemas del ámbito tecnológico que dan respuesta a un problema concreto. Esto porque se va a tomar tecnología ya existente y desarrollada como los drones y la visión artificial y se los va a aplicar a la inspección de transformadores.

Población:

Tomaremos como población a los transformadores de la ciudad de Jaén.

Muestra:

La muestra será de 5 a más transformadores que se encuentren en la ciudad de Jaén, dependiendo de su disponibilidad, accesibilidad, permisos, etc. Durante la ejecución de este proyecto.

Muestreo:

El muestreo es condicional, no probabilístico, pues los transformadores a inspeccionar se seleccionarán de acuerdo a su disponibilidad, accesibilidad, permisos, etc.

Procedimiento:**A.- El desarrollo del sistema para la inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.**

Primero se buscará la información sobre la inspección de transformadores, con el objetivo de tener los rangos de funcionamiento de los transformadores a inspeccionar para poder seleccionar los componentes a usar. Para la toma de imágenes aéreas se utilizará un dron comercial al cual se le implementará un sistema el cual estará compuesto por un microcontrolador inalámbrico (ESP32), una cámara térmica (Sensor MLX90640 - BAA), un módulo ESP32-CAM que va estar en modo AP, otro modulo ESP32-CAM que va estar en stream de video, una batería, el interruptor mini switch de 2 pines, el soporte del módulo para la cámara. El soporte del sistema será diseñado en el software SolidWorks, el circuito electrónico se soldará para que este mejor fijado, las imágenes serán recepcionadas en un pc y allí serán procesadas en un programa de procesamiento de imágenes, que también será desarrollado en esta investigación.

Después de haber analizado y optado por los componentes más adecuados para la construcción de este sistema, a continuación, se seleccionará los siguientes componentes para la construcción de la cámara térmica con visión artificial:

1.- SENSORES (ENTRADA)

➤ Selección del sensor MLX90640-BAA (Sensor térmico)

Se seleccionó el sensor para la elaboración de la cámara térmica de acuerdo a la temperatura, precisión y el costo. Además, se detallará las características del sensor.

Tabla 1

Sensor de imagen térmica infrarroja (IR).

Tipo de Sensor	Características
Sensor MLX90640 BAA	-Rango de temperatura detectable -40 °C a +300 °C. -Resolución Térmica: 32 x 24 píxeles (768 puntos de temperatura). -Campo de visión (FOV) 55° x 35° (modelo BAA). -Tipo de sensor: Matriz de sensores infrarrojos (IR). -Precisión típica: ± 1 °C a ± 2 °C (En el rango de 0-100). -Interfaz de comunicación: I²C (hasta 1MHz). -Voltaje de operación: 3.3 V (algunas placas permiten 5V). -Consumo eléctrico: < 23 mA -Rango de operación ambiental: -40 °C a +85 °C. -Velocidad de actualización: de 0.5 Hz a 64 Hz (configurable). -Sensibilidad térmica (NETD): 0.1 K (100mK) a 1Hz -Precio: \$ 37.08

Fuente: Elaboración propia, el precio es seleccionando de acuerdo en Alibaba.

Se eligió el sensor MLX90640-BAA para la inspección térmica de transformadores porque tiene un campo de visión más estrecho lo que permite, mejorar el detalle térmico a media o larga distancia, ideal para inspeccionar partes específicas del transformador. Tiene menor distorsión de imagen en objetos lejanos. Además, es ideal para montar el sensor en un dron desde una distancia segura. El MLX90640-BAA es compatible con los microcontroladores ESP32, Raspberry Pi, STM32, Teensy 3.6/4.0. Nosotros usaremos el ESP32 para la compatibilidad,

facilitando su integración y programación en el prototipo, la comunicación será de las interfaces I²C del sensor MLX90640-BAA. (RCDrone, 2025)

Figura 2

Sensor MLX 90640 – BAA de imagen térmica infrarroja y temperatura.



Fuente: Alibaba (Tienda peng rui, 2025).

➤ Selección del Módulo ESP32-CAM

EL ESP32-CAM fue elegido para acompañar como otra cámara adicional que acompañe al sensor MLX90640 – BAA (cámara infrarroja) que está instalado con el ESP32-WROOM-32, para la inspección de transformadores.

Tabla 2

Módulo de desarrollo ESP32-CAM.

Tipo de Módulo	Características
ESP32 - CAM	-Microcontrolador: ESP32-CAM (Tensilica Xtensa LX6, doble núcleo, hasta 240 MHz) -Cámara Integrada: OV2640, resolución hasta 1600x1200 (UXGA) -Memoria RAM: 520 K SRAM interna -Memoria externa: 4MB PSRAM (para procesar imágenes) -Memoria flash: 4 MB

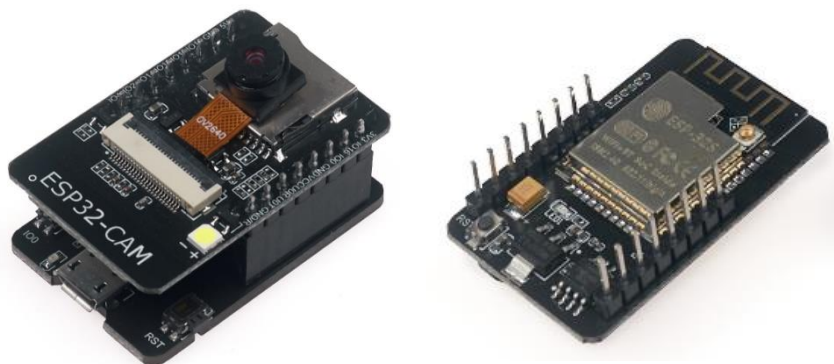
-
- Conectividad inalámbrica: Wi-Fi 802.11 b/g/n + Bluetooth v4.2(BLE y clásico)
 - Puertos de comunicación: I2C, SPI, UART, DAC, CAN, PWM, ADC, GPIO.
 - Voltaje de funcionamiento: 3.3 V – 5V
 - Alimentación: 5V vía USB o 3.3V vía pin VIN (con regulador)
 - Precio: S/. 75.00
-

Fuente: Elaboración propia, el precio es seleccionado de acuerdo en la Tienda Naylamp Mechatronics, Trujillo-La Libertad-Perú.

A la cámara térmica se le incorporo otra cámara que viene con el módulo ESP32-CAM (ver figura 3) adicional con el objetivo de capturar imágenes visibles de forma simultánea. Este módulo cuenta con una cámara OV2640 de 2 megapíxeles, suficiente para obtener una visión clara del transformador, el propósito es comparar y validar las imágenes térmicas con imágenes reales para mejorar la inspección térmica. (Mechatronics Laboratory, 2025)

Figura 3

Módulo de desarrollo ESP32-CAM.



Fuente: (Naylamp Mechatronics , 2025).

2.- CONTROLADORES

➤ Selección del microcontrolador ESP32-WROOM-32

El ESP32 fue elegido por su unidad de procesamiento principal debido a su alto rendimiento y características técnicas que se adaptan a los datos técnicos del MLX90640 – BAA.

Tabla 3

El ESP32-WROOM-32.

Tipo de Microcontrolador	Características
ESP32-WROOM-32	-Procesador: Doble núcleo (dual-core) Tensilica Xtensa LX6 -Microcontrolador: ESP32-WROOM-32(Fabricado por Espressif Systems) -Velocidad: 240 MHz -Memoria RAM: 520 K SRAM interna -Memoria flash: 4 MB -Conectividad inalámbrica: Wi-Fi 802.11 b/g/n + Bluetooth v4.2(BLE y clásico) -Puertos de comunicación: I2C, SPI, UART, DAC, CAN, PWM, ADC, GPIO. -Voltaje de funcionamiento: 3.3 V – 5V -Alimentación: 5V vía USB o 3.3V vía pin VIN (con regulador) -Precio: S/. 36.00

Fuente: Elaboración propia, el precio es seleccionado de acuerdo en la Tienda El Dial, Jaén-Cajamarca-Perú.

Se escogió el ESP32-WROOM-32 (ver figura 4) para la comunicación, adquisición y procesamiento de datos térmicos para el sensor MLX90640-BAA porque sus características técnicas son avanzadas y su compatibilidad directa con el sensor. Además, por su conectividad inalámbrica integrada al Wi-Fi y Bluetooth que permite transmitir las imágenes térmicas a una computadora, servidor o aplicación móvil en tiempo real y también programaremos el microcontrolador

con el Arduino IDE porque tiene un lenguaje basado en C/C++ lo que proporciona una estructura sólida y flexible para el controlador de sensores, procesamiento de datos y comunicación de dispositivos. Asimismo, se eligió este programa por sus bibliotecas oficiales que permite una integración rápida y eficiente con el sensor MLX90640. Luego programaremos en Python para crear un programa para visualizar las imágenes térmicas. (ELECTRONIFY INDIA, 2025)

Figura 4

ESP32-WROOM-32 (38 pines).



Fuente: (Tienda El Dial, 2025).

➤ Selección del Módulo ESP32- CAM (Para crear la red)

El ESP32-CAM fue elegido por su unidad de procesamiento principal debido a su alto rendimiento y características técnicas, además al contar Wi-Fi + Bluetooth y cámara. No vamos usar su cámara, solo servirá para crear su propia red Wi-Fi para luego conectarse de cualquier laptop o celular.

Se escogió el módulo ESP32-CAM (ver figura 5) para la comunicación, adquisición y procesamiento de datos térmicos para el sensor MLX90640-BAA (cámara infrarroja), el ESP32-WROOM-32 y el otro modulo ESP32-CAM que se acompañara como otra cámara adicional para visualizar de 2 formas, mediante la red del Wi-Fi creado; que permite transmitir las imágenes térmicas a una computadora, servidor o aplicación móvil en tiempo real y también programaremos el módulo con el Arduino IDE y Python porque lo que proporciona una estructura sólida y flexible para el controlador del sensor y el otro modulo ESP32-CAM, obteniendo los procesamientos de datos y comunicación de

cada dispositivos. Asimismo, se eligió estos dos programas por sus bibliotecas oficiales que permite una integración rápida. (Mechatronics Laboratory, 2025)

Figura 5

ESP32-CAM.



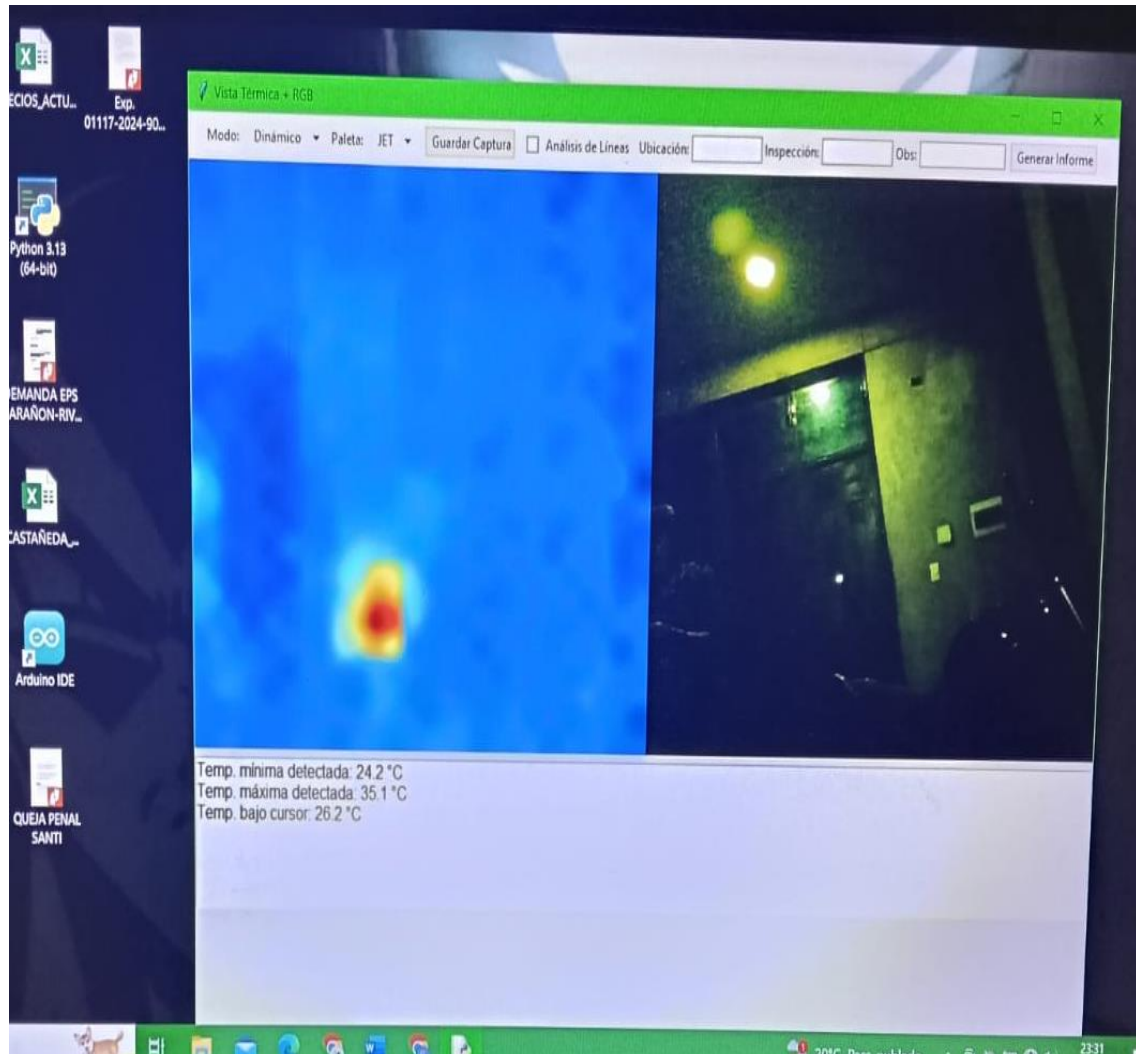
Fuente: (Naylamp Mechatronics , 2025).

3.- SALIDAS (PC Interfaz Python)

En la PC se implementó una interfaz desarrollada en Python, la cual cumple Recepción y procesamiento de datos. Por lo, tal la salida hacia la PC con Python permite no solo visualizar en tiempo real el comportamiento térmico de los transformadores, sino también disponer de una herramienta flexible para el análisis de datos, integración con algoritmos de visión artificial y almacenamiento digital de la información.

Figura 6

Visualización de la cámara térmica en el Python.



Fuente: Elaboración propia.

4.- OTROS COMPONENTES

➤ **Selección del cable dupot hembra a macho 10 cm**

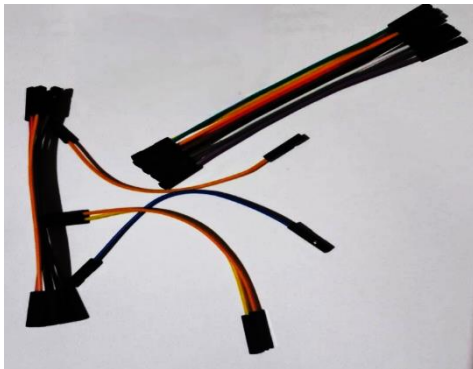
Estos cables son ideales para el prototipo electrónico que vamos a construir, estas características los convierte en una opción ideal para el prototipo de la cámara térmica.

Características:

- ✓ Tipo de conector: Hembra a macho, un extremo con conector hembra y el otro con conector macho.
- ✓ Longitud: Estos cables tienen una flexibilidad para ubicar en orden los elementos en el circuito y cuenta con una longitud de 10 cm.
- ✓ Números de hilos: Generalmente vienen en grupo de 10, 20, 40 cables.
- ✓ Material del conductor: Cobre estañado, mayor conductividad y resistencia a la corrosión.
- ✓ Aislamiento: Plástico flexible (PVC) resistente al calor moderado.

Figura 7

Cables dupont hembra - Macho.



Fuente: (Tienda El Dial, 2025).

Se seleccionó el cable dupont hebra a macho de 10 cm porque es fundamental para asegurar la correcta conexión con los componentes de la cámara térmica y también facilita futuras modificaciones en el sistema. Pero nosotros lo soldamos para que este mejor fijado en el circuito electrónico. (electromanía, 2025)

➤ Selección del Interruptor Mini Switch 2 pines

El Mini Switch de 2 pines fue seleccionado como interruptor que permitirá la apertura o cierre de un circuito eléctrico de forma manual. En el sistema creado este componente se utiliza para controlar la alimentación del circuito electrónico y así poder ahorrar más energía en la batería. (Ja-Bots.com, 2025)

Figura 8

Interruptor Mini Switch de 2 pines.



Fuente: (Tienda El Dial, 2025).

➤ Selección del Dron

Se eligió el dron DJI Mini 4K Fly More como plataforma de soporte aéreo para la cámara térmica.

Tabla 4

Dron DJI Mini 4k Fly More.

Tipo de Dron	Características
DJI Mini 4K Fly More	-Marca: DJI -Dimensiones: Plegado (Sin hélices): 138x81x58 mm (largo x ancho x alto) -Cámara integrada: Sensor CMOS 1/2.3", video 4K a 30 fps, fotos de 12 MP - Resolución de video: 4K (3840 x 2160) a 30 fps, FHD (1920 x 1080) hasta 60 fps -Peso: 249 g -Estabilización: Estabilizador electrónico de imagen (EIS) y Gimbal mecánico de 3 ejes. - Color: Negro Trufa -Resistencia a la velocidad máxima del viento: 10,7 m/s (Nivel 5) - Tiempo de vuelo: 31 minutos por batería - Batería: Li-ion 2250 mAh (por batería) - Altitud máxima de despegue: 4,000 m

-
- Distancia máxima de vuelo: 15,7 kilómetros
 - Memoria Externa 128 GB EXTREME PRO
 - Lente: Campo de visión (FOV): 83° Equivalente de formato: 24 mm Apertura/2.8 Enfoque: 1m a
 - Alcance máximo: Hasta 10 Km con transmisión de video HD (OcuSync 2.0 o equivalente)
 - Posicionamiento: GPS + GLONASS + Galileo
 - Control remoto: Compatible con Smartphones (app DJI Fly)
 - Kit Fly More: Incluye 3 baterías estación de carga, hélices extra, bolsa de transporte
 - Precio: S/. 2,148.00
-

Fuente: Elaboración propia, el precio es seleccionado de acuerdo a la tienda DJI Lima Perú.

