



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Calibración radiométrica para cámara infrarroja de
bajo costo aplicado a estudios termográficos**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Joab Max Alonso APAZA MARTINEZ

ASESOR

Flavio Nireo CARRILLO GOMERO

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Apaza, J. (2024). *Calibración radiométrica para cámara infrarroja de bajo costo aplicado a estudios termográficos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Joab Max Alonso Apaza Martinez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48401863
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7592-6655
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Flavio Nireo Carrillo Gomero
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08624069
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3043-2384
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Nicanor Raúl Benites Saravia
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10189914
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Ruben Gino Martinez Varela
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09270432
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rejis Renato Paredes Penafiel
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06758404

Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	El Instituto Geofísico del Perú (IGP) e INNOVATE PERU
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurigancho - Chosica Latitud: -11.951407307638043 Longitud: -76.87409198747096
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Obligatorio. Ejemplo: 2018 - 2019
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Sistemas de automatización, Sistemas de control http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03 Ingeniería de sistemas y comunicaciones http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN N°003-EPIE-FIEE/2024

TESIS N° 002-FIEE/2024 PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional De Ingeniería Electrónica, reunidos en la fecha bajo la Presidencia del **DR. NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA**, e integrado por: **MG. REJIS RENATO PAREDES PEÑAFIEL**, **MG. RUBEN GINO MARTINEZ VARELA** y el **ING. FLAVIO NIREO CARRILLO GOMERO** (Miembro - Asesor).

Después de escuchar la Sustentación de Tesis del Bachiller **Joab Max Alonso Apaza Martinez** código **N° 12190081**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico por la modalidad de Tesis, quien expuso su tesis "**CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA PARA CÁMARA INFRARROJA DE BAJO COSTO APLICADO A ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**" para la EPI Electrónica de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Se acordó APROBARLO por **UNANIMIDAD**

Con la nota de DIECISIS (16)

Ciudad Universitaria, 13 de diciembre del 2024

Dr. Nicanor Raúl Benites Saravia
Miembro Jurado Presidente

Mg. Rejis Renato Paredes Peñafiel
Miembro Jurado

Mg. Ruben Gino Martinez Varela
Miembro Jurado

Ing. Flavio Nireo Carrillo Gomero
Asesor



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **FLAVIO NIREO CARRILLO GOMERO** en mi condición de asesor acreditado con el Acta de Sustentación N°003-EPIE-FIEE/2024 de Tesis Modalidad Ordinaria N°003-EPIE-FIEE/2024 del trabajo de tesis profesional cuyo título es: "**CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA PARA CÁMARA INFRARROJA DE BAJO COSTO APLICADO A ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**", presentado por el bachiller **JOAB MAX ALONSO APAZA MARTINEZ** para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **3%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**. Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Firma del Asesor _____

DNI: 08624069

Ing. Flavio Nireo Carrillo Gomero



DEDICATORIA

Dedicado a los futuros ingenieros que opten por la modalidad de titulación de tesis ordinaria, espero les pueda servir de referencia este trabajo que tantas complicaciones e impedimentos tuvo durante su etapa final.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Geofísico del Perú por permitirme desarrollar esta tesis con sus materiales y el uso de sus instalaciones, así mismo a INNOVATE Perú por el apoyo a la institución. A los compañeros de trabajo en el Radio Observatorio de Jicamarca por sus aportes a lo largo del desarrollo y a mi asesor el Ingeniero Flavio Carrillo por su orientación.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Introducción	1
Planteamiento del problema	2
Determinación del problema	2
Formulación del problema.	3
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
Importancia y alcance de la investigación.	5
Importancia	5
Alcance de la investigación.	6
Limitaciones de la investigación.	6
REVISIÓN DE LITERATURA	7
Marco Teórico	7
Base Teórica	7
Radiación Electromagnética	7
Radiación infrarroja	9
Cuerpo negro	9
Cuerpos negros técnicos	11
Emisividad y reflectancia	13
Cámaras térmicas	15
Medición con cámara térmica.	17
Transmitancia atmosférica	18
Reflectividad del objeto	19
Correcciones	19
Calibración de cámaras térmicas	20
Aplicaciones de las cámaras térmicas.	23
Procesamiento de imágenes digitales	24
Antecedentes del estudio	33
Definición de términos	35
HIPÓTESIS Y VARIABLES	37
HipóT	37
Hipótesis general	37

Hipótesis específicas	37
Variables	37
Operacionalización de las variables	38
Definición conceptual de la variable C	38
Operacionalización de la variable C	38
Definición conceptual de la variable E	39
Operacionalización de la variable E	39
Definición conceptual de la variable “Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja”	39
Operacionalización de la variable “Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja”	39
Definición conceptual de la variable “Temperatura calculada para la cámara de estudio”	39
Operacionalización de la variable “Temperatura calculada para la cámara de estudio”	40
Definición conceptual de la variable “software”	40
Operacionalización de la variable “software”	40
Definición conceptual de la variable “Valores medibles de temperatura por pixel”	40
Operacionalización de la variable “Valores medibles de temperatura por pixel”	41
Definición conceptual de la variable “Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias”	41
Operacionalización de la variable “Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias”	41
Definición conceptual de la variable “Solución al problema de enfoque manual de la cámara.”	41
Operacionalización de la variable “Solución al problema de enfoque manual de la cámara.”	42
MATERIALES Y MÉTODOS	43
Área de estudio	43
Diseño de la investigación	43
Motor y sistema de enfoque	43
Obtención de temperatura	51
Diseño de cuerpo negro.	53
Diseño del software de procesamiento	55
Población y muestra	67
Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información	68
Pruebas de calibración	68

Implementación en drone	74
Uso del software desarrollado.	75
Análisis estadístico	77
RESULTADOS	78
Presentación y análisis de los resultados	78
Pruebas en laboratorio	78
Pruebas en drone	80
DISCUSIÓN	86
EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA	88
Beneficios sociales y económicos del proyecto	88
Evaluación de gastos e inversión	88
Gasto de capital inicial (CAPEX)	88
Gastos de operación y mantenimiento (OPEX)	89
Gasto total	90
Comparativa de alternativas comerciales	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
Trabajos futuros	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	97
Anexo A	97
Matriz de consistencia	97
Anexo B	100
Cámara Térmica	100
Rex C100	108
Motor DC	112
Anexo C	115
Código del microcontrolador para el mecanismo de enfoque	115
Código de regresión	117
Librería para el reconocimiento de números y procesamiento de Imágenes	120
Software desarrollado para procesar y visualizar de vídeos térmicos	125
Anexo D	135
Planos de las piezas fabricadas	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen térmica adquirida por el mismo sensor, compartida por el fabricante.	3
Figura 2. Onda electromagnética. Fuente: (Serway y Jewett, 2004, p. 1071)	8
Figura 3. Espectro infrarrojo. Fuente: (Prieto, 2018)	9
Figura 4. Curvas de radiación de los cuerpos negros a distintas temperaturas. Fuente: Elaboración propia	11
Figura 5. Formas de cavidades comunes para cuerpos negros. Fuente: (Williams, 2009, p. 90)	12
Figura 6. Cuerpo negro tipo plato caliente. Fuente: (Omega Engineering Inc., 2018).	13
Figura 7. Radiación de tipos de emisores. Fuente: (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 52)	14
Figura 8. Esquema con las partes generales de una cámara térmica. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 9. Transmisión atmosférica a distintas alturas y distancias. Fuente: (Harris, 2013, p. 562)	18
Figura 10. Medición de temperatura de un cuerpo gris. Fuente: Elaboración propia	19
Figura 11. Calibraciones a nivel de píxel. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 12. Curva de la señal del detector con la temperatura. Fuente: (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 205)	23
Figura 13. Ejemplo de resultados de operaciones entre imágenes. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 14. Binarización de una imagen con distintos métodos. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 15. Ejemplo de matriz del filtro gaussiano. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 16. Ejemplos de máscaras para los filtros Sobel y Laplaciano. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 17. Transformada rápida de Fourier de una imagen. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 18. Variación del enfoque respecto al detector. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 19. Piezas diseñadas en 3D. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 20. Simulación de deformación en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 21. Componentes del sistema. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 22. Esquema de conexión electrónica para enfoque. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 23. Diagrama de flujo para el programa de enfoque. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 24. Piezas reales fabricadas con PLA ya ensambladas. Fuente: Elaboración propia.	51