El Dron DJI Mini 4K Fly More (ver figura 9) se eligió debido a que el dron ofrece una excelente estabilidad gracias a un sistema de navegación GPS y sensores de posicionamiento. Esto permite capturar imágenes térmicas sin vibraciones o movimientos bruscos. Además, su batería cuenta con una autonomía de vuelo de hasta 30 minutos permite cubrir áreas de inspección amplias con facilidad. También el dron cuenta con una estructura ideal que nos permite realizar pequeñas adaptaciones para montar modelos ligeros adicionales, como el sistema térmico y también ofrece una excelente relación entre precio comparado con otros drones industriales, refiriéndose con la funcionalidad y calidad de imagen, lo que lo convierte en una alternativa ideal con presupuesto limitado. (dJI Arenales, 2025)

Figura 9

Dron DJI Mini 4K Fly More.



Fuente: (DJI Perú, 2025).

5.- FUENTE DE ALIMENTACIÓN

➤ Selección de la Batería

Se utilizó un Power Bank como fuente de alimentación para el sistema de inspección térmica.

Tabla 5

Batería Power Bank.

Tipo de batería	Características
Power Bank	-Capacidad: 10,000 mAh (miliamperios - hora) -Voltaje de salida: 5V (USB estándar) -Corriente de salida: 1A a 2.1A (según modelo y puerto) -Número de salida: 1 o 2 puertos (USB-A, a veces USB-C) -Compatibilidad: Carga dispositivos como ESP32, cámaras, sensores, celulares, etc. -Protecciones internas: Protección contra sobrecargas, cortocircuitos, sobrecalentamiento y descarga.

-
- Tipo de celda: Baterías de ion de litio o polímero de litio (Li-ion/Li-Po)
 - Recarga: Entrada micro USB o USB-C, 5V (1A o 2A)
 - Precio: S/.40.00
-

Fuente: Elaboración propia, el precio es seleccionado de acuerdo en la tienda Diconor, en la ciudad de Jaén.

Se usará la batería Power bank (ver figura 10) para la alimentación para el microcontrolador ESP32-WROOM-32 es el que leerá los datos térmicos del sensor MLX90640-BAA, también alimentará a los dos módulos ESP32-CAM y ESP32-CAM. Esta batería proporciona una salida estable de 5V, su capacidad permite operar el sistema durante varias horas continuas, para la inspección en campo. (mesajil.com, 2025)

Figura 10

Batería Power Bank 10,000 mAh.



Fuente: (Tienda Diconor, 2022).

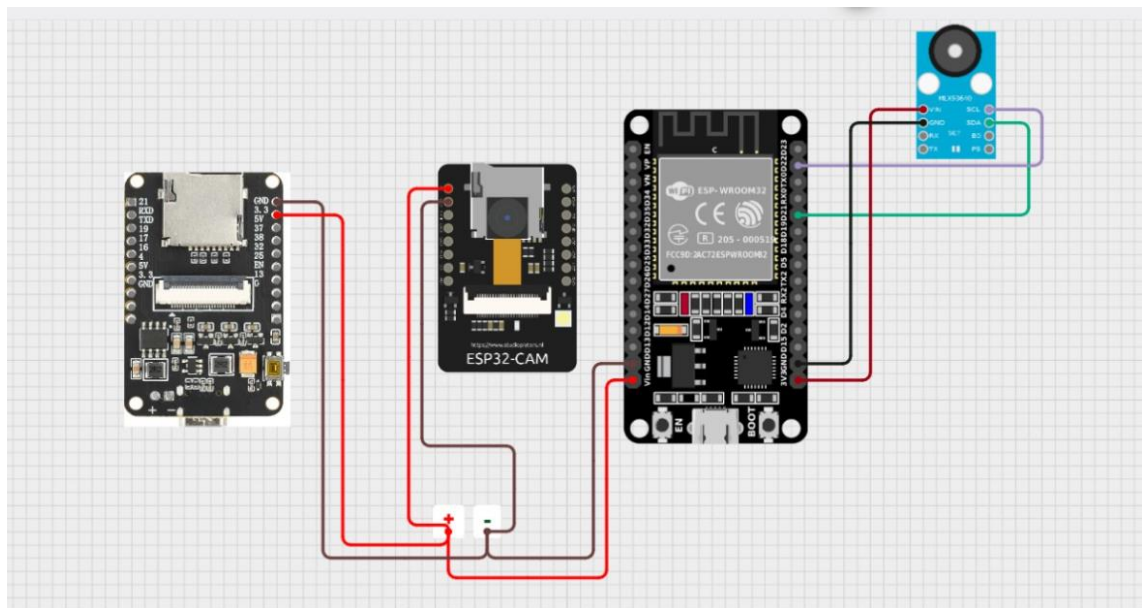
B.- Puesto en funcionamiento el sistema para la inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.

➤ Diseño del Circuito

El diseño del circuito es de suma importancia para el desarrollo del prototipo de la cámara térmica, asegurando los componentes en su ubicación y correcto funcionamiento. En la figura 11, hemos diseñado un diagrama de conexiones del circuito electrónico, donde se aprecia las conexiones desde la energía hacia el sensor MLX90640-BAA, el microcontrolador ESP32-WRROM-32, el Módulo ESP32-CAM que servirá para crear una red nueva y el otro Módulo ESP32-CAM es para que vea una cámara adicional para que acompañe a la cámara térmica, logrando precisar y obtener una buena inspección térmica. La plataforma que hemos diseñado el circuito electrónico se llama Cirkit designer.

Figura 11

Diseño del Circuito electrónico.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño del circuito electrónico es muy importante para el proyecto, Porque es donde se va presentar la forma en que los distintos componentes del sistema se integran y comunica entre sí para capturar imágenes térmicas de los transformadores mediante un dron en tiempo real. Este diseño permite la correcta

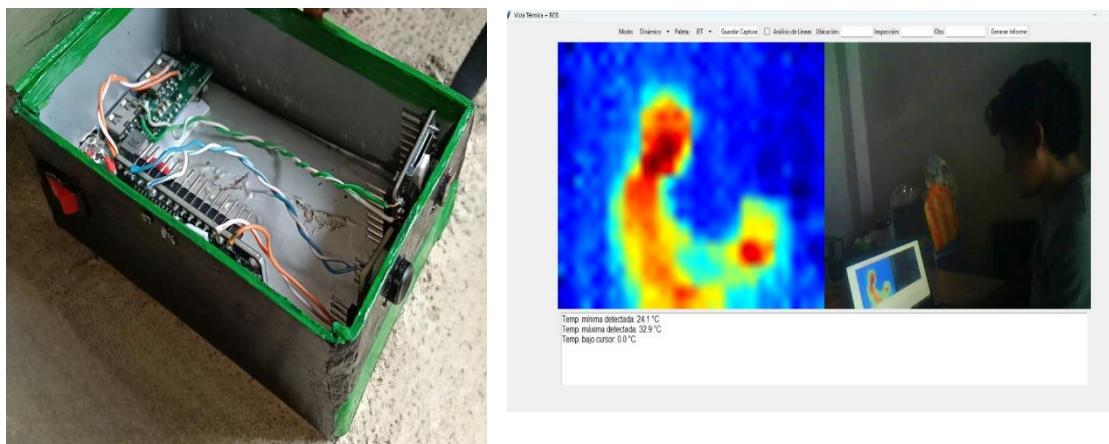
conexión entre los componentes teniendo un buen funcionamiento eficiente y sincronizado, estabilidad eléctrica y capacidad de ser alimentado con una sola fuente (Power Bank).

➤ Montaje del sensor, modulo

Para la elaboración del montaje se llevó a cabo una serie de pasos organizados, pero siempre teniendo en cuenta los criterios técnicos para garantizar su funcionalidad para que luego permita integrar correctamente los componentes electrónicos, el sistema de alimentación, la transmisión de datos y la estructura física del dron. Siguiendo los siguientes pasos.

Figura 12

Montaje de la cámara térmica.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez comprobado el funcionamiento individual se procedió a realizar las conexiones entre los dispositivos y decidimos soldarlo con el cautín para que la conexión sea más segura. El sensor MLX90640-BAA fue conectado al ESP32-WROOM-32 utilizando los pines GPIO 21 (SDA) y GPI 22 (SCL), el otro modulo ESP32-CAM va estar en modo AP su función es crear una nueva red Wi-Fi y el otro módulo ESP32-CAM se instaló de forma independiente para que acompañe su cámara adicional, pero con su misma alimentación desde la misma fuente. Los cables Dupont fueron utilizados para las conexiones. Todos los dispositivos fueron alimentados desde un Power Bank de 10,000 mAh, conectado al puerto

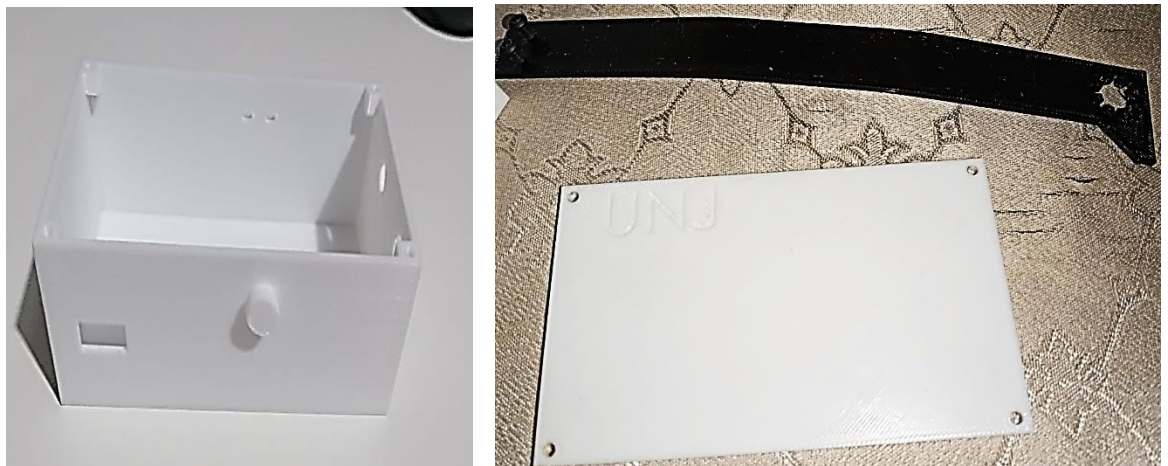
micro USB el microcontrolador ESP32-WROOM-32, al módulo ESP32-CAM y el otro módulo ESP32-CAM al otro puerto micro USB, mediante adaptadores reguladores de voltaje que trae la misma Power Bank, se eligió esta fuente de alimentación por su autonomía, portabilidad y facilidad de recarga.

➤ **Diseño e impresión de la estructura de la cámara térmica**

Para el diseño se utilizó el software SolidWorks, en el cual nos permite realizar un modelamiento tridimensional preciso de las piezas. El diseño se va considerar aspectos como dimensiones exactas, ubicación de orificios, accesos para puesto de conexión (Ver anexo) y soporte de montaje adaptable al dron DJI Mini 4K Mini Fly More. El proceso de diseño se inició midiendo las dimensiones de cada componente electrónico, para integrarlo en un solo modelo. Una vez finalizado el diseño, se exportan los archivos en formato STL para su impresión 3D. Se utilizó para la caja le damos un espesor de 2 mm y la tapa le damos un espesor 2 mm para poder dibujar UNJ y no debilitar la tapa, se usó el material policarbonato debido a su resistencia durabilidad, también porque no pesa mucho. Además, para la correa se le dio de espesor 2 mm que sujeta la cámara térmica al dron se usó el material filamento flexible por su capacidad de doblarse, estirarse sin romperse. Se imprimieron tres piezas y la impresora se demoró en la tapa 40 minutos por el logo dibujado UNJ, la correa 30 minutos y la caja dos horas; para imprimir.

Figura 13

Impresión de la estructura en la impresora 3D.



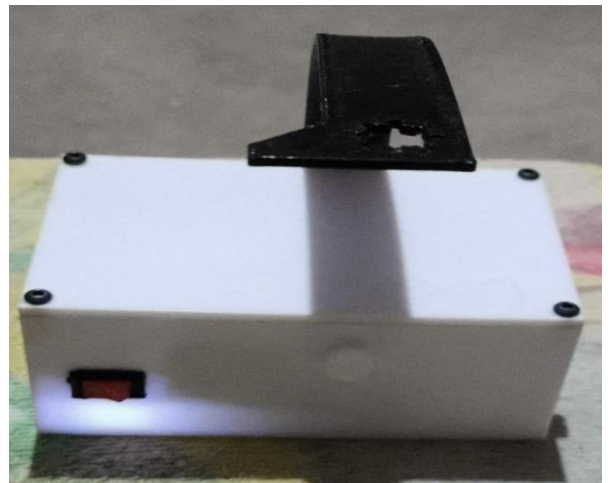
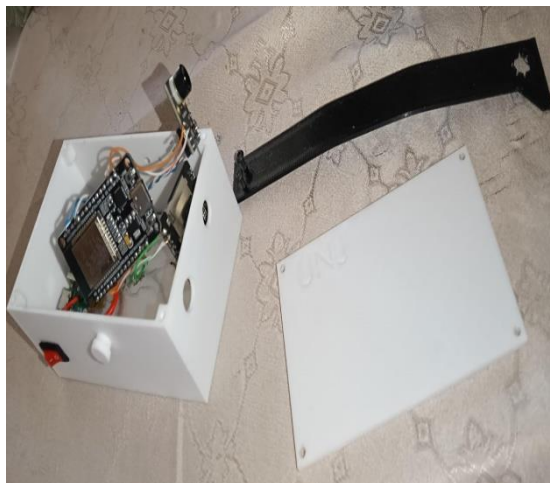
Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Ensamble de la estructura para la cámara térmica**

Luego de finalizar la impresión en 3D de las tres piezas, se ensamblaron las piezas formando la estructura de la cámara térmica, compuesta por la caja principal, la tapa y la correa de sujetar a la cámara térmica en el dron. La caja sirve como soporte y protección para los componentes electrónicos, mientras la atapa se une a la caja mediante pernos, asegurando un cierre firme. La correa, fabricada de filamento resistente, se fija a la caja para mantener la estructura estable en el soporte del dron. Durante el ensamblaje el circuito electrónico se incorporó dentro de la caja y se alineo cuidadosamente con la estructura, encajaron correctamente las piezas.

Figura 14

Ensamble de la cámara térmica.



Fuente: Elaboración Propia.

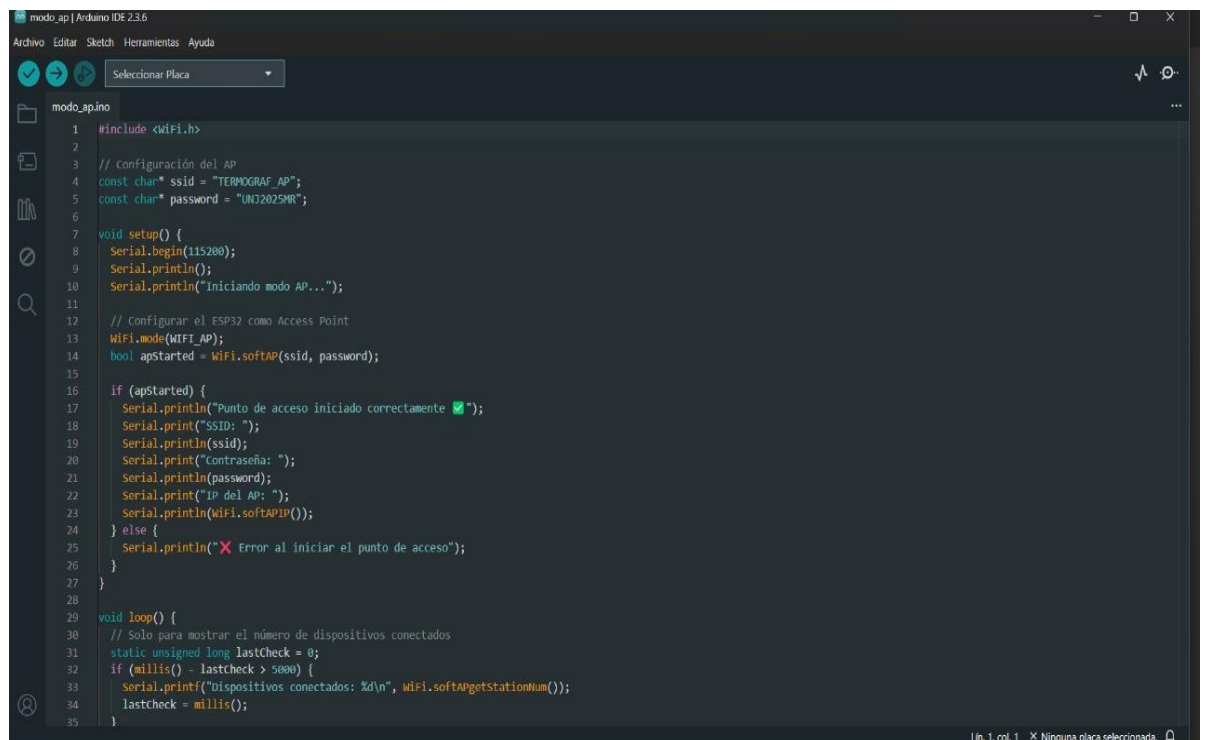
➤ **Programación del Sistema**

Uno de los ESP32-WROOM-32 fue programado en Arduino IDE, primero se descargó librerías para cada componente, para luego programar la lectura del sensor infrarrojo MLX90640-BAA, mediante el protocolo I2C. Se verifico la correcta lectura de temperaturas y la generación de imágenes térmicas. La ESP32-CAM también fue programada en Arduino IDE, configurada para tomar imágenes regulares y el otro modulo ESP32-CAM va estar en modo AP es decir que se le creo una nueva red Wi-Fi propia. Además, se desarrolló una sincronización básica

para que el ESP32-WROOM-32, ESP32 - CAM y el otro ESP32-CAM trabajara de manera paralela, capturando tanto la imagen térmica como la visible al mismo tiempo para la comparación durante la inspección térmica para transformadores, también se usó Python para visualizar las anomalías de los transformadores. Se mostrará el siguiente código desarrollado para el funcionamiento de inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial.

Figura 15

Código de programación en el programa Arduino IDE, para uno de los módulos del ESP32-CAM que está en modo AP.

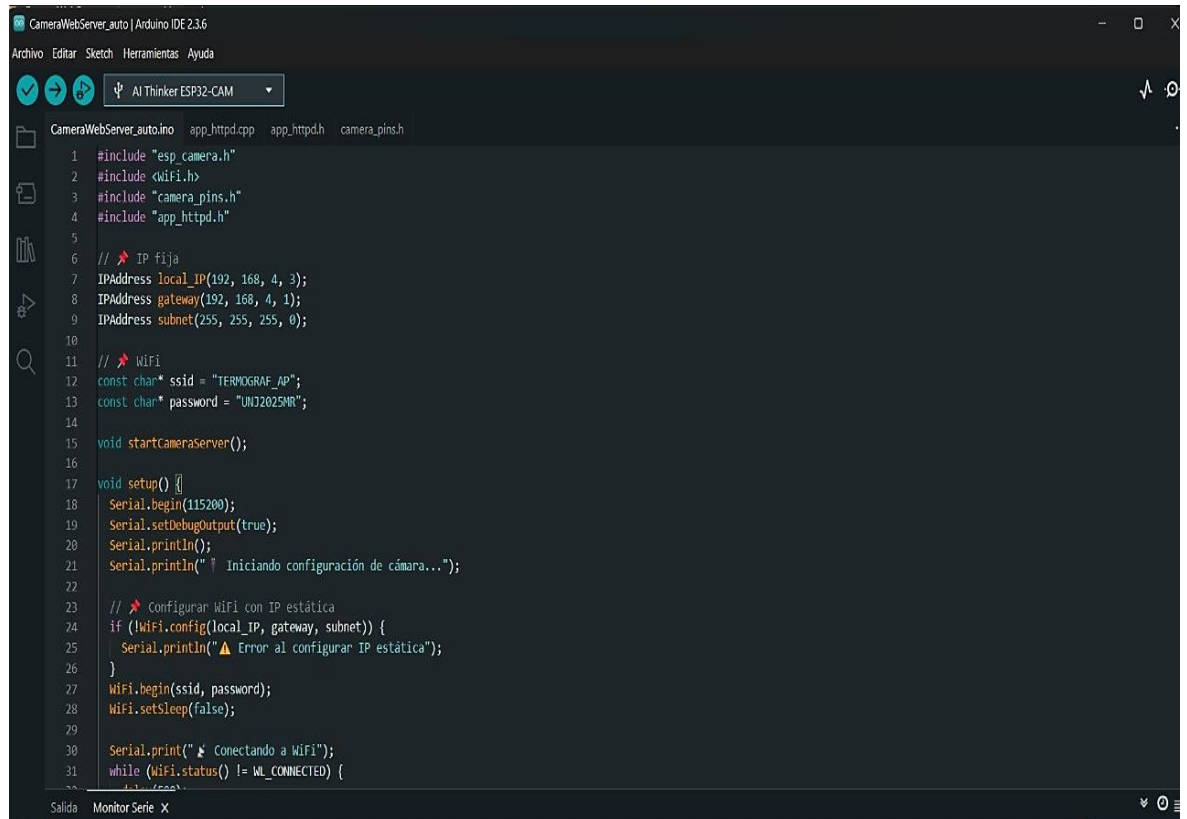
The image shows a screenshot of the Arduino IDE 2.3.6 interface. The file 'modo_ap.ino' is open in the editor. The code is written in C++ and configures the ESP32 as an Access Point (AP). It includes the 'WiFi.h' library, defines the SSID 'TERMOGRAF_AP' and password 'UN02025MR', and sets up the serial communication at 115200 baud. The setup function initializes the serial port and starts the AP. The loop function checks the number of connected devices every 5000 milliseconds and prints it to the serial monitor. The status bar at the bottom indicates 'Lin. 1, col. 1' and 'Ninguna placa seleccionada'.

```
1 #include <WiFi.h>
2
3 // Configuración del AP
4 const char* ssid = "TERMOGRAF_AP";
5 const char* password = "UN02025MR";
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(115200);
9   Serial.println();
10  Serial.println("Iniciando modo AP...");
11
12  // Configurar el ESP32 como Access Point
13  WiFi.mode(WIFI_AP);
14  bool apStarted = WiFi.softAP(ssid, password);
15
16  if (apStarted) {
17    Serial.println("Punto de acceso iniciado correctamente ✅");
18    Serial.print("SSID: ");
19    Serial.println(ssid);
20    Serial.print("Contraseña: ");
21    Serial.println(password);
22    Serial.print("IP del AP: ");
23    Serial.println(WiFi.softAPIP());
24  } else {
25    Serial.println("❌ Error al iniciar el punto de acceso");
26  }
27
28
29 void loop() {
30   // Solo para mostrar el número de dispositivos conectados
31   static unsigned long lastCheck = 0;
32   if (millis() - lastCheck > 5000) {
33     Serial.printf("Dispositivos conectados: %d\n", WiFi.softAPgetStationNum());
34     lastCheck = millis();
35   }
36 }
```

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 16

Código de programación en el Arduino IDE, para la programación en el ESP32-CAM, que hace stream de video.

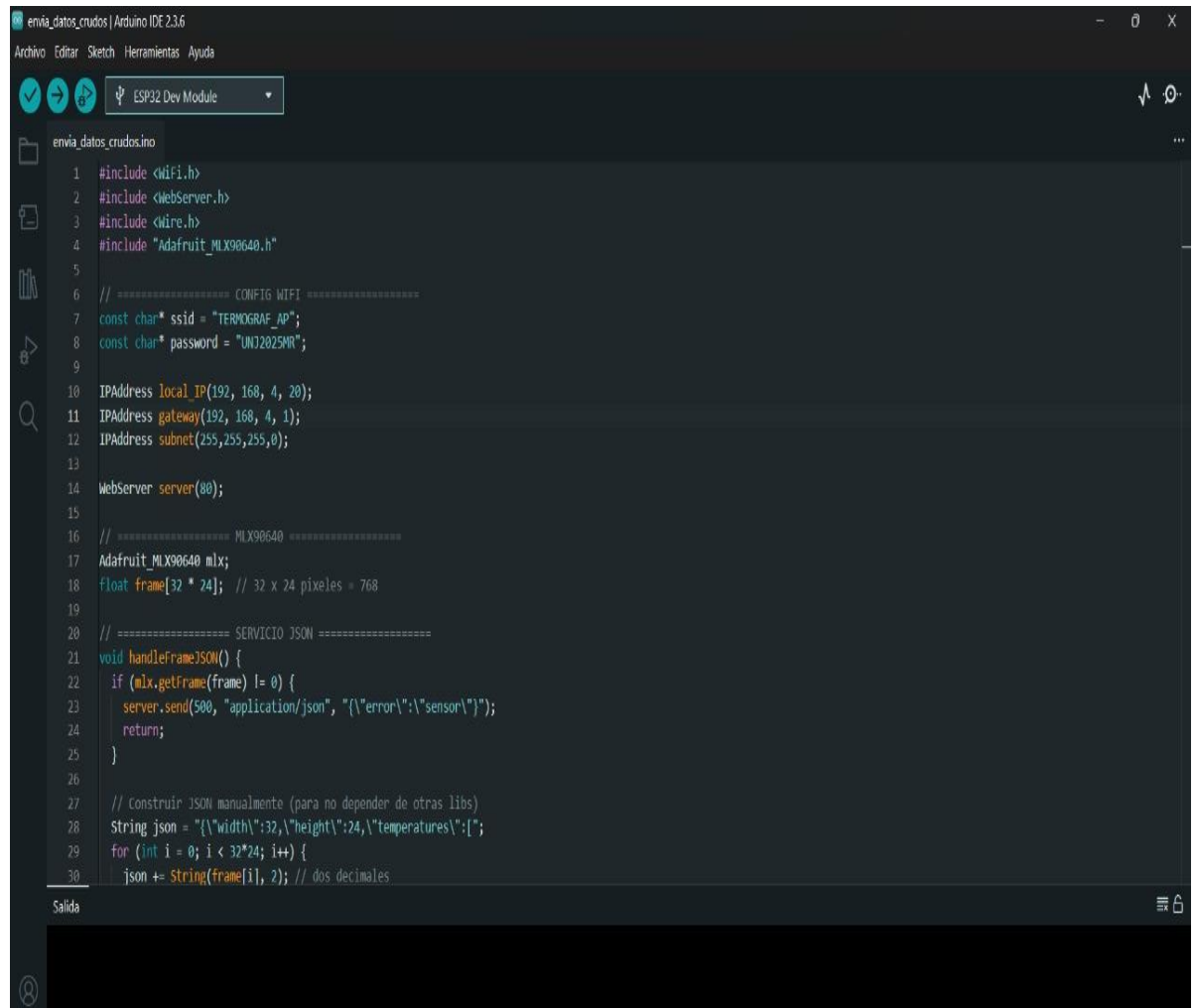


```
1 #include "esp_camera.h"
2 #include <Wifi.h>
3 #include "camera_pins.h"
4 #include "app_httpd.h"
5
6 // * IP fija
7 IPAddress local_IP(192, 168, 4, 3);
8 IPAddress gateway(192, 168, 4, 1);
9 IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);
10
11 // * Wifi
12 const char* ssid = "TERMOGRAF_AP";
13 const char* password = "UNID2025WR";
14
15 void startCameraServer();
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(115200);
19   Serial.setDebugOutput(true);
20   Serial.println();
21   Serial.println(" * Iniciando configuración de cámara...");
22
23   // * Configurar Wifi con IP estática
24   if (!Wifi.config(local_IP, gateway, subnet)) {
25     Serial.println(" * Error al configurar IP estática");
26   }
27   Wifi.begin(ssid, password);
28   Wifi.setSleep(false);
29
30   Serial.print(" * Conectando a Wifi");
31   while (Wifi.status() != WL_CONNECTED) {
32     delay(1000);
33     Serial.print(".");
34   }
35   Serial.println();
36
37   startCameraServer();
38 }
```

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 17

Código en el otro modulo del ESP32-WROOM-32 que envía datos térmicos desde el sensor MLX90640-BAA, programado en el Arduino IDE.

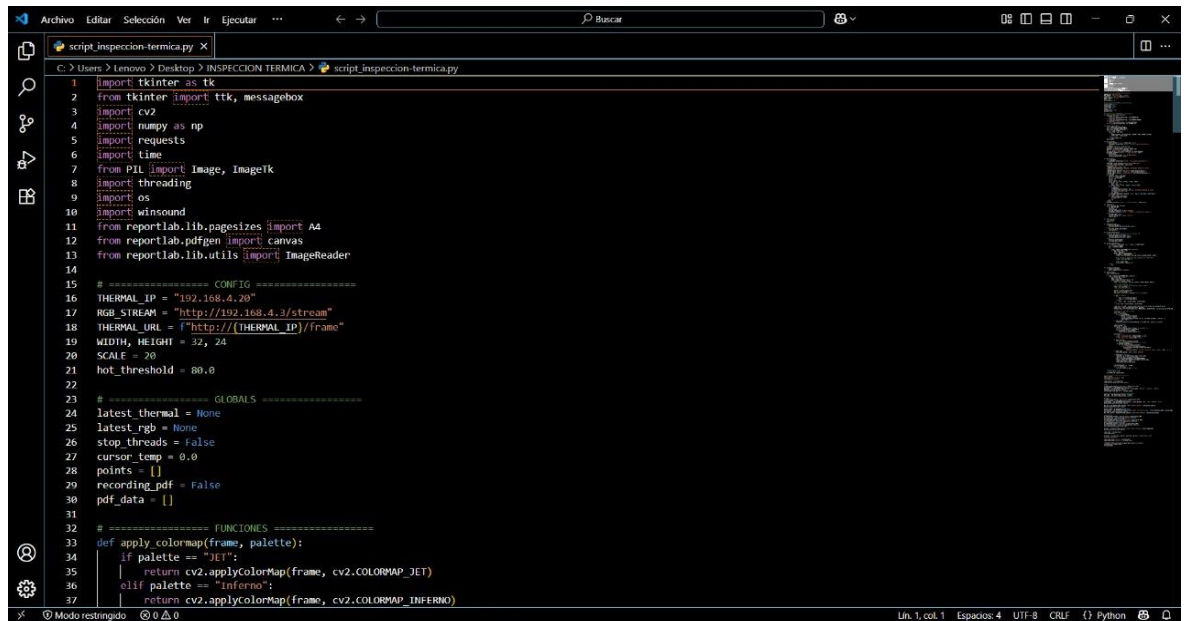


```
1 #include <WiFi.h>
2 #include <WebServer.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include "Adafruit_MLX90640.h"
5
6 // ===== CONFIG WIFI =====
7 const char* ssid = "TERMOGRAF_AP";
8 const char* password = "UN32025MR";
9
10 IPAddress local_IP(192, 168, 4, 20);
11 IPAddress gateway(192, 168, 4, 1);
12 IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);
13
14 WebServer server(80);
15
16 // ===== MLX90640 =====
17 Adafruit_MLX90640 mlx;
18 float frame[32 * 24]; // 32 x 24 pixeles = 768
19
20 // ===== SERVICIO JSON =====
21 void handleframeJSON() {
22   if (mlx.getframe(frame) != 0) {
23     server.send(500, "application/json", "{\"error\":\"sensor\"}");
24     return;
25   }
26
27   // Construir JSON manualmente (para no depender de otras lib)
28   String json = "{\"width\":32,\"height\":24,\"temperatures\":[";
29   for (int i = 0; i < 32*24; i++) {
30     json += String(frame[i], 2); // dos decimales
```

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18

El programa Python.



```
1 import tkinter as tk
2 from tkinter import ttk, messagebox
3 import cv2
4 import numpy as np
5 import requests
6 import time
7 from PIL import Image, ImageTk
8 import threading
9 import os
10 import winsound
11 from reportlab.lib.pagesizes import A4
12 from reportlab.pdfgen import canvas
13 from reportlab.lib.utils import ImageReader
14
15 # ===== CONFIG =====
16 THERMAL_IP = "192.168.4.20"
17 RGB_STREAM = "http://192.168.4.3/stream"
18 THERMAL_URL = f"http://{THERMAL_IP}/frame"
19 WIDTH, HEIGHT = 32, 24
20 SCALE = 20
21 hot_threshold = 80.0
22
23 # ===== GLOBALS =====
24 latest_thermal = None
25 latest_rgb = None
26 stop_threads = False
27 cursor_temp = 0.0
28 points = []
29 recording_pdf = False
30 pdf_data = []
31
32 # ===== FUNCIONES =====
33 def apply_colormap(frame, palette):
34     if palette == "JET":
35         return cv2.applyColorMap(frame, cv2.COLORMAP_JET)
36     elif palette == "Inferno":
37         return cv2.applyColorMap(frame, cv2.COLORMAP_INFERN0)
```

Nota. El script lo redactamos en visual studio code, que es un editor de código, para que el script funcione debe conectarse desde una PC al mismo AP que se conecta los ESP32-CAM, este script recibe los datos (stream + datos térmicos), el stream los muestra en un lado de la pantalla, y los datos térmicos los convierte en imagen térmica, haciendo una interpolación lineal; para que la imagen se pueda ver más grande, ya que el sensor solo nos da datos de una matriz de 32X24 pixeles. Ahí en ese script se ha programado la interface para que sea fácil de usar por cualquier usuario.

Fuente: Elaboración propia.

En la programación se incluyó:

- ✓ Selección de librerías en el Arduino IDE.
- WiFi-h
- Esp_camera.h
- Camera_pins.h
- App-httpd.h
- Webserver.h
- Wire.h

- Adafruit_MLX90640.h
- ✓ Selección de librerías en el Python
 - Tkinter
 - Ttk
 - Messagebox (parte de tkinter)
 - Cv2 (OpenCV)
 - Numpy
 - Requests
 - Time (modulo estandar)
 - PIL (Pillow)
 - Threading (modulo estandar)
 - Os (Modulo estandar)
 - Winsound (solo windows)
 - Reportlab

➤ **Prueba del funcionamiento de la cámara térmica con visión artificial**

La prueba comenzó en un entorno controlado, colocando la cámara térmica en el dron con la correa ajustada, uno de nosotros hace volar al dron y el otro compañero está pendiente en la laptop verificando la visión artificial y viendo el estado del transformador viendo si sus temperaturas sobrepasan el límite, en esta imagen se puede apreciar lo que realizamos en el campo.

Figura 19

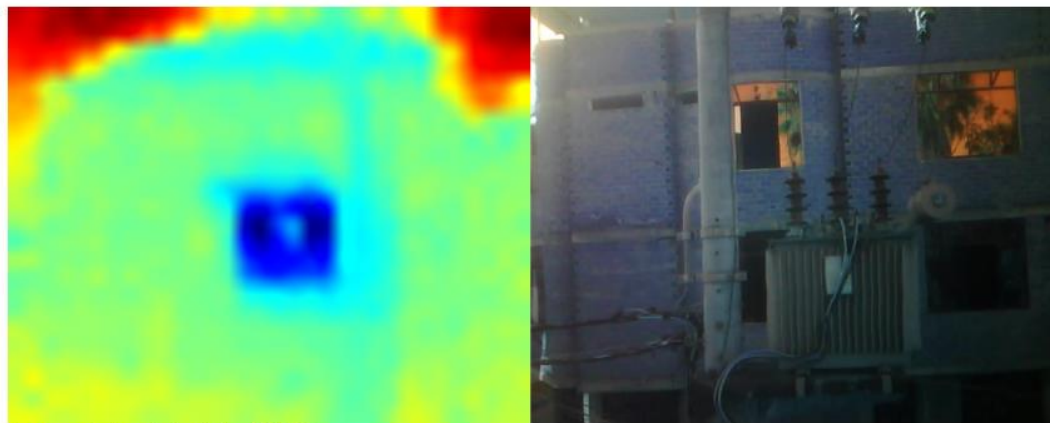
Inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 20

Fotografía de un transformador.



Temp. mínima detectada: 16.2 °C
Temp. máxima detectada: 41.8 °C
Temp. bajo cursor: 32.7 °C

Nota. Mediante la visión artificial logramos ver este transformador que está en un rango normal de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

C.- Evaluación técnica y económica del sistema implementado.

se evaluará el costo de implementación de este sistema, también se comparará el costo que conllevaría la inspección de transformadores con el sistema diseñado con respecto a realizar la inspección convencional para este trabajo, se evaluará si el proyecto es viable o no desde el punto de vista de la rentabilidad (VAN), también evaluaremos la tasa de rendimiento del proyecto, la viabilidad en función del tiempo que se tarde en recuperar la inversión (TIR). Tenemos como objetivo evaluar la factibilidad técnica y económica de realizar las inspecciones, incorporando una propuesta usando nuevas tecnologías.

El objetivo de esta evaluación es determinar la factibilidad técnica y económica de implementar un sistema innovador para la inspección de transformadores, incorporando nuevas tecnologías que permitan optimizar los procesos, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia general de las inspecciones.

III. RESULTADOS

3.1.- Desarrollar el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.

Se logró la correcta comunicación mediante el I²C, del sensor térmico MLX90640-BAA con el microcontrolador ESP32-WROOM-32, a pesar que tuvimos complicaciones al momento de vincularlo, pero si se pudo basándose profundamente a las características técnicas de cada componente. Tuvimos que unir las pistas del SER I2C para poder activar este tipo de comunicación con el sensor. Características de nuestra cámara térmica construida.