Figura 25. Resistencia de nicromo, a) Sin energía eléctrica, b) Con 220v AC. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 26. Diagrama de conexión para cuerpo negro. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 27. Diseño (a) e implementación (b) de cuerpo negro técnico. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 28. Imagen de salida de cámara IR con los valores de temperatura equivalente al ADC interno. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 29. Localización de los números de interés. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 30. Diagrama de bloques del aplicativo. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 31. Conversión de escala de grises a pseudocolor. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 32. Plantillas de números 3 y 6. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 33. Extracción de fragmentos de imagen. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 34. Aplicaciones de binarizaciones para los recortes. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 35. Reconocimiento de números usando diferencia de imágenes para los números 3, 2, y 7. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 36. Reconocimiento usando un operador lógico entre imágenes para los números 3, 2, y 7. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 37. Reconocimiento usando una correlación para el número 3. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 38. Reconocimiento usando una correlación para el número 8. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 39. Bloques del programa de reproducción de video. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 40. Calibración en el laboratorio de IDI, ROJ. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 41. Curva SIFT experimental temperatura en Celsius vs números de pantalla. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 42. Curva regresión Planck para temperatura en Celsius. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 43. Curva de regresión polinomial para temperatura en Celsius. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 44. Obtención de función error de temperatura en base a distancia. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 45. Implementación en drone. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 46. Aplicativo desarrollado para el procesamiento de los videos capturados con la cámara térmica. Fuente: Elaboración propia.	76

Figura 47. Medidas en laboratorio para 90 (izquierda) y 165° C (derecha) para regresión polinomial (superiores) y de Planck (inferiores). Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 48. Puntos de prueba en el plato caliente. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 49. Resolución para las pruebas. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 50. Variación de temperatura según el enfoque. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 51. Imagen tomada desde la micro cámara. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 52. Imágenes capturadas desde el Drone para distintos valores de temperatura. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 53. Revisión de log de vuelo en programa Mission Planner. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 54. Cámara térmica con envoltura impresa en 3D. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 55. Jerarquía en el diseño del programa. Fuente: Elaboración propia.	126
Figura 56. Captura de las primeras pruebas realizadas, con temperatura a 190°C. Fuente: Elaboración propia.	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético	8
Tabla 2. Comparación de los motores.	45
Tabla 3. Asignación de canales extra en el receptor de radio.	48
Tabla 4. Comparación de tiempos de ejecución, promedio de 100 repeticiones.	65
Tabla 5. Datos obtenidos en la calibración, temperatura en Celsius	70
Tabla 6. Variación de la temperatura (Celsius) según la distancia.	73
Tabla 7. Temperatura real y medida con la cámara, en °C.	79
Tabla 8. Temperatura homogénea del plato respecto a la deseada en °C.	80
Tabla 9. Valores recolectados con las pruebas con el drone.	83
Tabla 10. Gastos de materiales comprados, con precios del 2019 y 2023.	89
Tabla 11. Gastos operativos de la tesis, con precios el 2019 y 2023.	89
Tabla 12. Total de gastos del proyecto para el año 2019 y actualizados al 2023.	90
Tabla 13. Precios de cámaras térmicas científicas, datos con tipo de cambio estimado a 3,3 consultados en el 2019 cuando se inició el proyecto de tesis, y actualizado al 2023 con cambio a 3.6.	90
Tabla 14 Matriz de consistencia del proyecto.	98

RESUMEN

La finalidad de este proyecto fue desarrollar la calibración radiométrica de una cámara térmica de bajo costo, la cual entrega valores cualitativos de temperatura en base a una escala de colores, y obtener valores cuantitativos medibles para todas las imágenes que se adquirieran. Se inicio configurando el objeto de referencia de temperatura para luego obtener un modelo matemático que permita conocer la respuesta del sensor, posteriormente se implementó el modelo matemático en un software desarrollado para el reconocimiento de números y procesamiento de imágenes que facilitó el acceder a los valores de temperatura en cada pixel de la imagen, además se complementó el sistema con actuadores mecánicos que permitieron controlar remotamente el enfoque de la cámara y así mejorar las lecturas de temperatura; finalmente se incluyó también una corrección en base a la distancia del objeto. Para evaluar todo el sistema, este se instaló en un drone tipo hexacóptero con el cual se adquirieron imágenes térmicas que fueron usadas para evaluar la calibración. Los resultados luego de realizar la calibración radiométrica con todas las implicaciones y complementos que requirió obtuvieron ligeras variaciones a la temperatura real, pero estas fueron inferiores al 3% de la lectura, el cual es el error propio de la cámara. Por lo que se concluye que el procedimiento de calibración radiométrico de la cámara de bajo costo desarrollado permite obtener valores cuantitativos de temperatura estableciendo la posibilidad de ser usados en estudios termográficos.

Palabras clave: cámara térmica, calibración, cuerpo negro, diseños 3D, procesamiento de imágenes, desarrollo de software.

ABSTRACT

The purpose of this project was to develop the radiometric calibration of a low-cost thermal camera, which provides qualitative temperature values based on a color scale, and to obtain measurable quantitative values for all the acquired images. It began by configuring the temperature reference object, and then a mathematical model was obtained which allows knowing the response of the sensor, later the mathematical model was implemented in a software developed for number recognition and image processing that facilitated access to the temperature values in each pixel of the image, the system was also complemented with mechanical actuators that allowed remote control of the camera focus and thus improved temperature readings; Finally, a correction based on the distance of the object was also included. To evaluate the entire system, it was installed on a hexacopter-type drone with which thermal images were acquired, these images were used to evaluate the calibration. The results after performing the radiometric calibration with all the implications and complements that it required obtained slight variations to the real temperature. Still, these were less than 3% of the reading, which is the camera's own error. Therefore, it is concluded that the radiometric calibration procedure of the low-cost thermal camera developed allows for obtaining quantitative temperature values, establishing the possibility of being used in thermographic studies.

Keywords: thermal camera, calibration, black body, 3D designs, image processing, software development.

INTRODUCCIÓN

Introducción

Actualmente en el mercado es posible encontrar cámaras térmicas a un precio moderado y accesible, sin embargo, algunas de estas cámaras si bien cuentan con un sensor térmico capaz de medir la temperatura de un objeto, solo se usan como referencia visual para saber qué objeto se encuentra a una mayor temperatura respecto a su entorno, o para ver en entornos de muy poca o nula iluminación.

La evolución y aplicación de estas cámaras ha sido progresiva desde el siglo pasado, las primeras cámaras térmicas necesitaban un sistema de enfriamiento que mantenga su temperatura a niveles criogénicos ($-195,79^{\circ}\text{C}$) para el funcionamiento de sus detectores (Harris, 2013), estos sistemas son voluminosos y costosos. En la década de los 90's investigaciones en el campo militar llevaron al desarrollo de cámaras térmicas pequeñas y compactas, inicialmente usadas solo para vigilancia, pero en los últimos años han sido aplicadas en distintas áreas como agricultura, arquitectura, electricidad y medicina (Vollmer y Möllmann, 2018); estas cámaras junto a las aeronaves pilotadas remotamente (RPA en inglés), más conocidos como drones, han permitido adquirir imágenes térmicas de lugares de difícil acceso a las personas, permitiendo así expandir el estudio térmico a otros campos. El estudio de la temperatura de los cuerpos, denominada termografía, ha sido aplicada a distintos campos de estudio, uno de ellos el estudio de los volcanes, la vulcanología. En la vulcanología se estudia la composición de los suelos, los gases emitidos, la temperatura de la superficie, la temperatura de los fluidos de lava, la temperatura de los gases para entender mejor el funcionamiento, creación, erupción y consecuencias en el entorno geográfico y hacia los seres vivos por parte de los volcanes. Con lo mencionado anteriormente se destaca la importancia del uso de estas cámaras, sin embargo, para obtener resultados cuantitativos concretos y poder realizar estudios termográficos, es necesario ir más allá de la aplicación básica de estas y generar un desarrollo adecuado para obtener los resultados deseados.

En los capítulos siguientes se muestra el procedimiento desarrollado para calibrar una cámara térmica de bajo costo para obtener los valores de temperatura. Parte del desarrollo ha exigido un desarrollo en distintas habilidades y competencias, ya que se ha requerido modelado matemático, diseño electrónico para controlar remotamente el enfoque y diseño y simulación de piezas mecánicas, además de desarrollar software propio que permita procesar las imágenes para obtener los valores finales de temperatura.

Planteamiento del problema

Determinación del problema

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) a través del financiamiento de INNOVATE PERU lanzó en el 2014 el proyecto “Monitoreo de Volcanes usando Vehículos Aéreos no Tripulados (Unmanned Aerial Vehicles - UAV)” (Apaza et al., 2017) el proyecto tenía contemplada la construcción de dos vehículos para el estudio y monitoreo del volcán Ubinas. El volcán Ubinas es considerado el volcán más activo del Perú (INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), 2017) además de ser el segundo con mayor riesgo volcánico luego del Sabancaya (IGP et al., 2017). Para lograr el monitoreo aéreo se planteó la instalación de sensores dentro de un drone que permitan tomar datos de gases y usar una cámara sensible al espectro infrarrojo para poder adquirir imágenes térmicas.