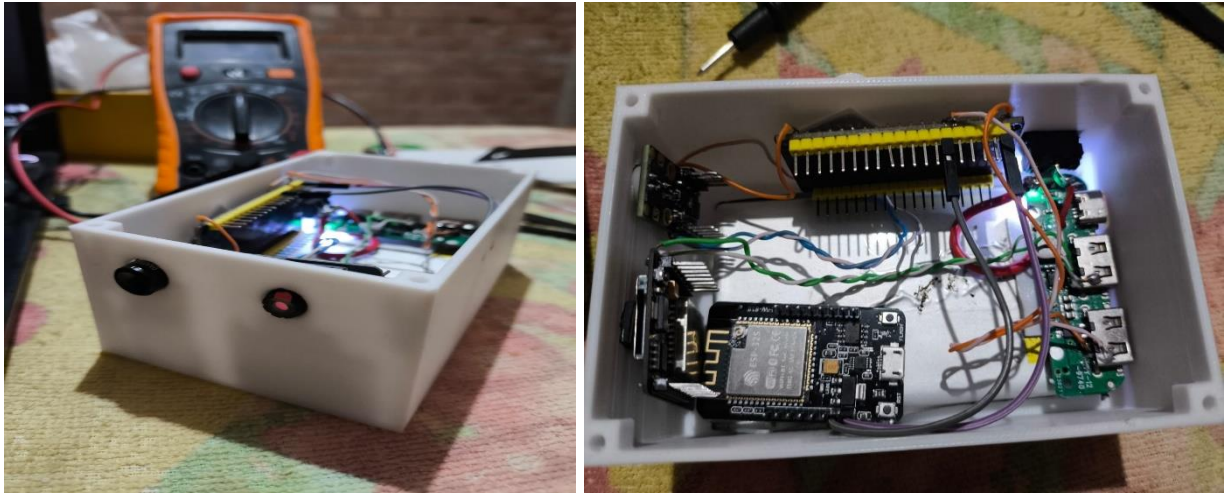
Tabla 6*Características de la cámara térmica.*

<i>Parámetro evaluado</i>	<i>Resultado obtenido</i>	<i>Observaciones</i>
<i>Peso total del sistema</i>	190 g	Incluye sensor infrarrojo, dos módulos ESP32-CAM y Batería Power Bank.
<i>Resolución Térmica</i>	32 x 24 pixeles	Suficiente para diferenciar zonas de calor en transformadores.
<i>Campo de visión (FOV)</i>	55° x 35°	Adecuado para inspecciones a corta y media distancia.
<i>Velocidad de transmisión</i>	Menos de 300 ms de latencia	Fluido para visualización en tiempo real.
<i>Autonomía de alimentación</i>	Dura 5 horas	Con Power Bank de 10,000 mAh.
<i>Altura de vuelo recomendado</i>	5 m – 8 m	Buen equilibrio entre detalle térmico y estabilidad de imagen.
<i>Estabilidad en vuelo</i>	Sin vibraciones notables	Estructura 3D bien fijada al dron DJI Mini 4K Fly More.
<i>Protocolos de comunicación</i>	I ² C (sensor MLX90640-BAA) y Wi-Fi (transmisión).	Funcionamiento estable sin pérdidas de señal.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21

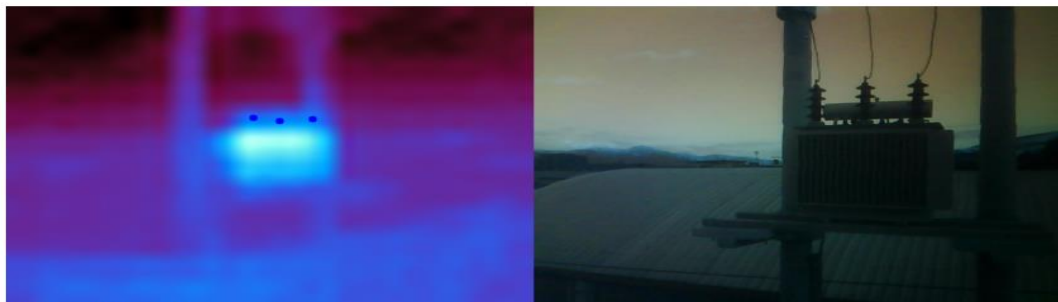
El sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

Fotografía capturada de un transformador mediante la visión artificial.



Temp. mínima detectada: 14.2 °C
Temp. máxima detectada: 44.4 °C
Temp. bajo cursor: 41.4 °C
Punto 1: 37.7 °C
Punto 2: 42.0 °C
Punto 3: 39.4 °C

Nota. Las imágenes térmicas mediante la visión artificial se enfocan con profundidad donde caliente más, dependiendo de la temperatura más caliente del transformador. También al sistema se programó unos puntos manuales, para ver las líneas o fusibles de cuanto es su temperatura, para una buena inspección.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.- Poner en funcionamiento el sistema para inspección aérea de transformadores eléctricos con visión artificial.

3.2.1.- Validación de funcionamiento del sistema.

Se realizaron cuatro pruebas de validación de temperatura con el propósito de comprobar la exactitud de la medición del sensor térmico del sistema desarrollado. Para ello, se utilizó dos multímetros con función de medición de temperatura, tomando dos puntos de referencia. La prueba consistió en encender la motocicleta para que el motor se caliente y podamos medir la temperatura, empleando un multímetro independiente en cada punto de medición. Se comparó dicho valor con la lectura simultanea de la cámara térmica conectada al sistema de inspección. Esta prueba permite verificar la calibración de la cámara térmica y validar su comportamiento frente a una temperatura conocida (**ver anexos**).

Pruebas

Para las pruebas de medición se usaron los siguientes elementos:

- ❖ Cámara térmica
- ❖ 02 multímetros con termómetro termopar
- ❖ Una motocicleta (la cual fue el objeto de medición)

la medición consistió en medir en dos puntos diferentes y a 4 distancias, 1 metro, 1.5 metros, 2 metros y 2.5 metros, después verificamos las diferencias entre las lecturas de los termómetros con las de la cámara y se calculó su error.

Tabla 7*Prueba de validación de la cámara térmica*

Pruebas	Distancias (m)	Punto 1			Punto 2		
		Temperatura Multímetro	Temperatur a del sistema	Error	Temperatur a Multímetro	Temperatur a del sistema	Error
1	1	87	86.7 °C	0.34 %	51	50.6 °C	0.78%
2	1.5	87	86.0 °C	1.14%	51	49.9 °C	2.15%
3	2	87	85.2 °C	2.06%	51	49.0 °C	3.92%
4	2.5	87	84.7 °C	2.64%	51	48.5 °C	4.09%

Nota. Las distancias tomadas se le empleo nomas a la cámara térmica, en la cual se realizaron las inspecciones de los transformadores en la ciudad de Jaén.

Después de realizar las pruebas se observó un error porcentual aceptable en el punto de medición número 1, pero en el punto de medición número 2 fue un poco más notable, y esto debido a la imagen térmica del objeto, ya que el primero se situaba en el motor y el segundo en el tubo de escape de este, concluyendo que mientras menor sea el tamaño del objeto a medir mayor será el error de lectura del sensor debido al número reducido de pixeles que posee en comparación a cámaras térmicas industriales, pero aun así si es apto para el propósito creado dado que los transformadores que se inspeccionaron fueron de gran tamaño en comparación con el objeto usado para las pruebas.

Durante la prueba, se registró la temperatura del motor en distintos puntos mediante dos multímetros digital, tal como se muestra.

Figura 23

Lecturas del motor de la motocicleta



Las temperaturas medidas con los multímetros no varían y estas son:

Punto 1: 87 °C

Punto 2: 51°C

Figura 24

Prueba con la cámara



Temperaturas:

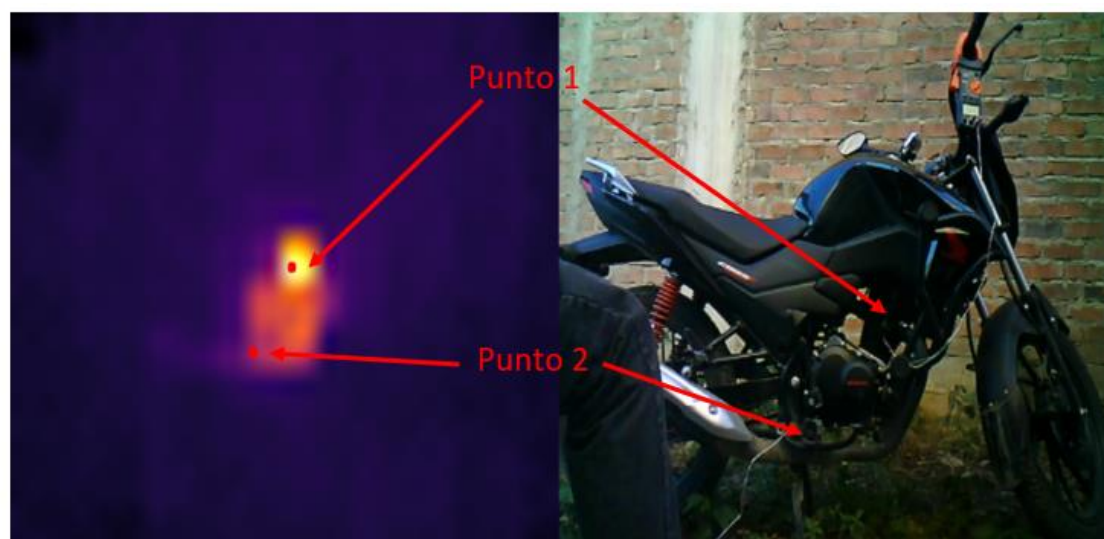
Punto 1: 86.7 °C

Punto2: 50.6 °C

Nota. Prueba 01 a un 1 metro de distancia.

Figura 25

Prueba con la cámara



Temperaturas:

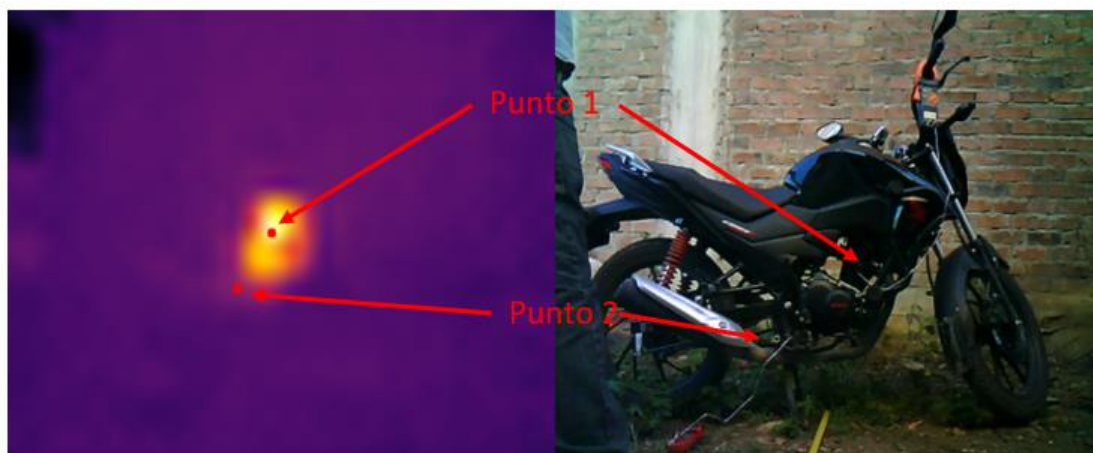
Punto 1: 86.0 °C

Punto2: 49.9°C

Nota. Prueba 02 a un 1.5 metro de distancia.

Figura 26

Prueba con la cámara



Temperaturas:

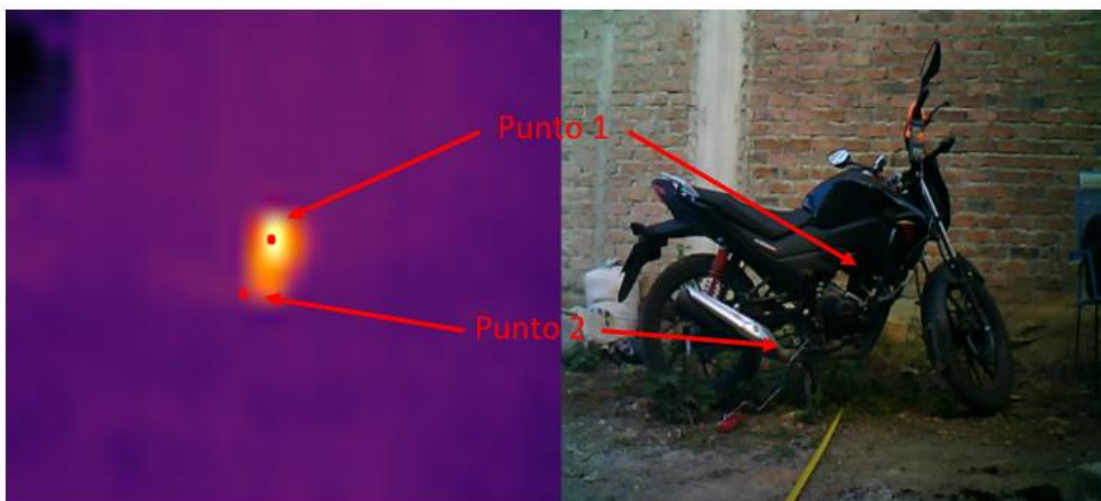
Punto 1: 85.2 °C

Punto2: 49.0°C

Nota. Prueba 03 a 2 metros de distancia.

Figura 27

Prueba con la cámara



Temperaturas:

Punto 1: 84.7 °C

Punto2: 48.5°C

Nota. Prueba 04 a 2.5 metros de distancia.

EJECUCIÓN DE PRUEBAS

Se realizaron las pruebas para la inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén. Se le realizó la inspección a cinco transformadores en las cuales logramos obtener que está en perfecto estado, debido que los transformadores están en un rango normal de temperatura, el mismo sistema de la plataforma nos detalla el informe de que las imágenes tomadas al transformador están en un rango normal (Ver anexos).

El Dron fue pilotado de manera manual a una altura de 5 m a 8 m, manteniendo una distancia segura de los equipos eléctricos. El módulo ESP32-CA M transmitió imágenes en tiempo real a través del Wi-Fi, mientras que el sensor MLX90640-BAA, genera imágenes de temperatura con una resolución de 32 x 24 píxeles, suficiente para detectar variaciones térmicas significativas en los transformadores y luego visualizadas en la laptop.

Basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2, la temperatura ambiente en Perú oscila entre 30 °C y 40 °C, la temperatura normal de operación de un transformador eléctrico se encuentra dentro del rango de 70 °C a 100 °C (en aceite), sin que se considere sobrecalentamiento. Solo si los valores superan los 110 °C – 120 °C, se considera una condición anormal que requiere inspección o mantenimiento correctivo. (marcoz, 2018)

Por último los resultados demostraron que la inspección aérea de transformadores por imágenes térmicas con visión artificial en la ciudad de Jaén; son capaz de realizar inspecciones rápidas y seguras, reduciendo el tiempo de evaluación por transformador a menos de 8 minutos. Asimismo, se evitó la necesidad de contacto físico con los equipos, disminuyendo el riesgo para el personal técnico y sin necesidad de que corten la línea energética para ser una inspección de transformadores. Cada corte de energía eléctrica es una pérdida para la empresa eléctrica. A continuación, se mostrarán las siguientes coordenadas, donde hicimos las inspecciones de los transformadores en las calles de Jaén:

- ✓ **Trafo N.º 1:** 05°42'03.39"S 78°48'07.8"W - En el mercado Amojú.
- ✓ **Trafo N.º 2:** 05°41'58.79"S 78°48'14.77"W – En la Calle Contribuyo.
- ✓ **Trafo N.º 3:** 05°42'04.16"S 78°48'23.1"W – En la calle el sol.
- ✓ **Trafo N.º 4:** 05°41'28.53"S 78°48'24.64"W - En la calle Paracas, Urb. Nueva Villa
- ✓ **Trafo N.º 5:** 05°41'58.48"S 78°48'26.86"W - En la calle Chinchaysuyo.

Figura 28

Los cinco transformadores inspeccionados en la ciudad de Jaén.



Fuente: Elaboración propia.

Trafo N.º 1

Figura 29

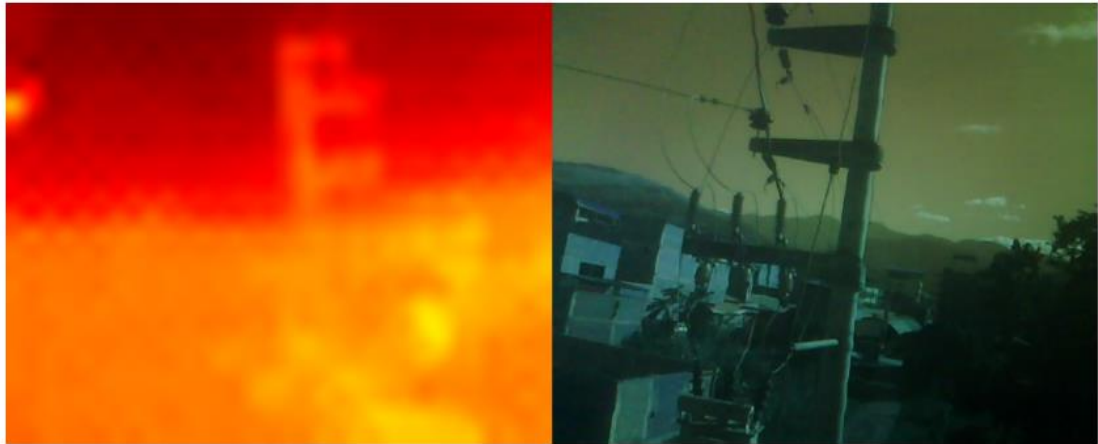
Inspección del transformador cerca del Mercado Amojú, en la ciudad de Jaén.



Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Fotografía capturada de un transformador mediante la visión artificial
Transformador cerca del Mercado Amojú.



Temp. mínima detectada: 9.9 °C
Temp. máxima detectada: 38.7 °C
Temp. bajo cursor: 13.9 °C

Nota. En la fotografía térmica se puede apreciar al transformador que su temperatura está en perfecto estado, basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2; cerca del mercado Amojú. La temperatura máxima (38.7 °C) se enfoca en el transformador, La temperatura mínima (9.9 °C) es menos acá porque no hay firmamento y la temperatura baja cursor (13.9 °C) es cuando enfocas en la parte donde tú quieras.

Fuente: Elaboración propia.