La adquisición de la cámara se realizó de forma directa con el fabricante de la misma, la cámara que se solicitó debía ser una cámara pequeña y compacta, de forma que pueda caber en los vehículos; esta parte de los requerimientos fue satisfecha, pero al realizarle más pruebas se descubrió que no era posible obtener un valor cuantitativo de temperatura de las imágenes adquiridas con la cámara. El fabricante aseguró que era posible usar esa cámara para obtener temperatura (ver Figura 1), no obstante, ellos no podían darnos detalles sobre la respuesta del sensor, o métodos de comunicación con el procesador, o programas de procesamiento, ya que indicaron era información confidencial del fabricante. Luego de lo comentado por el fabricante y de una mayor revisión se encontró que a través del menú de usuario se podía acceder a los valores máximos y mínimos que detecta el sensor de la cámara, esto mediante números con un rango aproximado de 30000 a 65000 relacionados

directamente con la temperatura del objeto observado, mas no se tenía la ecuación que da lugar a estas cantidades.



Figura 1. Imagen térmica adquirida por el mismo sensor, compartida por el fabricante.

Fuente: Hivintek

Formulación del problema.

Problema general. ¿Es posible realizar la calibración radiométrica de una cámara infrarroja de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos?

Las imágenes de la cámara térmica no tienen asociados valores de temperatura cuantitativos, además se desconoce los parámetros del sensor de radiación infrarrojo así mismo el presupuesto es limitado.

Problemas específicos. Se tienen los siguientes problemas específicos para el presente proyecto:

1. ¿Se puede obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja

con la temperatura calculada para la cámara de estudio? Ya que no se tiene un modelo matemático del sensor que usa la cámara, por lo no se conoce la relación de temperatura detectada. Sin embargo, muestra valores de distinta intensidad lumínica o variaciones de color en base a la temperatura del cuerpo.

2. ¿Se puede desarrollar un software para obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por pixel? Para conocer los valores de temperatura asociado a cada pixel, es necesario un software específico capaz de entregarle esos valores al usuario. Y aprovechar los valores máximos y mínimos mostrados por la cámara que tienen relación con los máximos y mínimos de temperatura. Aunque no es posible obtener ese valor por vías de comunicación electrónica (UART, RS-232, etc.).
3. ¿Es posible solucionar el problema de enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias? La cámara presenta un sistema de enfoque mediante un lente enrollable, en cual requiere ser ajustado manualmente por el usuario.

Objetivos

Objetivo General

El objetivo de esta tesis es desarrollar la calibración radiométrica de una cámara de infrarroja de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos.

Objetivos Específicos

1. Obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara de estudio.
2. Desarrollar un software para obtener imágenes térmicas con valores medibles de

temperatura por pixel.

3. Solucionar el enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias.

Importancia y alcance de la investigación.

Importancia

En el año 1600, el Perú fue testigo de una de las más grandes erupciones de nuestra era, en la actual región de Moquegua se encuentra el Huaynaputina, el cual produjo más de 1000 muertes por su violenta erupción sepultando un pueblo entero y oscureciendo el cielo de gran parte de la región inclusive hasta Lima, Arequipa y Arica. Se cree incluso que esta erupción cambió el clima global (Domínguez Faura, 2019). En los recientes años, se ha visto como las erupciones de volcanes cercanos a localidades han causado muchos daños económicos y sociales, se tiene el caso del volcán Kilauhuea que no causó víctimas mortales debido a la naturaleza del mismo, pero recientemente el volcán de Fuego en Guatemala, el cual dejó al menos 25 víctimas mortales y más de un millón de afectados (CONRED, Guatemala , 2018), centenares de heridos y otros desaparecidos. Las erupciones de los volcanes Ubinas y Sabancaya en el 2019 no han causado víctimas mortales sin embargo lo ocurrido en otras partes del mundo muestran un posible escenario a suceder en territorio peruano. Crónicas y estudios en otros volcanes muestran que tanto la composición de las fumarolas como las variaciones de temperatura en el volcán (Dehn et al., 2002) puede ser usado para estimar una posible erupción, con esto sería posible preparar a la población aledaña para una posible emergencia.

Por otra parte, se estaría usando por primera vez una cámara de térmica de vigilancia en el Perú para poder recolectar datos que sirvan a estudios científicos de actividad volcánica. Los estudios que se generen no solo servirán para entender mejor el funcionamiento del volcán en el cual está destinado a operar, sino que beneficiará enormemente a todos los investigadores que realizan labores académicas con volcanes alrededor del mundo.

Alcance de la investigación.

Este trabajo de investigación se desarrolla para aprovechar el uso de una cámara de bajo costo en aplicaciones científicas, usando la ecuación de Planck y algoritmos de procesamiento de imágenes para lograr el objetivo, aportando así nuevos instrumentos a la comunidad científica peruana para el estudio termográfico en el Perú.

Limitaciones de la investigación.

La aplicación final requiere que la toma de imágenes funcione a un rango de cientos de metros, pero para la calibración y tener un ambiente controlado, se ha restringido a una decena de metros en las pruebas y la calibración.

El software que procesa las imágenes de la cámara, tiene integrado el modelo matemático de la cámara, y para acceder a los valores este debe ser ejecutado, no se contempla la generación de archivos compatibles con otros sistemas, ni la generación de archivos de imágenes de 4 dimensiones, incluyendo la temperatura a cada pixel.

Los mecanismos de enfoque son prototipos, que sirven para evaluar los conceptos, el realizar estas piezas en versiones finales metálicas no se encuentra contemplado como parte del proyecto, así como tampoco la inversión para mejorar este sistema de enfoque.

REVISIÓN DE LITERATURA

Marco Teórico

Según (Ñaupas, 2014) la definición de marco teórico es la siguiente: “El marco teórico, en el proyecto de investigación cuantitativo, es el contexto teórico-científico que sirve de base a la investigación del problema científico. En la investigación cualitativa, recibe el nombre de revisión de la literatura”. Igualmente describe sus componentes cómo: Antecedentes, Bases teóricas-científicas, y Definición de términos básicos. Estos componentes son abordados en las siguientes secciones de este capítulo, los conceptos que se presentarán son los que el autor considera convenientes para que se pueda comprender el desarrollo realizado en el presente trabajo de investigación.

Base Teórica

Radiación Electromagnética

Se define como radiación electromagnética a la propagación, transmisión y difusión de energía mediante ondas electromagnéticas (OEM). Las ondas electromagnéticas son portadoras de energía en pequeños paquetes denominados fotones, que se desplazan en un campo eléctrico E y magnético B oscilante perpendiculares entre sí (ver Figura 2.b). Las OEM no necesitan un medio para propagarse, y se desplazan a una máxima velocidad de $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ en el vacío. El tipo de OEM está determinado por su longitud de onda λ , la cual es la distancia entre dos crestas consecutivas (ver Figura 2.a) o por su frecuencia que es inversamente proporcional a su longitud de onda $v = c/\lambda$.

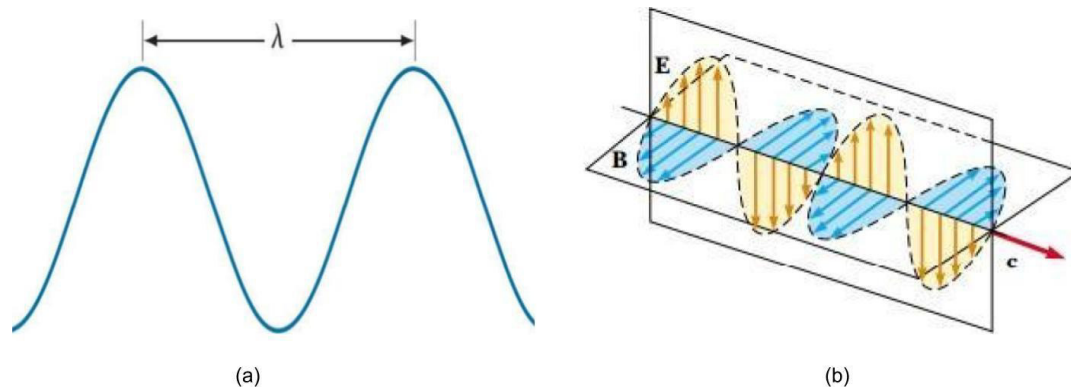


Figura 2. Onda electromagnética. Fuente: (Serway y Jewett, 2004, p. 1071)

El campo magnético y eléctrico de las OEM tienen una relación constante en todo momento, aun cuando estos son oscilantes se conserva que $E/B = c$. El espectro electromagnético es infinito y se divide en regiones según su frecuencia o su longitud de onda, siete son las regiones del espectro. Las regiones se muestran en la Tabla 1, donde se aprecia la relación inversa descrita anteriormente entre la frecuencia ν y la longitud de onda λ además de unos ejemplos con sus aplicaciones o manifestaciones.

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético

Región	Frecuencia	longitud de Onda	Ejemplo
Ondas de Radio	30 Hz a 3 GHz	mayor a 10 cm	Ondas de Radiocomunicaciones
Micro Ondas	3 GHz a 300 GHz	10 cm a 1 mm	Comunicaciones satelitales
Infrarrojo	300 GHz a 384 THz	1 mm a 0.78 μm	Emisión natural de todos los cuerpos
Visible	384 THz a 750 THz	780 nm a 400 nm	Luz solar
Ultravioleta	750 THz a 30 PHz	400 nm a 10 nm	Luz solar, lámparas UV
Rayos X	30 PHz a 30 EHz	10 nm a 0,01 nm	Rayos cósmicos, Equipos de radiología
Rayos Gamma	mayores a 30 EHz	menores a 0,01 nm	Rayos cósmicos, fisión nuclear

Fuente: Elaboración propia

Radiación infrarroja

Se define como radiación infrarroja a las ondas electromagnéticas comprendidas en el intervalo de 0,78 a 1000 μm del espectro electromagnético. Naturalmente su origen proviene de la radiación térmica, es decir que todo cuerpo con temperatura superior al cero absoluto (0 °K o -273,15 °C) emite radiación infrarroja. El espectro infrarrojo comprende una pequeña parte del espectro electromagnético, así como se observa en la Figura 3. En termografía se definen tres bandas:

- Onda Corta (SW): Entre el rango de 0.9 a 3 μm .
- Onda Media (MW): Entre el rango de 3 a 5 μm .
- Onda Larga (LW): Entre el rango de 5 a 15 μm .



Figura 3. Espectro infrarrojo. Fuente: (Prieto, 2018)

Cuerpo negro

Se define un cuerpo negro como un emisor perfecto, absorbe toda la radiación que incide en él o que lo atraviesa. Es un objeto ideal usado para los estándares en termografía, no existe ningún objeto que a determinada temperatura y longitud de onda pueda radiar más energía que un cuerpo negro en esas condiciones. La exitancia radiante espectral del cuerpo negro en un hemisferio puede ser calculada mediante la ecuación de Planck (Harris, 2013,

p. 77) en el intervalo para λ :

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (Wm^{-2}m^{-1}) \quad \text{Eq 1}$$

Donde $h = 6,626 \times 10^{-34} Js$ es la constante de Planck, $c = 2,9979 \times 10^8 ms^{-1}$ es la velocidad de la luz, $k = 1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ es la constante de Boltzmann. Se definen nuevas constantes para simplificar la Eq 1.

$$c1 = 2\pi hc^2 = 3,741 \times 10^{-16} Wm^2$$

$$c2 = hc/k = 1,4393 \times 10^{-2} mK$$

Obteniéndose:

$$M(\lambda, T) = \frac{c1}{\lambda^5 (e^{\frac{c2}{\lambda T}} - 1)} \quad (Wm^{-2}m^{-1}) \quad \text{Eq 2}$$

Las curvas de radiación con la ecuación de Planck (Figura 4) muestra que mientras más elevada sea la temperatura del cuerpo, la gráfica se desplaza hacia valores pequeños de longitud de onda, debido a esto la temperatura máxima que podamos medir estará limitada a las longitudes de onda que es capaz de detectar la cámara.

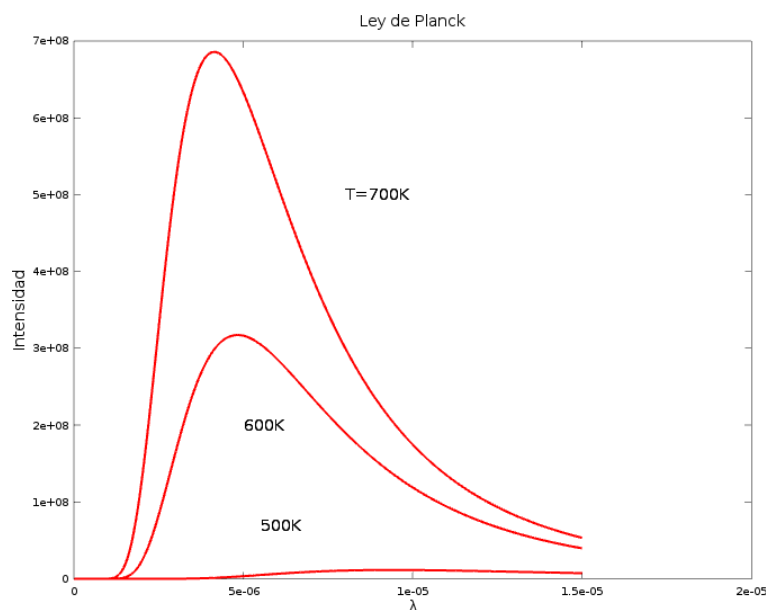


Figura 4. Curvas de radiación de los cuerpos negros a distintas temperaturas. Fuente: Elaboración propia

Cuerpos negros técnicos

El fabricar un cuerpo negro perfecto es imposible, pero se puede llegar a valores de emisividad muy cercanos a la unidad alterando la forma de la superficie del cuerpo, de modo que la luz incidente casi no sea reflejada, esto con el fin de usar el cuerpo negro como una referencia óptica para la prueba y calibración de sensores IR. Existen dos métodos prácticos para construir cuerpos negros técnicos.

El primer método es fabricar una cavidad en un bloque (Figura 5) de material de alta conductividad térmica (principalmente aleaciones metálicas) y regular la temperatura de este bloque utilizando un elemento de calentamiento/enfriamiento. La emisividad de los cuerpos negros de la cavidad es típicamente superior a 0,995 incluso cuando la emisividad de las paredes de la cavidad es mucho más baja (aproximadamente 0,5- 0,8). La mayoría de los cuerpos negros de temperatura media o alta están diseñados utilizando el concepto de cavidad. Los cuerpos negros de cavidad típicos disponibles comercialmente se caracterizan por una abertura de emisión relativamente pequeña de aproximadamente 1 pulgada de apertura y una inercia temporal bastante alta.

El segundo método es colocar una capa de material de alta emisividad sobre un elemento

metálico plano de temperatura regulada (Figura 6). Algunas pinturas negras especiales de emisividad igual a 0,97 se colocan sobre emisores de cuerpo negro. Los últimos elementos están fabricados con metales de alta conductividad (generalmente cobre o aluminio). Es posible utilizar el segundo método para lograr mayores aberturas de emisión y luego utilizar el primer método. Los cuerpos negros diseñados utilizando los segundos métodos se denominan cuerpos negros de área o platos calientes.

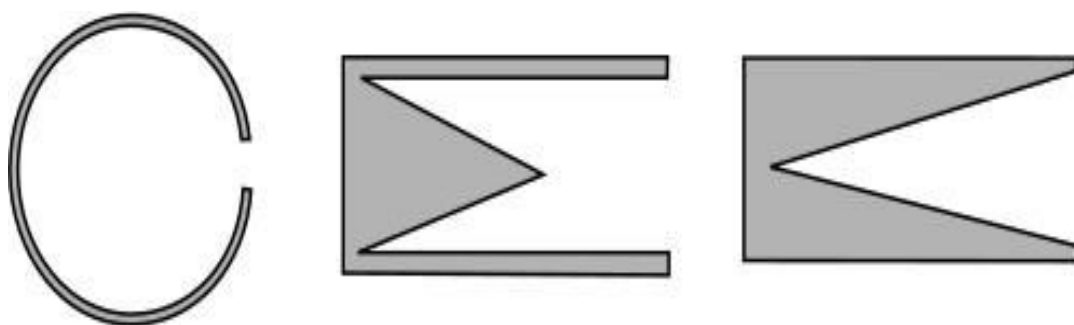


Figura 5. Formas de cavidades comunes para cuerpos negros. Fuente: (Williams, 2009, p. 90)

Los cuerpos negros del área también se caracterizan por una inercia temporal más baja que los cuerpos negros de la cavidad debido a una masa más pequeña. Sin embargo, debido a la falta de recubrimientos de alta emisividad resistentes a altas temperaturas, los cuerpos negros del área pueden usarse solo a bajas temperaturas, típicamente la temperatura máxima no es más de 400 °C (Chrzanowski, 2010, p. 92)

Actualmente hay varios laboratorios que ofrecen cuerpos negros, estos varían según el rango de temperaturas, la superficie de observación, el tiempo de calentamiento, y la estabilidad de temperatura. También es posible desarrollar cuerpos negros particularmente a bajo costo que sirvan para experimentos que no requieran un nivel de emisividad tan alto (Fidali y Mikulski, 2008).