Trafo N.º 2

Figura 31

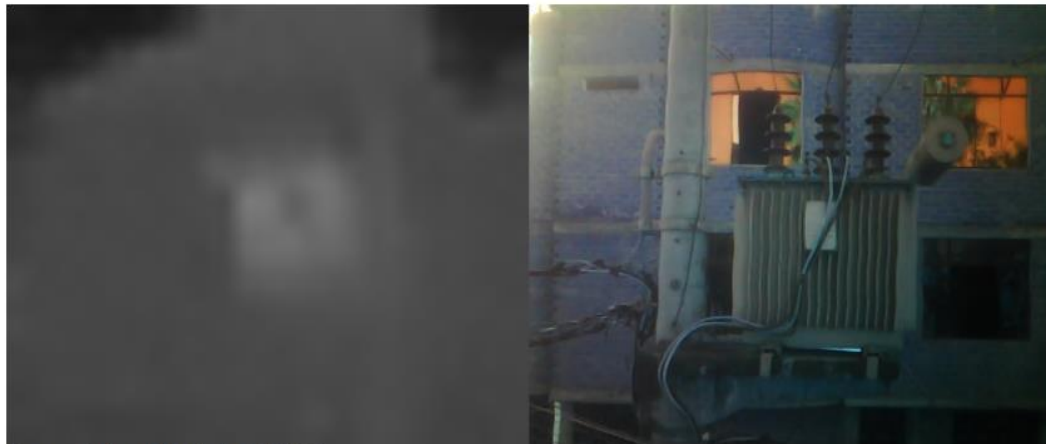
Inspección del transformador en la calle Contisuyo en la ciudad de Jaén.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32

Transformador de la calle Contisuyo.



Temp. mínima detectada: 17.2 °C

Temp. máxima detectada: 42.5 °C

Temp. bajo cursor: 29.3 °C

Nota. Otro transformador que está en perfecto estado, basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2; debido a su rango normal de su temperatura, en la calle Contisuyo. La temperatura máxima (42.5 °C) se enfoca en el transformador, La temperatura mínima (17.2 °C) es menos acá pero no tan bajo porque aquí si hay firmamento y la temperatura bajo cursor (29.3 °C) es cuando enfocas en la parte donde tú quieras.

Fuente: Elaboración propia.

Trafo N.º 3

Figura 33

Inspección del transformador en la calle el sol, en la ciudad de Jaén.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34

Transformador en la calle el sol.



Temp. mínima detectada: 13.9 °C

Temp. máxima detectada: 43.3 °C

Temp. bajo cursor: 43.8 °C

Nota. Se puede apreciar en la fotografía térmica que el transformador está en perfecto estado, basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2; Donde las temperaturas que nos vota el sistema, en la calle el sol. La temperatura máxima (43.3 °C) se enfoca en el transformador, La temperatura mínima (13.9 °C) es menos acá porque no hay firmamento y la temperatura baja cursor (43.8) es cuando enfocas en la parte donde tú quieras

Fuente: Elaboración propia.

Trafo N.º 4

Figura 35

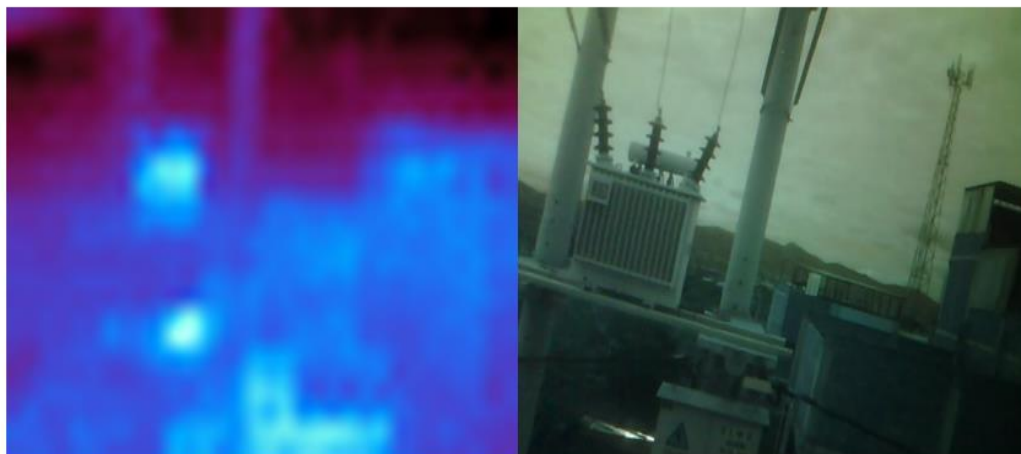
Inspección aérea del transformador por imagen térmica con visión artificial, en la calle Paracas, Urb. Nueva Villa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36

Transformador de la calle Paracas, Urb. Nueva Villa.



Temp. mínima detectada: 14.1 °C

Temp. máxima detectada: 32.7 °C

Temp. bajo cursor: 28.6 °C

Nota. Imagen Térmica del transformador de la calle Paracas, Urb. Nueva Villa, la temperatura está en rango normal, basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2. La temperatura máxima (32.7 °C) se enfoca en el transformador, La temperatura mínima (14.1 °C) es menos acá porque no hay firmamento y la temperatura baja cursor (28.6 °C) es cuando enfocas en la parte donde tú quieras.

Fuente: Elaboración propia.

Trafo N.º 5

Figura 37

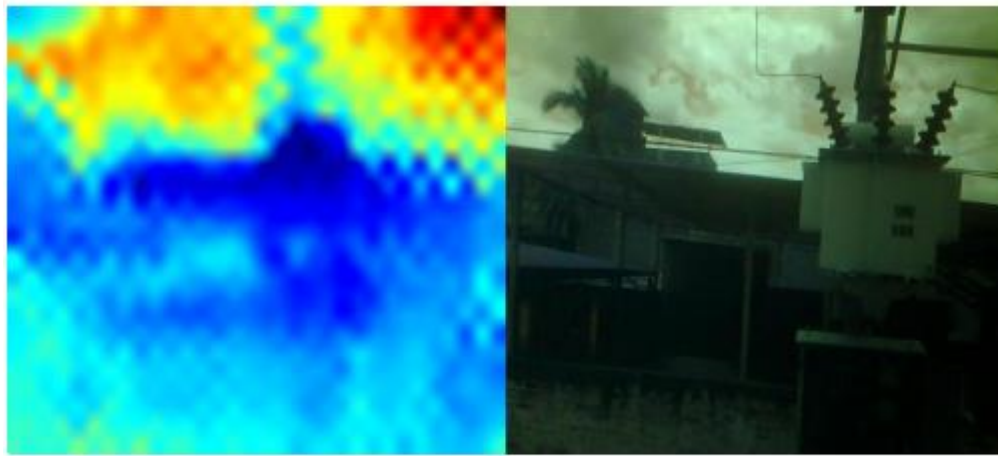
Inspección aérea del transformador por imagen térmica con visión artificial, en la calle Chinchaysuyo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38

Transformador de la calle Chinchaysuyo.



Temp.minima detectada: 16.8°C

Temp.maxima detectada: 45.5 °C

Temp.bajo cursor: 27.6 °C

Nota. Imagen Térmica del transformador de la calle Chinchaysuyo, la temperatura está en rango normal, basándose a las normas internacionales de la norma IEC 60076-2. La temperatura máxima (45.5 °C) se enfoca en el transformador, La temperatura mínima (16.8 °C) es menos acá pero no tan bajo porque aquí si hay firmamento y la temperatura baja cursor (27.6 °C) es cuando enfocas en la parte donde tú quieras.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.- Realizar una evaluación técnica y económica del sistema implementado.

EVALUACIÓN TÉCNICA

La evaluación técnica tuvo como finalidad comprobar el funcionamiento y rendimiento del sistema de inspección aérea de transformadores mediante imágenes térmicas y visión artificial. El prototipo está conformado por un sensor MLX90640-BAA, un ESP32, un ESP32-CAM, otro ESP32-CAM, un dron DJI Mini, una Power ban como fuente de energía; y el interruptor mini switch de 2 pines para encender y apagar.

Se realizaron pruebas de validación de temperatura con el propósito de comprobar la exactitud de la medición de la cámara térmica desarrollada. Para ello, la medición consistió en medir en dos puntos diferentes y a 4 distancias, 1 metro, 1.5 metros, 2 metros y 2.5 metros, después verificamos las diferencias entre las lecturas de los termómetros con las de la cámara y se calculó su error. Esta prueba permite verificar la calibración de la cámara térmica y validar su comportamiento frente a una temperatura conocida. Por lo tal la cámara térmica demostró ser técnicamente viable, logrando capturar imágenes térmicas y visualizar con buena precisión y estabilidad. Además, representa una alternativa eficiente y de bajo costo para la detección temprana de anomalías térmicas en transformadores eléctricos. concluyendo también que mientras menor sea el tamaño del objeto a medir mayor será el error de lectura del sensor debido al número reducido de píxeles que posee en comparación a cámaras térmicas industriales, pero aun así si es apto para el propósito creado dado que los transformadores que se inspeccionaron fueron de gran tamaño en comparación con el objeto usado para las pruebas.

Implementar la termografía para las inspecciones de los transformadores eléctricos ofrece los siguientes beneficios como:

- ❖ Inspeccionar los transformadores eléctricos sin cortar el servicio eléctrico, lo cual no afecta a los usuarios por lo que garantiza la continuidad del servicio y además no genera pérdida a la empresa concesionaria.
- ❖ Al ser una inspección aérea el personal que realiza la inspección no estará expuesto a ningún accidente laboral dado que la inspección se realiza usando un dron y el personal no tendrá riesgo en las alturas y no tendrá contacto con el sistema energizado.
- ❖ Detección temprana de posibles fallos en los transformadores eléctricos.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

A) FORMULA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El VAN es un indicador de cuanto se va a ganar o perder en la inversión de un proyecto. Para que el proyecto sea rentable el VAN debe ser positivo, por lo contrario, si fuese negativo indica que no se debe invertir en dado proyecto. (ceupe, 2025)

$$VAN = \sum_{n=0}^n \frac{F_n}{(1+r)^n} - inversion\ inicial \dots\dots\dots (1)$$

F_n : Flujo de caja

n : numero de periodos

r : tasa de interés o costo de capital

B) FORMULA DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La TIR representa el rendimiento porcentual esperado de una inversión, la TIR deberá ser mayor a la tasa de retorno para que el proyecto sea rentable, si es igual significa que la inversión es indiferente y dependerá de otros factores para llegar a ser rentable, si es inferior quiere decir que el proyecto no es viable. (Walls treet Prep, 2025)

$$0 = \sum_{n=0}^n \frac{F_n}{(1+TIR)^n} \dots\dots\dots (2)$$

F_n : Flujo de caja

n : numero de periodos

C) ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONÓMICA Y FINANCIERA

Tabla 8

Costos de componentes necesarios para este proyecto.

Componente	Cantidad	Costo unitario	total
Dron dji mini 4k	01	S/.2148	S/.2148
Esp32 dev kit v1	01	S/.36	S/.36
Esp32 cam	02	S/.75	S/150
GY-MCU90640	01	S/.136	S/.136
Cable de conexión Dupont	01	S/.10	S/.10
hembra-hembra			
Impresión 3d de gabinete y soporte	01	S/.200	S/.200
Pernos Allen	06	S/.5	S/.30
Batería de 10000mah	01	S/.40	S/.40
Implementación	01	S/.1,500	S/.1,500
			S/.4,250

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a nuestras investigaciones se sabe que, en la ciudad de Jaén la empresa concesionaria encargada de administrar la energía eléctrica no realiza análisis termográfico a sus transformadores, por lo tanto el análisis económico se hará como propuesta de implementación por parte de alguna de las empresas colaboradoras de la concesionaria, las cuales están encargadas del área de distribución, por lo tal les sería beneficioso implementar un sistema termográfico en los trabajos de inspección de sistemas eléctricos.

Según indicado, por otras empresas (IEHHCA y INTEGRASMART) fuera del Perú, que brindan el servicio termográfico tiene un costo que va desde S/. 500 a S/. 3,000. Para nuestro análisis económico consideramos el valor mínimo de S/. 500.

La empresa que adquiera este sistema de inspección podrá realizar inspecciones térmicas tanto de transformadores y de sus sistemas eléctricos en cualquier momento que lo requieran o crea necesario. Se estima que realizamos un promedio de 10 inspecciones al año como mínimo, la tasa de interés sería del 10%, tomando

en cuenta el costo de adquisición de este sistema y un costo de capacitación de su personal se procede a calcular el VAN y TIR.

Si la empresa adquiere este sistema el ahorro por no contratar el servicio, se considera como un ingreso para nuestro análisis económico.

Costos:

- ❖ Adquisición del equipo S/. 4,250 (gasto único)
- ❖ Capacitación al personal S/. 600 (gasto único)

No se considera gasto de operador y transporte

Inversión inicial

$$\diamond 4,250 + 600 = \mathbf{4,850}$$

Ingreso por año:

10 inspecciones al año X S/. 500 = S/. 5, 000.

Tabla 9

Datos del sistema implementado.

Año	0	1	2	3	4	5
Fujo de caja	-4850	5000	5000	5000	5000	5000
TASA DE DESCUENTO (i)	10%					

Fuente: Elaboración propia.

VAN= S/.14,103.93

TIR= 99.86%

El año de recuperación de la inversión sería en el primer año según las proyecciones descritas anteriormente.

IV.- DISCUSIÓN

Durante la implementación del sistema se logró establecer una comunicación estable mediante el protocolo I²C entre el sensor térmico MLX90640-BAA (32 x 24 píxeles) y el microcontrolador ESP32-WROOM-32. Este resultado fue uno de los más relevantes, ya que al inicio se presentaron algunas dificultades para vincular correctamente ambos dispositivos, principalmente por la configuración de las líneas de datos y la sensibilidad del protocolo frente a interferencias. La solución se consiguió tras analizar cuidadosamente las especificaciones técnicas de cada componente, lo que permitió identificar la necesidad de unir las pistas del bus SDA y SCL para mejorar la lectura de los datos térmicos. Esta experiencia evidencio la importancia de conocer en detalle el hardware con el que se trabaja, ya que una correcta configuración garantiza la compatibilidad y el desempeño del sistema. Con estas adaptaciones, el sensor térmico pudo funcionar de manera adecuada, permitiendo obtener mediciones confiables para la inspección aérea. Asimismo, en comparación con Nieto Del amor (2018) en su trabajo de investigación “diseño de cámara térmica IR de bajo costo basada en microcontrolador”. Desarrollo un sistema de cámara térmica, utilizando un microcontrolador Arduino y el sensor térmico AMG 8833 (8 x 8 píxeles) para su desarrollo, logrando su comunicación mediante protocolo I2C y una pantalla TFT, las imágenes se visualizan en tiempo real, en comparación a nuestro sistema implementado, el sensor usado para nuestro sistema presenta una ventaja al tener mayor cantidad de pixeles, esto representa una mayor resolución en los detalles de imágenes.

Primero se hicieron pruebas de validación de temperatura, con el propósito de comprobar la exactitud de la medición del sensor térmico del sistema desarrollado. Después de realizar las pruebas se observó un error porcentual aceptable en el punto de medición número 1, pero en el punto de medición número 2 fue un poco más notable, y esto debido a la imagen térmica del objeto, ya que el primero se situaba en el motor y el segundo en el tubo de escape de este, concluyendo que mientras menor sea el tamaño del objeto a medir mayor será el error de lectura del sensor debido al número reducido de pixeles que posee en comparación a cámaras térmicas industriales, pero aun así si es apto para el propósito creado dado que los transformadores que se inspeccionaron fueron de gran

tamaño en comparación con el objeto usado para las pruebas. Por lo tal la cámara térmica demostró ser técnicamente viable, logrando capturar imágenes térmicas y visualizar con buena precisión y estabilidad. Se inspeccionaron los cinco transformadores eléctricos en la ciudad de Jaén y se registraron temperaturas de 38.7 °C, 42.5 °C, 43.3 °C, 32.7 °C y 45.5 °C, todas dentro del rango normal de funcionamiento, establecido entre 70 °C y 100 °C según los manuales técnicos del sector eléctrico. Estos resultados reflejan que el sistema tiene la capacidad de detectar variaciones térmicas en los equipos y verificar su estado operativo sin necesidad de realizar inspecciones manuales o interrumpir el servicio eléctrico. Alava (2020). En su tesis “Diagnostico Visual-Térmico en Sistemas Eléctricos de Subtransmisión y Distribución con el uso de Drones para Efectuar Mantenimientos”. Entre los resultados obtuvieron que detectó puntos calientes entre 31 °C y 88.6 °C en componentes de distribución eléctrica utilizando cámara FLIR instaladas en drones. En ambos casos, las variaciones térmicas se ubicaron en rangos que permiten identificar anomalías sin comprometer la integridad de los equipos, confirmando la efectividad de la termografía infrarroja como herramienta de diagnóstico preventivo.

La evaluación técnica muestra que la integración de el dron, visión artificial y sensor térmico constituye un sistema eficiente y segura para la inspección de transformadores eléctricos. Su aplicación reduce los riesgos del personal, optimiza el tiempo de trabajo y evita cortes en el suministro de energía. En el aspecto económica, se consideró si alguna empresa requiera el equipo, el proyecto va ser rentable, con un VAN 14,103.93, un TIR de 99.86% superior al 10% utilizado. La empresa tendrá un ahorro de S/. 500 por cada inspección que realiza, lo cual confirma la viabilidad económica del proyecto. Paul (2022) en su proyecto titulado “Identificación de fallas en los aisladores de una línea de transmisión mediante visión artificial”. En el análisis económico obtuvo un VAN del 329.49 y un TIR 14% lo que les reflejo un proyecto rentable.

V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- CONCLUSIONES

- Se logró la implementación con éxito el sistema de inspección aérea de transformadores eléctricos mediante el uso de visión artificial y la termografía, integrando el sensor térmico MLX90640-BAA con el microcontrolador ESP32-WROOM a través del protocolo I²C, superando las dificultades iniciales mediante modificaciones de hardware que garantizaron una comunicación estable y confiable.
- Se demostró que el sistema es capaz de inspeccionar transformadores de manera rápida (de ocho minutos por equipo aproximado), segura y sin interrupciones de la energía eléctrica, gracias a la transmisión de imágenes en tiempo real por el ESP32-CAM y el sensor MLX90640-BAA en comunicación con el ESP32-WROOM-32, con resolución suficiente para detectar variaciones de temperaturas relevantes.
- El proyecto mostro ser preciso, confiable y rentable. La cámara térmica presento un margen mínimo de error, validando su buen desempeño. Económicamente, la inversión inicial de S/.4,850 se recupera en el primer año, con un VAN de S/. 14,103.93 y una TIR de 99.86%. En conclusión, el sistema es una alternativa técnica y económicamente viable para el monitoreo seguro y eficiente de transformadores eléctricos sin interrumpir el servicio energizado.
- El sistema desarrollado representa una alternativa innovadora y eficiente para la inspección de transformadores eléctricos en la ciudad de Jaén. Su implementación demuestra que es posible sustituir las inspecciones convencionales por un método automatizado basado en visión artificial, reduciendo riesgos laborales. Además, contribuye a la modernización del mantenimiento preventivo en redes eléctricas, evitando interrupciones del servicio y pérdidas económicas.

5.2.- RECOMENDACIONES

- Si alguien quiere poner en práctica este proyecto se recomienda utilizar un sensor térmico de mayor capacidad para una imagen más clara y con mayor alcance de longitud para mejores capturas de datos en zonas inaccesibles para el dron.
- Se recomienda realizar los análisis termográficos en horas de la mañana o tarde donde la incidencia del sol no altere los datos térmicos reales.
- Para reducir los costos de implementación de este método usado, se puede optar por sustituir el dron por una pértiga de fibra de vidrio para elevar el módulo de inspección térmica.
- Para las inspecciones se recomienda personal capacitado, para poder usar el script de visualización y reporte de análisis; mientras alguien manipula el módulo de termografía.

V.I.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Varas Alava, J. A. (2022). *Diagnóstico visual-térmico en sistemas eléctricos de subtransmisión y distribución con el uso de drones para efectuar mantenimientos*. [Tesis de título profesional, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Ecuador]. Repositorio institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22503/>
- Bcnvision, G. (18 de agosto de 2023). *La revolución de la automatización industrial gracias a la visión artificial*. <https://bcnvision.es/blog-vision-artificial/la-revolucion-de-la-automatizacion-industrial-gracias-a-la-vision-artificial/>
- Calle Cadme, A. C. (2022). *Detención de fallas en bajantes de transformadores de distribución, mediante el análisis DEEP LEARNING, en imágenes termográficas*. [Tesis de título profesional, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador]. Repositorio institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21911/1/UPS-CT009579.pdf>
- Ceupe. (20 de mayo de 2025). *Que es el VAN*. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-el-van.html>
- DJI Arenales. (10 de marzo de 2025). *DJI Mini 4K Fly More Combo*. https://prizmadrones.pe/tienda/foto-video/mavic-mini/dji-mini-4k-fly-more-combo/?gad_source=1&gad_campaignid=8160799562&gbraid=0AAAAACwj7EUPY8rFgCCJcfvDxht13imBp&gclid=CjwKCAjwjffHBhBuEiwAKMb8pHQL EJ5WUCbVRLmGyxXeASzwtUFo5iICc42wWQUvNAoi-Zb9ei_f6hoCw2sQAvD
- DJI Perú. (15 de Junio de 2025). *DJI Perú*. https://dji.pe/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=pmax&utm_term=aon&utm_content=home_page&utm_term=&utm_campaign=DJI_en_e25_google_pmax_standar_ecom_aon_conversiones_purchase_general&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=4717308611&hsa_cam=
- Electromanía. (03 de marzo de 2025). *Cable Dupont macho-hembra 10 cm*. <https://www.electromania.pe/producto/cable-dupont-macho-hembra-10cm/>

- ELECTRONIFY INDIA. (22 de Febrero de 2025). *Características y aplicaciones*. <https://www.electronifyindia.com/blogs/news/esp32-wroom-32-features-applications-everything-you-need-to-know>
- Vilca Choque, E. H. y Chura Quispe, O. A. (2021). *Inspección preventiva mediante el uso del vehículo aéreo no tripulado (drone), para evitar interrupciones del suministro de energía en los elementos del sistema de distribución*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Del Altiplano De Puno, Perú]. Repositorio institucional UNA. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/15408/Vilca_Elisan_Chura_Oliver.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- INGEODRONE. (2024). *Drones y Sostenibilidad*. Aplicaciones para un futuro sostenible. <https://ingeodrone.es/drones-y-sostenibilidad-aplicaciones/>
- Ja-Bots.com. (11 de Marzo de 2025). *Mini switch de 2 posiciones y 2 pines*. https://ja-bots.com/producto/mini-switch-2-posiciones-2-pines/?srsltid=AfmBOor3Lx2JKph34LRli98W7qEMhIy2MtRyZ7zAatungfovm3_4hHxJ
- Llamas , J. (01 de agosto de 2020). *Investigación tecnológica*. Economipedia. https://economipedia.com/definiciones/investigacion-tecnologica.html#google_vignette
- Marcoz. (17 de octubre de 2018). *EETT de transformadores de distribución*. <https://www.else.com.pe/else/media/1169/eett-de-transformadores-de-distribuci%C3%B3n-15122017.pdf>
- Mata Solis, L. D. (21 de mayo de 2019). *El enfoque cuantitativo de investigación*. Investigalia. <https://investigaliacr.com/investigacion/el-enfoque-cuantitativo-de-investigacion/>
- Mechatronics Laboratory. (20 de febrero de 2025). *Modulo ESP32-CAM*. <https://mtlab.pe/producto/modulo-esp32-cam/?srsltid=AfmBOorpXQKWRhvanB6m8wQuwSZhwnWOW7oGRzdOilMHToqmThfQNF70>

- Mesajil.com. (14 de Marzo de 2025). *Batería externa portátil Energizer Power Bank mAh 10.5 W*. https://mesajil.com/producto/bateria-externa-portatil-energizer-power-bank-10000mah-10-5w/?srsltid=AfmBOooAFH88HIx_R6bVUJaUHEsiwpHsC8LNtnCXCPokMmmLX0ua4Kdy
- Ministerio de Energías y Minas. (2023). *Prospectiva del Sector Electrico a Nivel Nacional*. <https://www.minem.gob.pe/download.php?idTitular=10356>
- Ministerio de Energías y Minas. (14 de Mayo de 2023). *Más de 131 mil pobladores de nueve provincias de Cajamarca se favorecerán con obras de electrificación rural*. gob.pe. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/756905-mas-de-131-mil-pobladores-de-nueve-provincias-de-cajamarca-se-favoreceran-con-obras-de-electrificacion-rural>
- Naylamp Mechatronics. (10 de Junio de 2025). *Tienda Naylamp Mechatronics* . <https://naylampmechatronics.com/>
- Nieto Del amor , F. (2018). *Diseño de cámara térmica IR de bajo coste basada en microcontrolador*. [Trabajo fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, España]. Repositorio institucional UPV. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/9be3e98f-907c-49b5-9653-59da7ed57329/contentt>
- OECD. (2018). *Manual de Frascati 2015*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/es/publications/reports/2015/10/frascati-manual-2015_g1g57dcb/9789264310681-es.pdf
- Núñez Ortega, J. E. (2021). *Deteccion visual automatica de cadena de aisladores dañadas en lineas de transmision a travez de imagenes aéreas*. [Tesis para obtener el grado de licenciado en ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México]. Repositonrio Institucional UAEM. <https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/4145>
- Huallpa Palomino, R. (2020). *Aplicacion del sistema de aeronave pilotada a distancia para optimizar la supervision del alimentador electrico de ingenio-Electrocentro*

- S.A. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú Sede Huancayo]. Repositorio Institucional UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a978bfca-e4ad-4c4e-8406-fec17ab3a728/content>
- Astudillo Cortez, V. P. (2022). *Identificación de fallas en los aisladores de una línea de transmisión mediante visión artificial*. [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Cotopaxi Dirección de Posgrado del Latacunga, Ecuador]. Repositorio Institucional UTCDP. <https://repositorio.utcdp.edu.ec/handle/27000/8801>
- RCDrone. (18 de febrero de 2025). RCDrone. <https://rcdrone.top/es/pages/about-us>
- Segura Requejo, M. (2018). *Diseño de estructura soporte de cámara termográfica de un dron-hexarotor para optimizar tiempo de inspección de sistemas de distribución eléctrica-HERZAB-S.A.C.* [Tesis de título profesional, Universidad César Vallejo sede en Chiclayo, Perú]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/31664/Segura_RM.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rui,T.p.(15 de Mayo de 2025). Alibaba. https://www.alibaba.com/?src=sem_ggl&field=UG&from=sem_ggl&cmpgn=22231466799&adgrp=178850966310&fditm=&tgt=kwd-14739453&locintrst=&locphyscl=1011111&mtchtyp=e&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=732977722035&plcmnt=&plcmntcat=&aceid=&position=&gclid_source=1&
- Rivas Sullcaccori, M. L. y Okawara Contreras, I. D. (Octubre de 2023). *Diseño e implementación de un dron VTOL con estación de control para medición de variables atmosféricas*. [Tesis de título profesional, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional UTP. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8001>
- Supo, J. (02 de Abril de 2023). *Niveles de investigación*. BIOESTADISTICO. <https://bioestadistico.com/niveles-de-investigacion>
- Diconor. (24 de abril de 2022). Tienda Diconor. https://horarios.pe/0855755/Diconor_EIRL#google_vignette

El Dial. (20 de Julio de 2025). *Tienda El Dial*. <https://www.waze.com/es/live-map/directions/pe/cajamarca/jaen/el-dial-y-diaz-y-lino-distribuciones?to=place.ChIJzySIMHv7tJERjw71Q6hjQkg>

WallS treet Prep. (1 de abril de 2025). *Tasa Interna de Retorno (TIR)*. <https://www.wallstreetprep.com/knowledge/irr-internal-rate-of-return/>

AGRADECIMIENTO

Yhanmarco Rivera Saavedra

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento en primer lugar, a Dios, por darme la fuerza, la salud y la perseverancia para culminar esta etapa académica.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación. A mis hermanos, por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles.

A mi asesor de tesis, por su guía, paciencia y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo. Su compromiso con la excelencia académica ha sido una fuente de inspiración.

Gary Dailer Monja Tavera

Agradecerle a Dios por darme salud y fortaleza para culminar con éxito esta etapa académica.

A mi madre, Teresa Tavera Lopez, por su amor incondicional, apoyo constante, ejemplo de esfuerzo y sus innumerables sacrificios han sido el impulso constante que me ha permitido avanzar y alcanzar este importante logro académico. También a mi tía Silvia E. Tavera Lopez, por su apoyo económico, su respaldo inquebrantable y sus consejos oportunos que fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación y alcanzar esta meta académica.

A mi asesor de tesis, por su guía, paciencia y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo. Su compromiso con la excelencia académica ha sido una fuente de inspiración.

DEDICATORIA

Yhanmarco Rivera Saavedra

Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud a mis padres, quienes, con su esfuerzo incansable, sus consejos sabios y su fe inquebrantable en mí, han sido el faro que ha guiado cada paso de mi formación. Su ejemplo de perseverancia y valores ha sido mi mayor inspiración.

A mi familia, por su apoyo constante, por celebrar mis logros y sostenerme en los momentos de duda. Cada palabra de aliento y cada gesto de cariño han sido fundamentales en este camino.

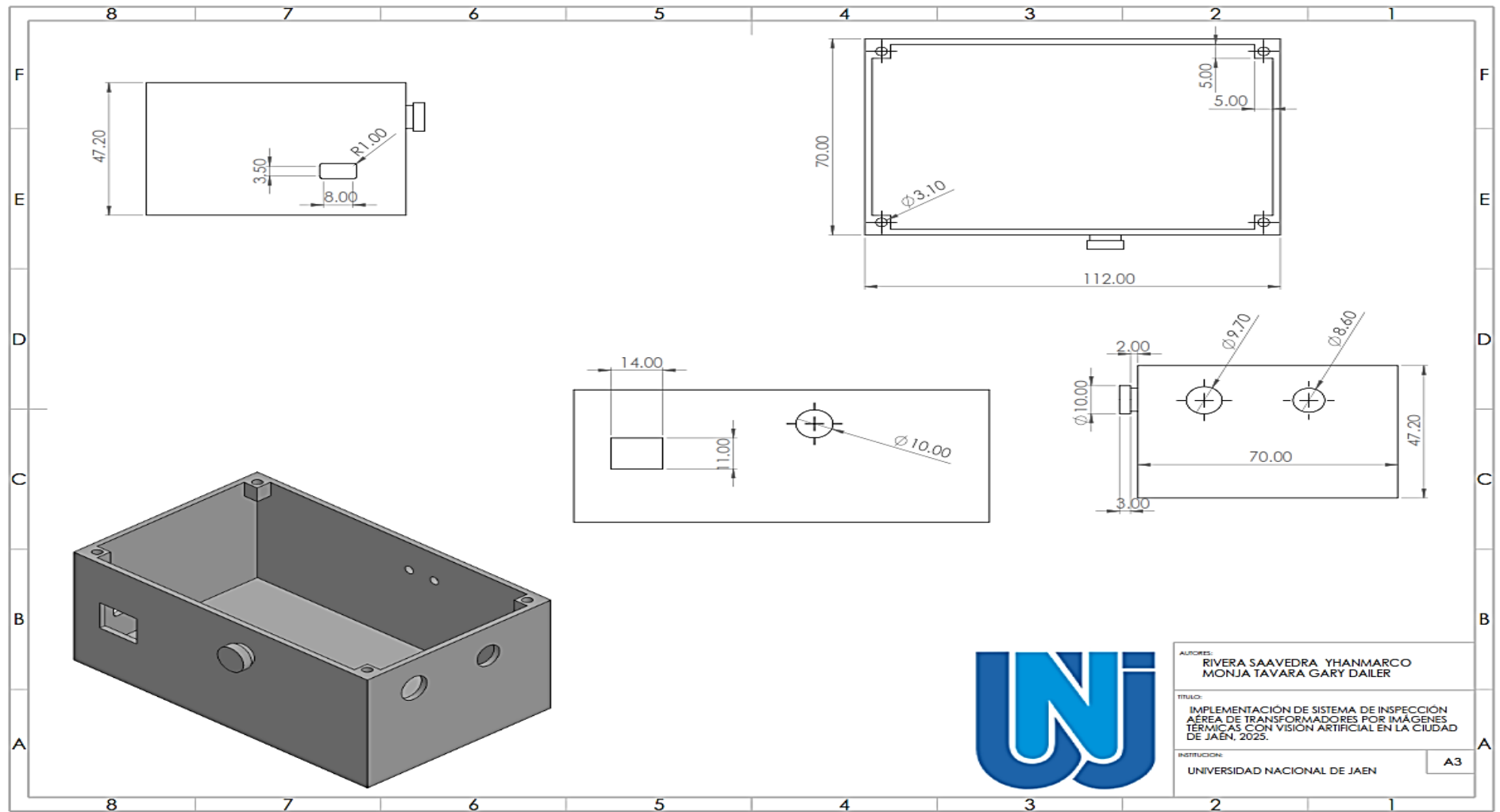
Gary Dailer Monja Tavera

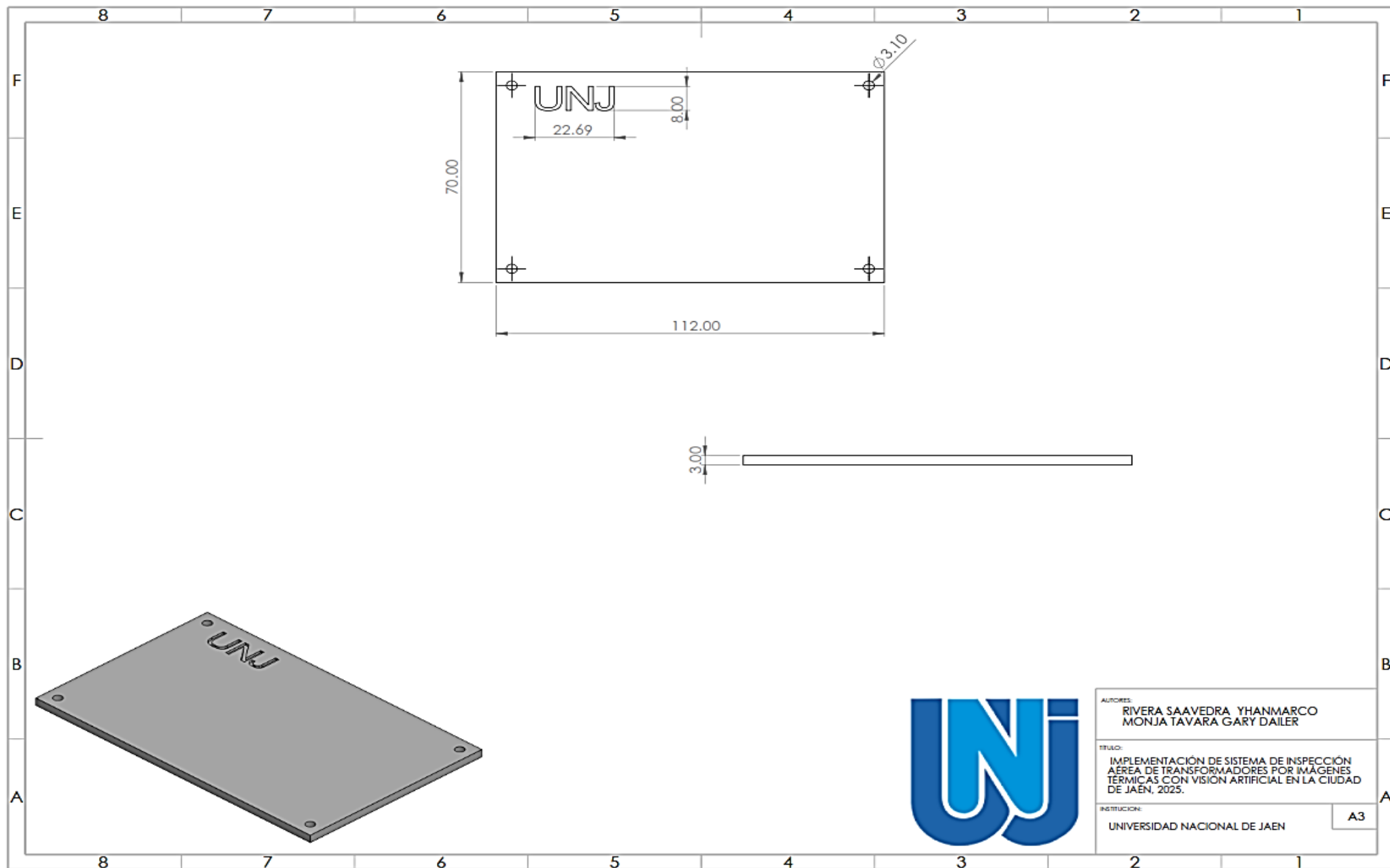
Dedico este trabajo con todo mi amor infinito y gratitud a mi madre, mi tía, mi hermana y a toda mi familia por su apoyo constante, por celebrar mis logros y darme fuerzas para salir adelante; han sido el faro que me ha guiado en cada paso de mi formación.