Figura 6. Cuerpo negro tipo plato caliente. Fuente: (Omega Engineering Inc., 2018).

Emisividad y reflectancia

La emisividad de un objeto es la relación de la cantidad de radiación emitida realmente desde la superficie a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 31). Es decir, el ratio entre las exitancias espectrales:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{BB}(\lambda, T)} \quad \text{Eq 3}$$

Los cuerpos con $\varepsilon < 1$ son denominados cuerpos grises. La mayor parte de los cuerpos son de este tipo, pero existen cuerpos que tienen una emisividad selectiva, es decir que estos varían su emisividad de forma drástica a ciertas longitudes de onda, tal como se muestra en la Figura 7.

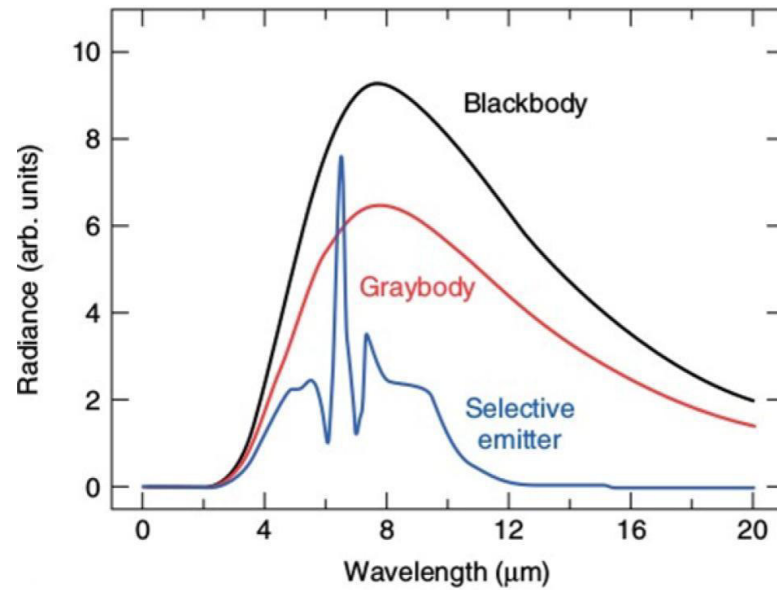


Figura 7. Radiación de tipos de emisores. Fuente: (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 52)

La emisividad se puede describir también según la ley de radiación de Kirchhoff de la siguiente manera: La energía que incide sobre un cuerpo E_i es igual a la suma de la energía absorbida E_a , reflejada E_r y transmitida E_t .

$$E_i = E_a + E_r + E_t \quad \text{Eq 4}$$

Si consideramos que el cuerpo es opaco a la radiación por lo tanto no existe radiación transmitida $E_t = 0$, la ecuación queda como:

$$E_i = E_a + E_r \quad \text{Eq 5}$$

Dividiendo entre E_i para obtener el radio de energía absorbida y reflejada, obtenemos los coeficientes de absorbancia y reflectividad.

$$1 = \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_r}{E_i} = \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) \quad \text{Eq 6}$$

El primer factor se denomina absorbanza o emisividad y el segundo, reflectividad del objeto, como ya se había mencionado previamente para un cuerpo negro la emisividad es 1. En Eq 6 se muestra la forma de obtener la emisividad de los objetos a partir de su reflectividad.

Cámaras térmicas

Las cámaras térmicas son dispositivos capaces de detectar la radiación infrarroja, dentro de un rango específico, y entregar como resultado una imagen en escala de grises o en falso color acorde a la temperatura de los cuerpos observados. Las cámaras térmicas se componen generalmente de:

- Un sistema óptico que permita capturar las imágenes del exterior, este debe permitir el paso de las longitudes de onda con las que trabaja la cámara.
- Uno o más detectores de radiación IR, dependiendo del tipo de detector puede necesitar o no sistema de refrigeración. En el caso de usar un solo detector se usa un sistema de espejos en conjunto con actuadores mecánicos para formar la imagen.
- Un sistema electrónico capaz de procesar los datos del detector realizando correcciones a nivel de píxel, y se encargue de las comunicaciones con dispositivos externos. Exportando una imagen en escala de grises o en pseudo-color.
- Un dispositivo para visualizar las imágenes y/o almacenarlas para su posterior procesamiento, estos componentes se aprecian en la Figura 8.

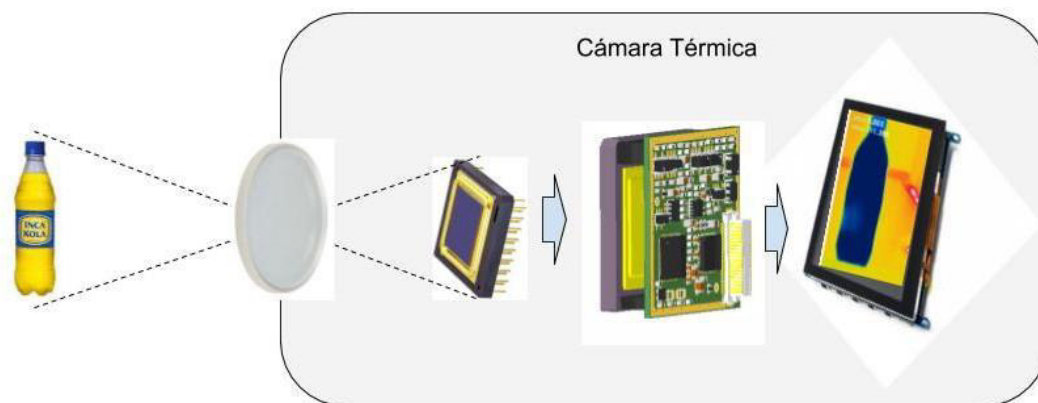


Figura 8. Esquema con las partes generales de una cámara térmica. Fuente: Elaboración propia.

Las cámaras térmicas se pueden clasificar por la forma de adquisición de las imágenes, estos son sistemas de escáner y sistemas estáticos. Los sistemas de escáner obtienen la imagen adquiriendo muestras fila por fila y columna por columna con el uso de espejos móviles internos, usan solo un detector. Estos requieren detectores con una alta velocidad de respuesta y un tiempo de integración rápido para poder formar la imagen térmica. Los sistemas estáticos usan detectores de matrices de plano focal, también llamados FPA por sus siglas en inglés, con estos logran capturar la imagen en un solo muestreo. Los FPA no tienen sistemas móviles por lo que pueden adquirir imágenes a un mayor tiempo de muestreo. Por el tipo de detector se pueden clasificar en detectores de fotones y detectores térmicos.

Los detectores de fotones. Como su nombre lo indica detectan la cantidad de fotones incidentes en cada píxel, estos fotones se convierten en electrones alterando las propiedades eléctricas del detector. Funcionan en base al efecto fotoeléctrico dado por $\Delta E = h\nu$. Donde ΔE es la energía de salto, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia del fotón. Pueden ser:

- Foto-voltaico: Registra los cambios en la cantidad de fotones como variación en voltaje.
- Foto conductivo: Registra los cambios en la cantidad de fotones como variación de resistencia.

- Foto emisivo: Registra los cambios en la cantidad de fotones como variación de corriente.

La mayoría de cámaras termográficas refrigeradas comercializadas actualmente utilizan un detector elaborado con antimoniuro de indio (InSb). Las cámaras refrigeradas funcionan realizando un recuento de los fotones de energía en una banda de onda específica, típicamente en la banda de IR de onda media de alrededor de $3\text{--}5\mu\text{m}$. Los fotones golpean los píxeles y se convierten en electrones que se almacenan en un capacitor de integración. El píxel se obtura electrónicamente abriendo o acortando el capacitor de integración. Los tiempos de integración típicos para objetos entre -20 y $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una cámara FLIR InSb van de unos 6 ms a unos $50\text{ }\mu\text{s}$ en función del modelo de cámara (Teledyne FLIR LLC, 2019)

Las cámaras de detectores térmicos. Son más compactas, ligeras, baratas y tienen un menor consumo que las de fotones, su funcionamiento se basa en la alteración de las propiedades eléctricas de ciertos materiales al incidir sobre ellos radiación IR. Pueden ser:

- Bolómetro: Registra cambios de temperatura como cambios de resistencia.
- Termófilos: Registra cambios de temperatura como cambios de voltaje.
- Piroeléctricos: Registra cambios de temperatura como cambios de capacitancia.
- Superconductor: Registra cambios de temperatura como cambios de resistencia.