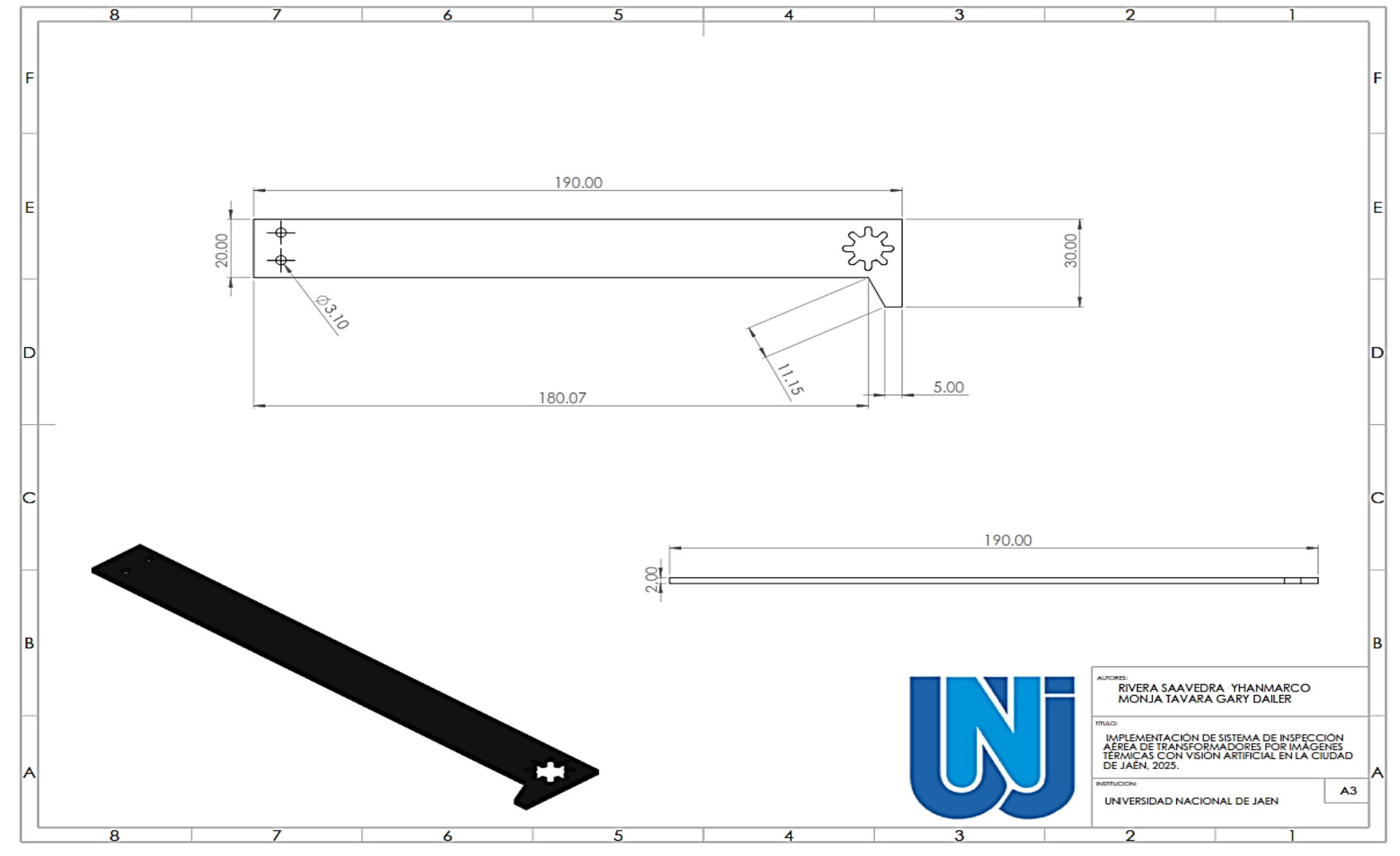
Y en memoria de mi abuelo, Angel Teodoro Tavera Huayama, cuyos consejos y valores siguen vivos en mí. Siempre me recordaba que debía aprovechar el esfuerzo y sacrificio que mi madre hace por mi educación, y esas palabras han sido mi motivación para no rendirme y alcanzar esta meta.

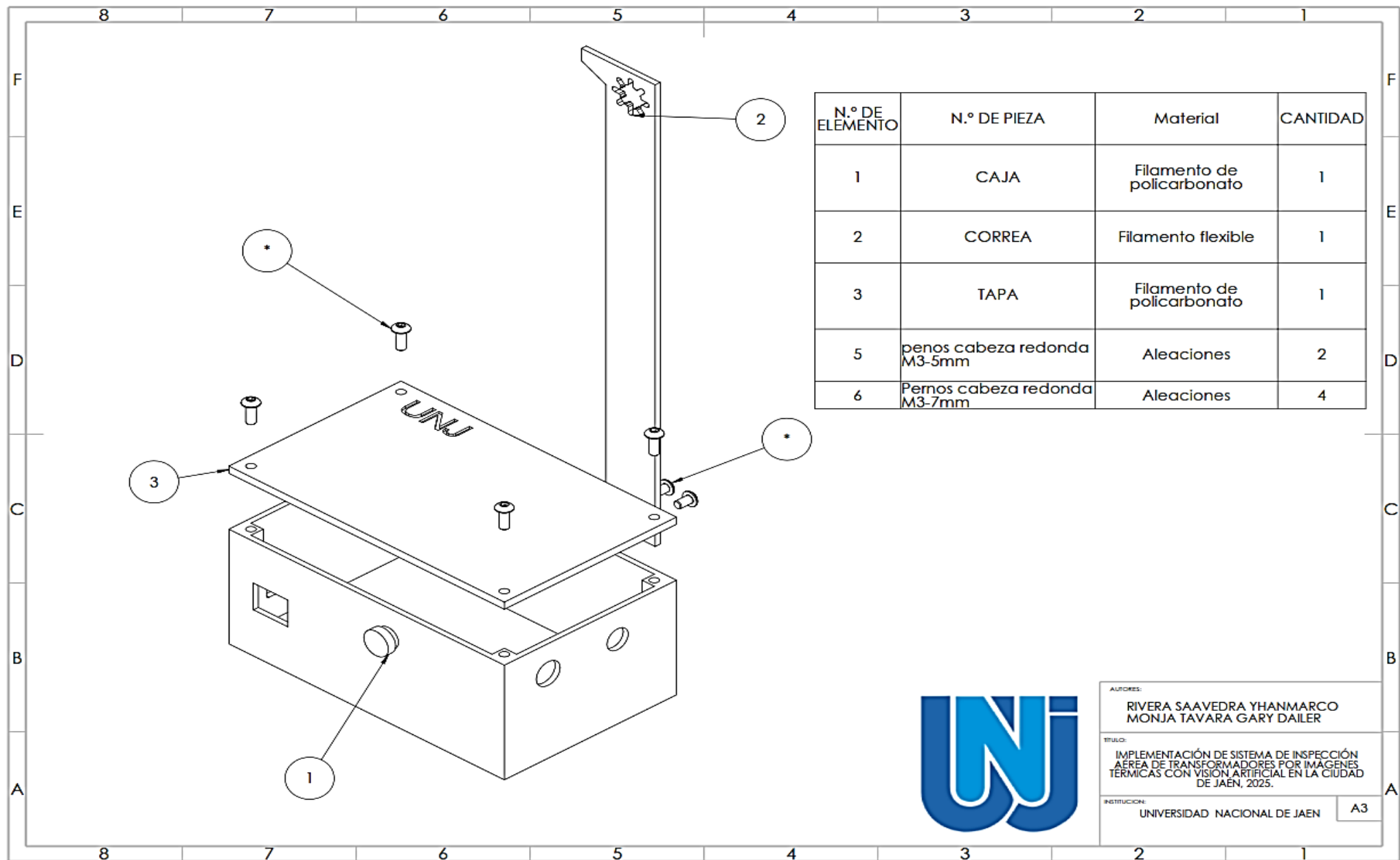
ANEXOS

ANEXO 1: Planos del diseño e implementación de la estructura de la cámara térmica con visión artificial.









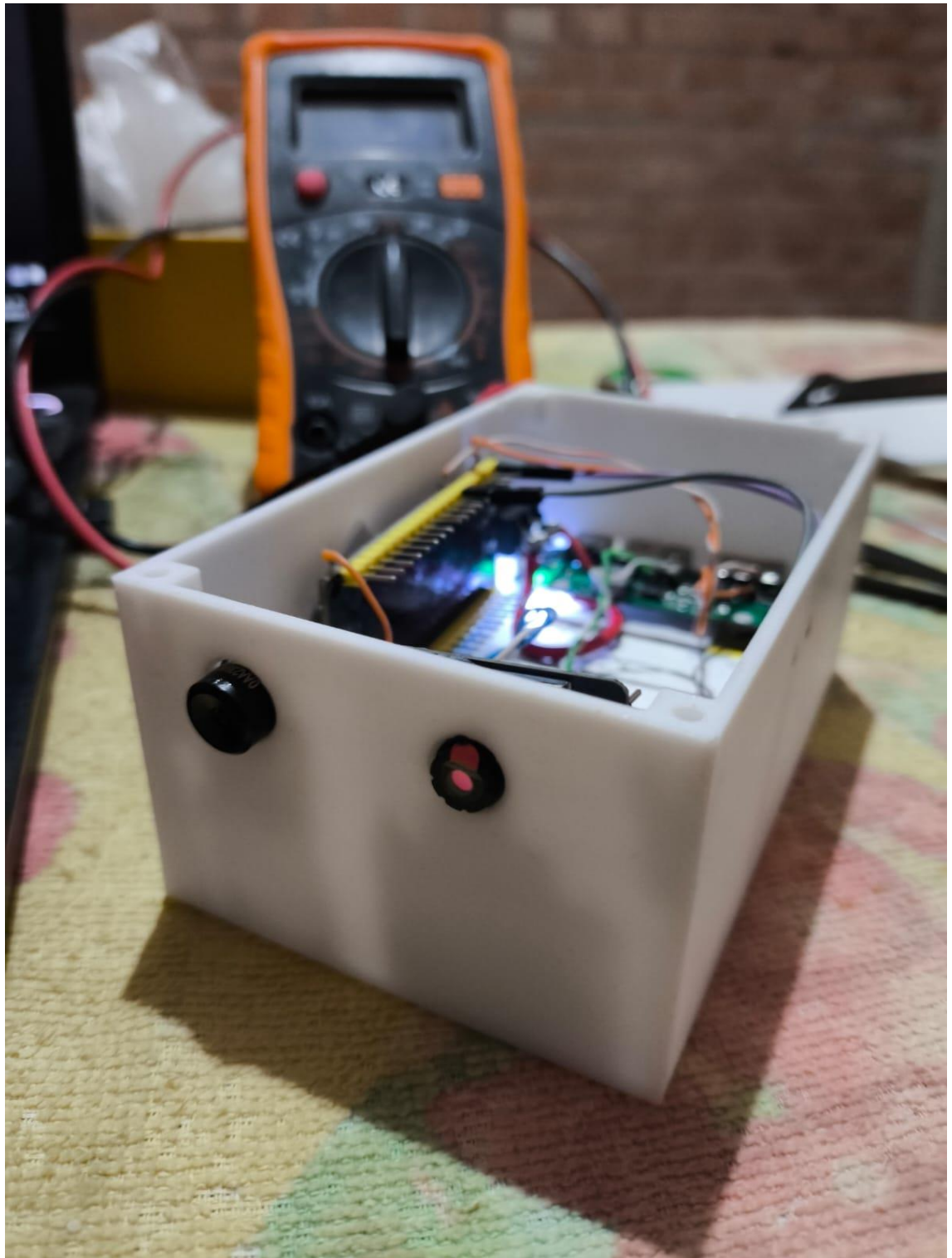
AUTORES:	
RIVERA SAAVEDRA YHANMARCO MONJA TAVARA GARY DAILER	
TÍTULO:	
IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE INSPECCIÓN AÉREA DE TRANSFORMADORES POR IMÁGENES TÉRMICAS CON VISIÓN ARTIFICIAL EN LA CIUDAD DE JAÉN, 2025.	
INSTITUCIÓN:	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN	A3

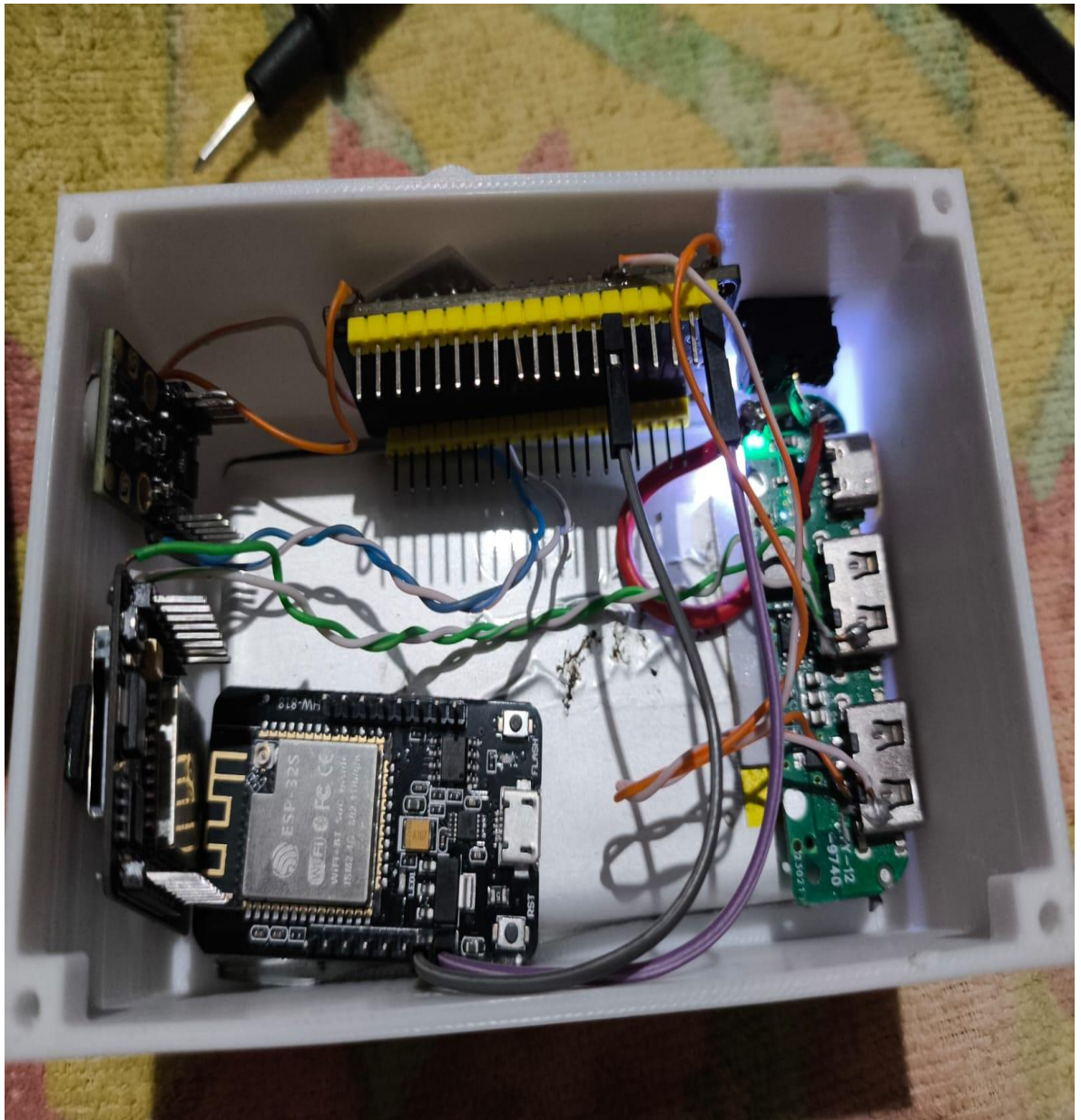
Anexo 2: Fotos desde el principio hasta la inspección aérea de transformadores.















UNI-T

Calibration Certificate

Product Code:
UT202+Description:
Personnel Tester

Serial Number: _____

- Threshold settings prior to calibration:

This is a new calibration there are no previous calibration values.

- Calibration of this instrument is hereby certified to be within the published specification as shown below:

Function	Input Adjust	Reading Range
DCV	350.0mV	347.8~352.2mV
ACV	3.5V	3.468~3.532V
ACA	3.5A	3.380~3.620A
Ω	350.0 Ω	347.0~353.0 Ω
Hz	4KHz	3.960~4.041KHz
CAP	3.5nF	3.380~3.620nF
$^{\circ}\text{C}$	35 $^{\circ}\text{C}$	31.8~38.2 $^{\circ}\text{C}$

- The instrument is calibrated against standards traceable to **CE** standards.
- Details of reference equipment used:
Calibration FLUKE 5522A Serial Number: 3917903
- Certificate of reference equipment:
Issue Date: Certificate Number: 230212142

Equipment Control Number:

CTS/T/5522A/002

Date:

09/Nov/2023

Signed: _____

Name: Beata Yin

Title: Quality Supervisor









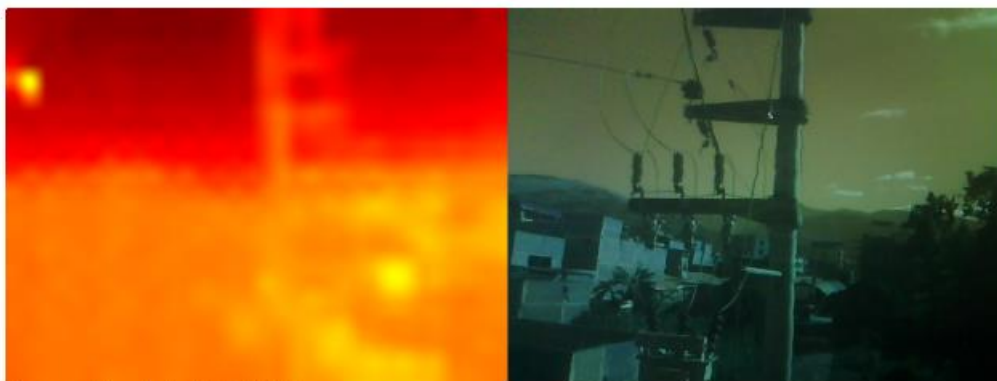
Anexo 3: Informes que vota el mismo sistema en cada inspección

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

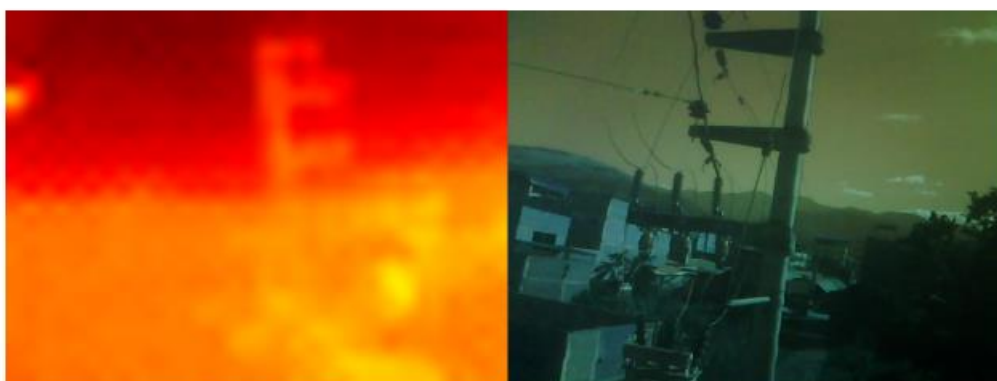
Ubicación: AMOJU

Inspección: 001

Observaciones:



Temp. mínima detectada: 9.5 °C
Temp. máxima detectada: 38.6 °C
Temp. bajo cursor: 31.1 °C



Temp. mínima detectada: 9.9 °C
Temp. máxima detectada: 38.7 °C
Temp. bajo cursor: 13.9 °C

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ubicación: C.CONTISUYO

Inspección: 002

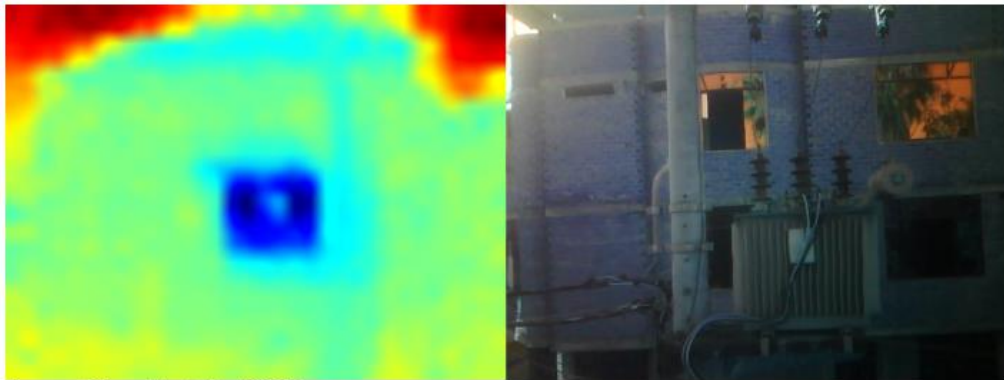
Observaciones: Transformador en rango normal de temperatura



Temp. mínima detectada: 16.8 °C

Temp. máxima detectada: 41.8 °C

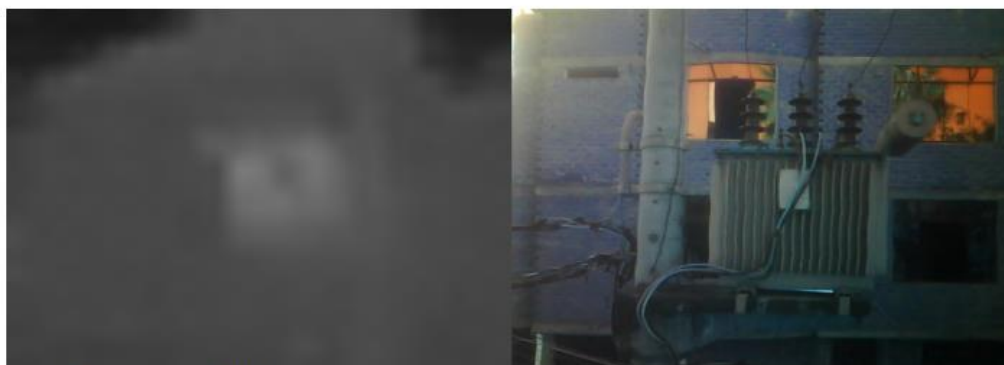
Temp. bajo cursor: 31.5 °C



Temp. mínima detectada: 16.2 °C

Temp. máxima detectada: 41.8 °C

Temp. bajo cursor: 32.7 °C



Temp. mínima detectada: 17.2 °C

Temp. máxima detectada: 42.5 °C

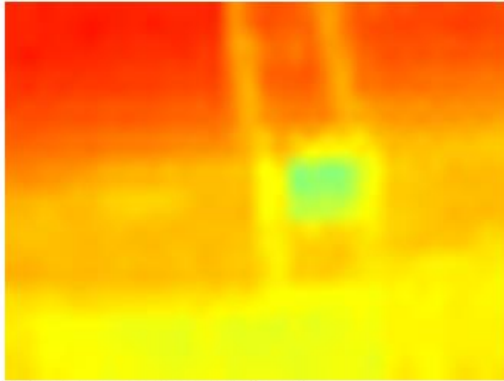
Temp. bajo cursor: 29.3 °C

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ubicación: C. EL SOL

Inspección: 003

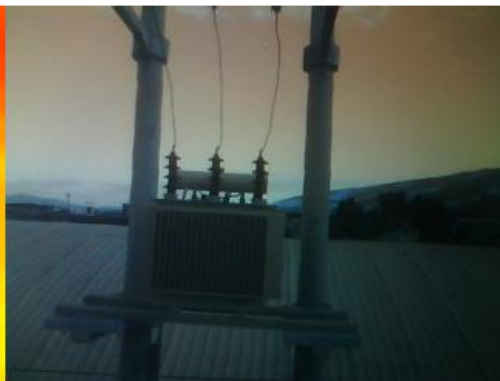
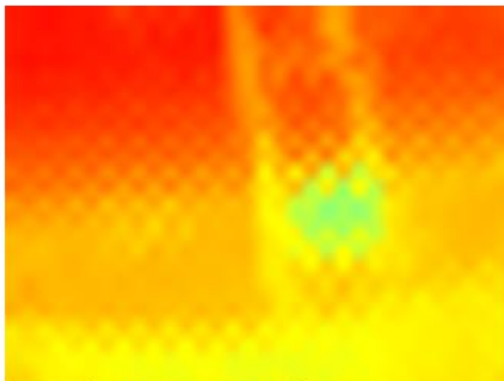
Observaciones: TRANFORMADOR DENTRO DEL RANGO NORMAL DE TEMPERATURA



Temp. mínima detectada: 12.8 °C

Temp. máxima detectada: 43.0 °C

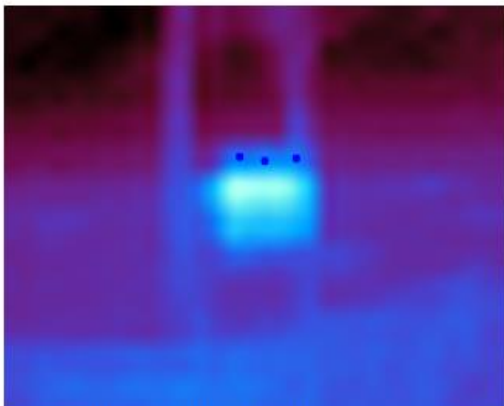
Temp. bajo cursor: 27.3 °C



Temp. mínima detectada: 13.6 °C

Temp. máxima detectada: 43.8 °C

Temp. bajo cursor: 27.3 °C



Temp. mínima detectada: 14.2 °C

Temp. máxima detectada: 44.4 °C

Temp. bajo cursor: 41.4 °C

Punto 1: 37.7 °C

Punto 2: 42.0 °C

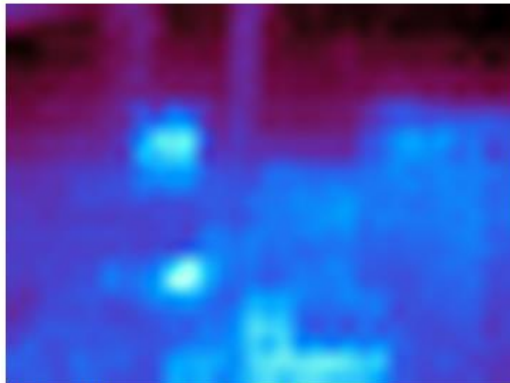
Punto 3: 39.4 °C

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ubicación:

Inspección:

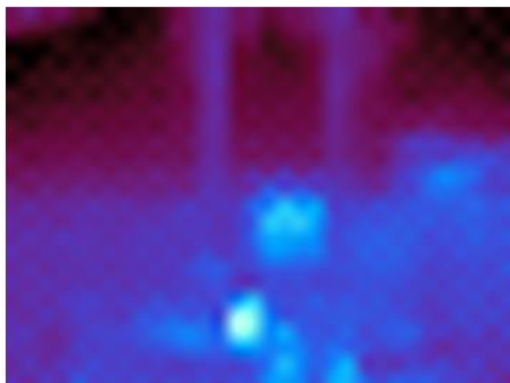
Observaciones:



Temp. mínima detectada: 14.1 °C

Temp. máxima detectada: 32.7 °C

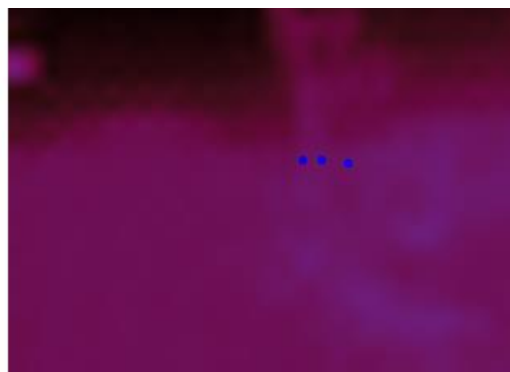
Temp. bajo cursor: 28.6 °C



Temp. mínima detectada: 14.7 °C

Temp. máxima detectada: 33.2 °C

Temp. bajo cursor: 19.4 °C



Temp. mínima detectada: 12.4 °C

Temp. máxima detectada: 39.5 °C

Temp. bajo cursor: 32.5 °C

Punto 1: 32.0 °C

Punto 2: 31.9 °C

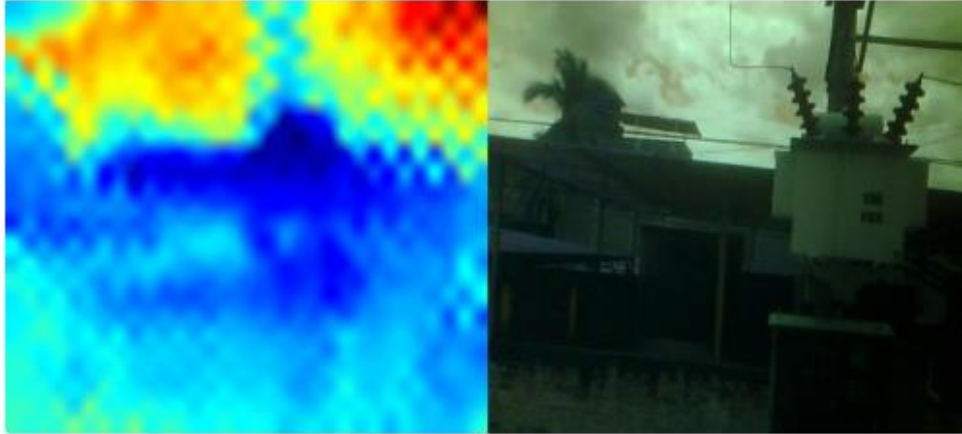
Punto 3: 32.6 °C

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ubicación: Chinchaysuyo

Inspección: 05

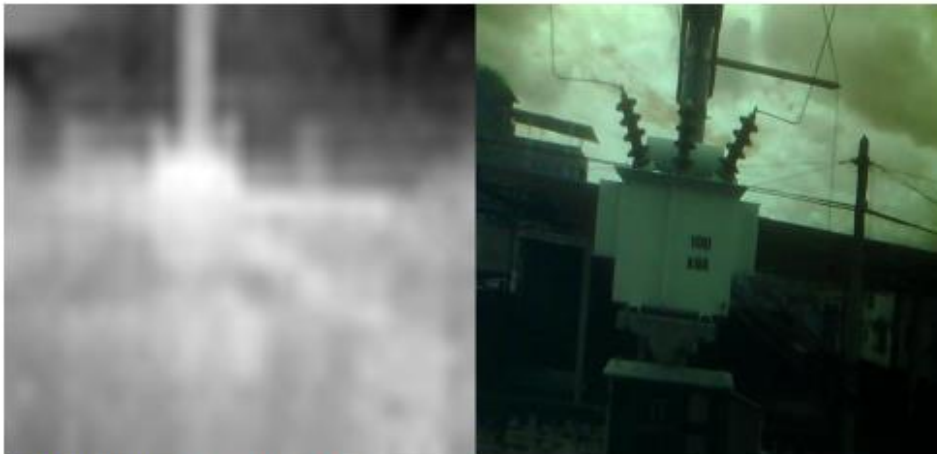
Observaciones: TRANSFORMADOR DENTRO DEL RANGO NORMAL DE TEMPERATURA



Temp.minima detectada: 16.8°C

Temp.maxima detectada: 45.5 °C

Temp.bajo cursor: 27.6 °C



Temp.minima detectada: 17.1 °C

Temp.maxima detectada: 47.26 °C

Temp.bajo cursor: 26.26 °C

Anexo 3: Cotizaciones de los componentes electrónicos para el diseño

Resumen de tu pedido

Número de pedido 000044117

Información de facturación

Gary Dailer Monja Tavera
Calle Ciro Alegria 559, casa de
2do piso
JAEN, CAJAMARCA, PERÚ
927984740

Información de envío

Gary Dailer Monja Tavera
Calle Ciro Alegria 559, casa de
2do piso
JAEN, CAJAMARCA, PERÚ
927984740

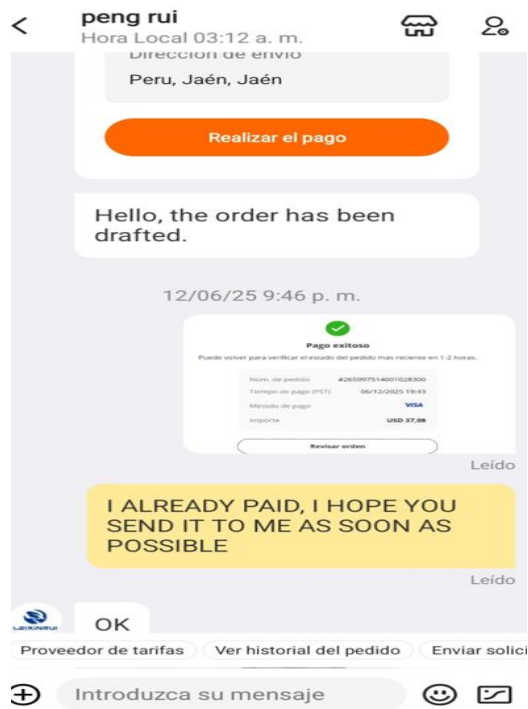
Método de envío

Envío a domicilio

1	 DJI Mini 4K Fly More Combo (CL) SKU: CN9500256NA8	S/ 1,999.00
---	--	-------------

1	 SANDISK K EXTREME PRO MICROSD XC 128G SKU: CN0900294NA8	S/ 149.00
---	---	-----------

Fecha	2025-06-15 18:40:14
Nº de orden	000044117
Medio de pago	micuentaweb_standard
Descuentos	-S/ 0.00
Despacho	S/ 0.00
Total pagado	S/ 2,148.00



Pago exitoso

Puede volver para verificar el estado del pedido más reciente en 1-2 horas.

Núm. de pedido	#265997514001028300
Tiempo de pago (PST)	06/12/2025 19:43
Método de pago	VISA
Importe	USD 37,08

Revisar orden

D & L TECNOLOGIA Y AUDIO S.R.L.
RUC: 20538995364
AV. PAKAMUROS 385 - SECTOR MORRO SOLAR
- TELEFONO: 921 674 811

BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA
B002-00016806

F. IMPRE : 08/08/2025 16:03:31
CLIENTE : CLIENTE VARIOS
F. EMISIO : 08/08/2025
N
COND.P. : CONTADO

DESCRIPCION	IMPORTE
CANT. x PRECIO	
UNITARIO	
(3688) AJ-ESP32 ESP32 PLACA DE DESARROLLO DE MODULO GOOU-ESP32 WIFI + BLUETOOTH AJV AJV	36.00
1.00 UND	36.00
OP. GRAVADA S/	0.00
OP. EXONERADA S/	36.00
IGV S/	0.00
TOTAL A PAGAR S/	36.00

BIENES TRANSFERIDOS EN LA AMAZONIA
PARA SER CONSUMIDOS EN LA MISMA

YAPE S/	6.00
CAJA 001 S/	30.00

VENDED: JESUS ALBERTO CAMPOS
HUAMANTA
CAJERO: DELCY MARIELA HUANCAS
CIUQUIPOMA

GRACIAS POR SU COMPRA



Representación impresa de la Boleta de venta
Electronica. Puede ser consultada en cpe.bizcloud.pe

*** Gestionado con www.BizCloud.pe ***



NAYLAMP MECHATRONICS S.A.C.
 INT. 1 LT. 31 MZ. E URB. INGENIERIA
 TRUJILLO - TRUJILLO - LA LIBERTAD
 www.naylampmechatronics.com
 contacto@naylampmechatronics.com
 cel: 997646858

RUC 20601252610
BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA
B001-009553

DATOS DEL CLIENTE
 DNI : 77130699
 DENOMINACIÓN : MONJA TAVARA GARY DAILER
 DIRECCIÓN :

FECHA EMISIÓN : 28/05/2025
FECHA DE VENC. : 28/05/2025
MONEDA : SOLES

CANT.	UM	CÓD.	DESCRIPCIÓN	V/U	P/U	IMPORTE
1	NU	000700	ESP32-CAM con cámara OV2640 ESP32 WiFi + BASE CH340	63.559	75.000	75.00
1	NU	000997	Paquetería	11.017	13.000	13.00

GRAVADA	S/	74.58
IGV 18.00 %	S/	13.42
TOTAL	S/	88.00

IMPORTE EN LETRAS: OCHENTA Y OCHO CON 00/100 SOLES

Representación impresa de la BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA, visita www.nubefact.com/20601252610
 Autorizado mediante Resolución de Intendencia No.034-005-0005315
 Resumen: kisJfwVbkVoUBX5QO2Kc+TNmdA+vtw9WjVVWDMEsPRw=