Medición con cámara térmica.

Si consideramos un cuerpo opaco, con emisividad menor a 1, es decir un cuerpo gris, al realizar la medición con un detector IR, como se aprecia en la Figura 10, la temperatura medida por el sensor no es solo la emitida por el objeto en observación, sino que existen factores del entorno que se deben tomaren cuenta para una lectura

adecuada. La atmósfera es un actuador importante en las mediciones, ya que esta absorbe y emite radiación, lo cual debe ser considerado para calcular el valor real de temperatura del objeto.

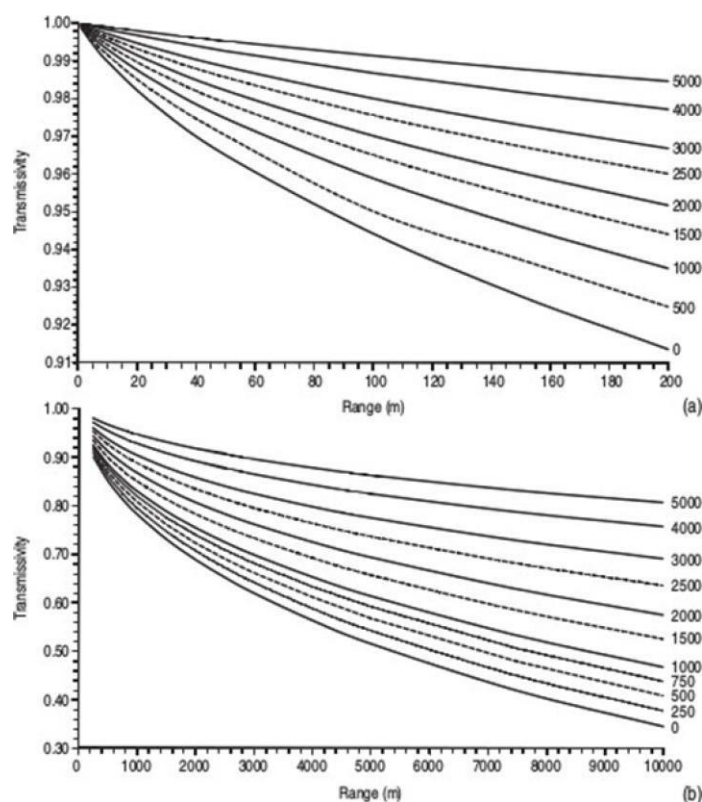


Figura 9. Transmisión atmosférica a distintas alturas y distancias. Fuente: (Harris, 2013, p. 562)

Transmitancia atmosférica

La atmósfera no es un transmisor perfecto de la radiación IR, esta absorbe parte de la radiación emitida por los cuerpos presentes en ella y de la superficie. La transmitancia atmosférica τ tiene un valor máximo de 1 para una atmósfera perfectamente transmisora de radiación IR, y un mínimo valor de 0 para una atmósfera completamente opaca. El nivel de transmitancia depende de la longitud de onda emitida por el objeto y de la distancia entre el objeto y el sensor. Se puede apreciar en la Figura 9 que la transmitancia es mayor a cortas distancias, y tiene valores elevados a mayor elevación sobre el nivel del mar.

Reflectividad del objeto

Como se mencionó en Emisividad y reflectancia, todos los cuerpos presentan una emisividad ϵ menor a 1, por lo que tienen una pequeña porción de radiación reflejada. La parte de radiación reflejada puede provenir de distintas fuentes, como es el sol, en suelo, otro cuerpo cercano e incluso del mismo operario de la cámara.

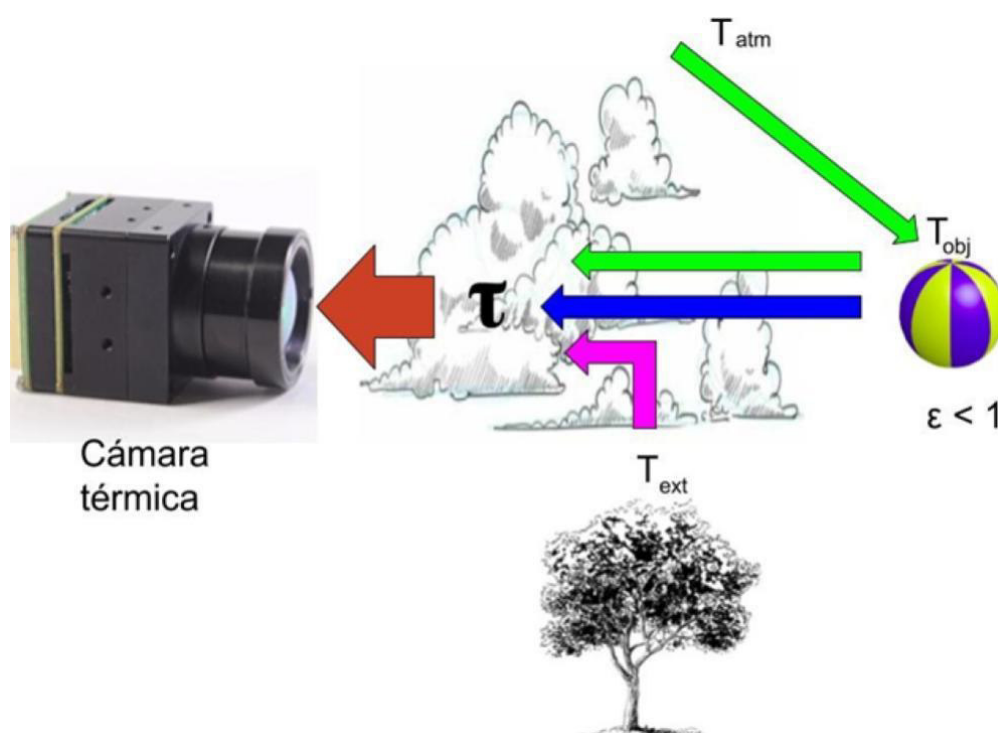


Figura 10. Medición de temperatura de un cuerpo gris. Fuente: Elaboración propia

Correcciones

En la medición de temperatura de un objeto con un sensor IR óptico, la radiación IR del objeto no es la única que llega al sensor, ya que las características de emisividad del mismo y el entorno van a influir en la cantidad de radiación que detecta el sensor.

Según la Figura 10, si el cuerpo tiene una emisividad ϵ y se encuentra a una temperatura T_{obj} en un ambiente con temperatura atmosférica T_{atm} , donde la atmósfera tiene una transmisividad de τ y debido a que no se puede especificar las características de un objeto

externo que influya a la medición, se asume que no hay objetos externos. Entonces la temperatura detectada por el sensor viene dada por:

$$T_{total} = (\varepsilon T_{obj} + (1 - \varepsilon)T_{atm}) \tau_{atm} \quad \text{Eq 7}$$

Para obtener la temperatura del objeto en base a la medición total se reordena la ecuación anterior:

$$T_{obj} = \frac{T_{total} / \tau_{atm} - (1 - \varepsilon)T_{atm}}{\varepsilon} \quad \text{Eq 8}$$

Calibración de cámaras térmicas

Generalmente las cámaras térmicas son calibradas por su fabricante antes que el usuario adquiriera una, pero hay casos en los que se deben realizar calibraciones por cuenta del usuario para garantizar el buen funcionamiento de la cámara, o que se requiera recalibrar el equipo debido al tiempo de uso. Las principales calibraciones al equipo se dividen en dos grupos, calibración a nivel de píxel y calibración general, la calibración a nivel de píxel principalmente se basa en la corrección de no uniformidad y el píxel muerto.

Corrección de no uniformidad. Generalmente conocida como NUC (siglas del inglés Nonuniformity Correction), es usada cuando se usa un detector FPA (Focal Plane Array) ya que cada detector integrante de la matriz (píxel) presenta una respuesta única a la radiación IR, no uniforme. Si esta respuesta no uniforme entre los píxeles es demasiado grande la imagen de la cámara es irreconocible. Se asume una respuesta lineal en los detectores para realizar la corrección (ver Figura 11.a), es decir para cada píxel se considera que:

$$V_o = G_{mn} V_{in} + Of_{nm} \quad \text{Eq 9}$$

Donde V_o es el valor corregido, G_{mn} es la ganancia del píxel en la ubicación mn , Of_{nm} es el valor de compensación. Para obtener estos valores generalmente se realiza una medición de dos valores conocidos de temperatura, corrección de dos puntos, los cuales permiten obtener la ecuación de la recta. El objeto de muestra es generalmente un cuerpo gris ($\epsilon < 1$) con una distribución de temperatura uniforme a lo largo de su superficie, y esta superficie debe cubrir la totalidad de los píxeles del detector. Esta calibración se realiza de forma automática con algún software que lee los valores, calcula los parámetros y los almacena en la memoria interna de la cámara.

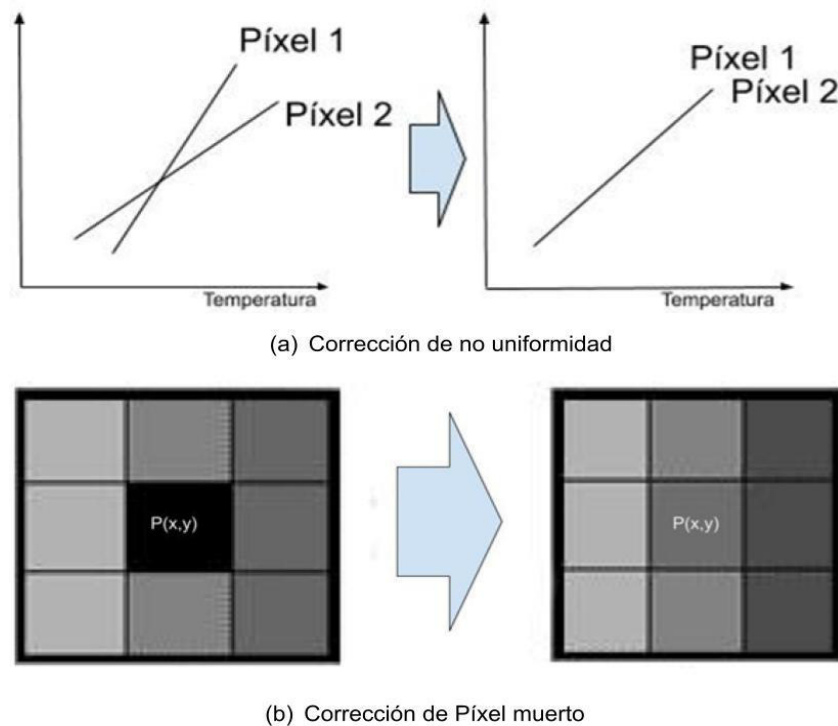


Figura 11. Calibraciones a nivel de píxel. Fuente: Elaboración propia.

Píxel muerto Los procesos de fabricación de los FPA no son completamente perfectos, motivo por el cual existen píxeles defectuosos en el FPA que no es posible calibrarlos, estos son conocidos como píxeles muertos, ya que no ofrecen datos de temperatura sobre el objeto. Propiamente es una corrección digital que se les da a las

imágenes térmicas para apreciarlas sin puntos negros correspondientes a estos píxeles. Para eliminarlos se reemplaza el valor del píxel con un promedio de los otros píxeles vecinos tal como muestra la Figura 11.b.

Calibración radiométrica La cámara infrarroja como radiómetro permite medir algunas cantidades radiométricas como la radiación o la potencia radiante. El propósito de la calibración es determinar las relaciones cuantitativas precisas entre la salida de la cámara y la radiación incidente. Para el procedimiento de calibración es posible trabajar cada píxel de forma independiente tal como se describe en (Budzier y Gerlach, 2015) o trabajar todos los píxeles como un único sensor como lo descrito en (Pron y Bouache, 2013). En el procedimiento se utilizan cuerpos negros ($\epsilon \approx 1$) a diferentes temperaturas, ya que sus cantidades radiométricas, como la excitación M o la radiación L , y sus cantidades espectrales están bien definidas (Eq 2). Por lo tanto, el proceso de calibración da una relación entre la señal de la cámara y la temperatura del cuerpo negro. En el proceso de calibración toda la imagen generada por el FPA está completamente cubierta por el cuerpo negro. Debido a que la distancia entre el cuerpo negro y la cámara es pequeña se puede desestimar la atenuación producida por la atmósfera, además si el valor de emisividad del cuerpo negro es muy cercano a uno, ejem: 0,999, es posible considerar la radiación reflejada como cero, por lo que la señal de salida dependerá únicamente de la temperatura del objeto.

Cada calibración esta específicamente adecuada a la óptica usada, si se cambia la lente de la cámara o se adicionan filtros especiales será necesaria una recalibración.

SiFT La función de transferencia de la señal (SiFT del inglés Signal Function Transfer) es la curva que describe la relación entre la señal de salida del convertidor analógico digital (ADC) de la cámara y la temperatura del objeto observado. La calibración radiométrica global consiste en determinar la mejor ecuación que describa la SiFT de la cámara, los valores numéricos de la curva representan la temperatura a un valor específico. Los detectores ofrecen valores de 12 o 16 bits con un desplazamiento pre-establecido. Como ejemplo, la Figura 12 muestra la digitalización del detector para un sistema de 12 bits. La información de temperatura de todo el rango

de medición se captura y está disponible para el análisis de imágenes. Para la representación y el análisis, es posible fijar un nivel y un intervalo. Estos dos parámetros solo afectan la representación de la imagen y corresponden al brillo y el contraste de la imagen, respectivamente. Las temperaturas dentro del rango del tramo se pueden representar en niveles de gris o colores falsos (paleta de color). La mayoría de las escalas de 8 bits con 256 colores se utilizan con paletas de colores predefinidas (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 204).

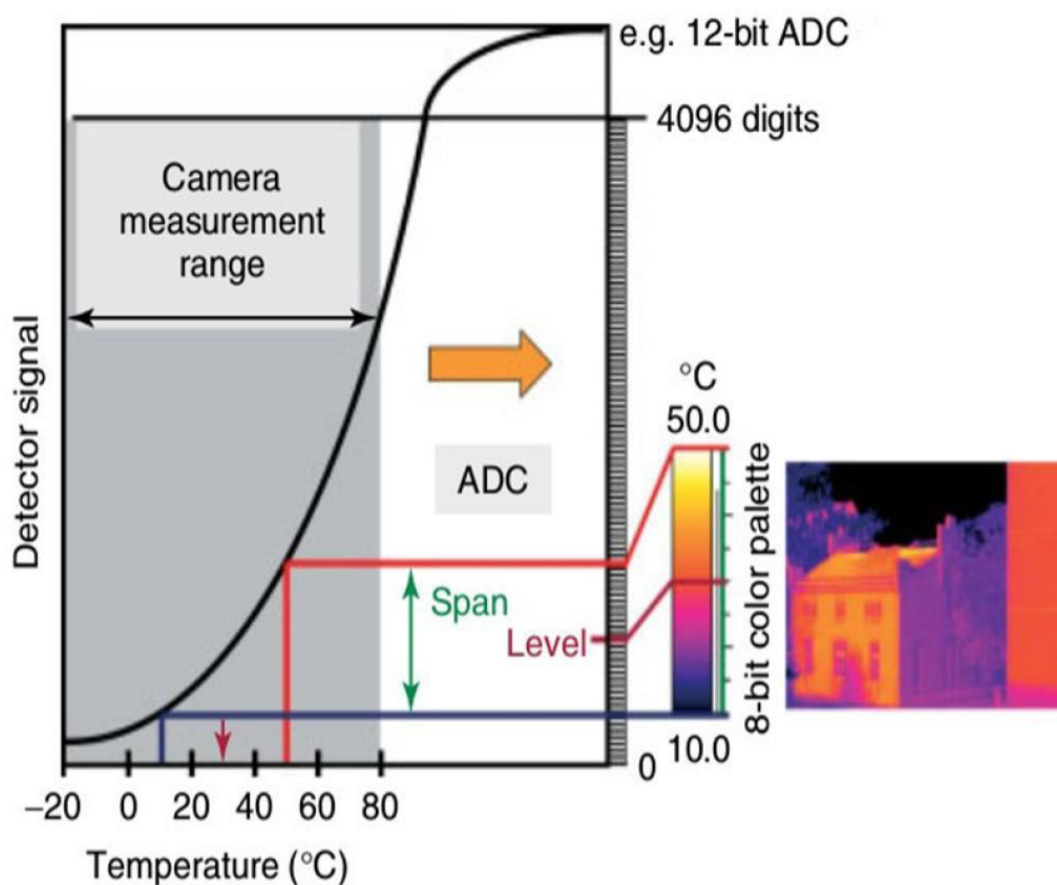


Figura 12. Curva de la señal del detector con la temperatura. Fuente: (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 205)

Aplicaciones de las cámaras térmicas.

El uso de las cámaras térmicas se extiende en varios ámbitos de mantenimiento e investigación, la capacidad de medir y detectar cambios de temperatura de forma remota ofrece una gran ventaja a las otras formas de medición. La cámara térmica

ofrece una imagen completa donde se puede seguir los cambios de temperatura a través del tiempo.

- **Infraestructura:** Usado para inspeccionar aislamiento de ambientes, casas, departamentos u oficinas. También permite detectar fugas en tuberías a simple vista u ocultas.
- **Mantenimiento:** En el mantenimiento de equipos eléctricos permite detectar puntos de alto consumo de corriente, o dispositivos que estén en corto. En el mantenimiento mecánico sirve para detectar puntos de mayor fricción, como también realizar análisis de estrés mecánico.
- **Vigilancia:** Debido a su capacidad de generar imágenes sin necesidad de luz visible, y poder mostrar objetos en entornos nublados o con humo en el ambiente, es usado en sistemas de vigilancia tanto en el campo comercial como militar.
- **Vulcanología:** La medición remota ofrece una gran herramienta para las mediciones de temperatura de los volcanes en procesos eruptivos.
- **Medicina:** El cuerpo humano es un sistema homeostático, por lo que variaciones en algunas regiones del cuerpo corresponden a cambios internos producidos por alguna anomalía. Ejemplos de esto es la detección de cáncer de mama, fenómeno de Raynaud, úlceras, síndrome de dolor regional complejo (CRPS), etc.

Procesamiento de imágenes digitales

Una imagen digital puede definirse como una función $f(x, y)$ donde x e y son las coordenadas espaciales, y f es el nivel de intensidad que tiene la imagen en ese punto específico. El valor de f puede estar dado por un escalar o una matriz unidimensional, dependiendo de la naturaleza de la imagen, y los valores de x e y dependen de la cantidad de píxeles que tenga el sensor. Por lo tanto, una imagen también puede definirse como una matriz $F_{xy n}$ donde n representa la cantidad de canales.

Espacio de color El espacio de color es la forma en cómo se organizan los

colores en las imágenes digitales. Este puede ser arbitrario de modo que el espacio de color puede variar entre cada organización. Se mencionan los espacios más usados en procesamiento de imágenes.

Imagen en escala de grises. La escala de grises es un espacio unidimensional, donde los píxeles tienen un valor escalar de intensidad que pueden tomar tantos valores como permita el ADC del sensor, generalmente se usa la escala de 8 bits (0 a 256).

Imagen en RGB. La imagen en color RGB (del inglés Red-Green-Blue) es una imagen donde la función de intensidad es una matriz unidimensional con 3 elementos, es decir un espacio tridimensional representado como un cubo y cada elemento de este tiene correspondencia a un canal de color rojo, verde o azul. La combinación de estos colores permite generar casi toda la gama de colores del espectro visible, y sus valores generalmente también usan la escala de 8 bits. Actualmente la mayoría de las cámaras digitales tienen como salida una imagen RGB.

Imagen en HSV. La imagen en color HSV (del inglés Hue, Saturation, Value) es un espacio tridimensional donde cada elemento representa el tinte, la saturación y el valor. El tinte o matiz es un valor angular entre 0 y 360. La saturación y el valor o brillo pueden tomar valores entre 0 y 1 o 0 a 100 %.

Conversión de RGB a grises La generación de una imagen en escala de grises a partir de una imagen RGB es ampliamente utilizado en el procesamiento de imágenes, debido a que permite trabajar con las formas, contornos, y regiones de una imagen en forma sencilla. En Eq 10 se presenta la forma de convertir una imagen RGB a escala de grises.

$$I_{gris}(x,y) = \alpha I_{RGB}(x,y,r) + \beta I_{RGB}(x,y,g) + \gamma I_{RGB}(x,y,b) \quad \text{Eq 10}$$

Donde (x, y) son la ubicación del píxel, r , g y b son los canales de color, α , β y γ son coeficientes de proporción acordes con la percepción humana, sus valores son 0,2989, 0,5870 y 0,1140 respectivamente.

Operaciones básicas. Principales operaciones aplicables sobre las imágenes digitales.

Operaciones Aritméticas. Como se había mencionado previamente las imágenes se pueden tratar como matrices, por lo tanto, es posible realizar las operaciones aritméticas de suma, resta, multiplicación y división. Además de poder realizar la convolución entre ellas.

$$s(x, y) = f(x, y) + g(x, y)$$

$$d(x, y) = f(x, y) - g(x, y)$$

$$m(x, y) = f(x, y) \times g(x, y)$$

$$v(x, y) = f(x, y) / g(x, y)$$

En la Figura 13 se aprecian ejemplos de las operaciones de suma y resta entre imágenes digitales.



(a) Imágenes Originales



(a) Suma



(c) Diferencia

Figura 13. Ejemplo de resultados de operaciones entre imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Operaciones Lógicas También es posible realizar operaciones lógicas entre imágenes, mayormente estas operaciones se realizan entre imágenes binarias, sus aplicaciones dependen del uso del usuario, pero se puede mencionar principalmente:

- **NOT** Invierte el valor de la imagen restando en cada píxel el máximo valor permisible menos el actual, en imágenes de 8 bits es de 255.
- **OR/XOR** Es útil para procesar imágenes binarias y detectar desplazamientos entre fotogramas.
- **AND** Puede usarse para detectar diferencias en imágenes o producir regiones con alto brillo a través de máscaras o plantillas.

Se pueden generar también los operadores NAND, NOR, NXOR como combinación de las funciones ya mencionadas (Solomon y Breckon, 2011)

Binarización. Una imagen binaria se caracteriza por presentar solo dos valores

posibles de intensidad en cada píxel, generalmente representados como 0 o 1, estas imágenes son usadas para la detección de bordes.

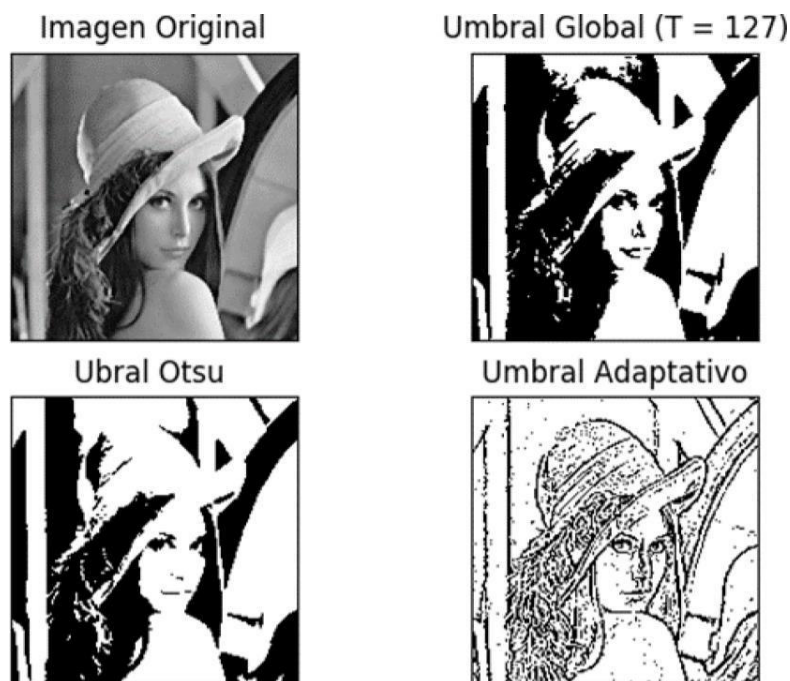


Figura 14. Binarización de una imagen con distintos métodos. Fuente: Elaboración propia.

Simple Para conseguir imágenes binarias se trabaja con umbrales, si el valor del píxeles mayor que el umbral T se asigna el valor de uno, y si el valor del píxel es menor, se asigna cero.

$$\begin{cases} 1, Si f(x,y) > T \\ 0, Si f(x,y) < T \end{cases}$$

Un valor umbral muy bajo provocará que la imagen resultante muestre gran cantidad de blancos, y un valor muy elevado resultaría en una imagen binarizada con muchas sombras. La elección del valor se puede realizar de forma sencilla cuando el objeto y el fondo están bien definidos (en la Figura 14 $T = 127$), y el umbral es posible hallarlo de forma iterativa. Pero en casos en los que el objeto y el fondo tienen varias escalas de grises es mejor usar un algoritmo que garantice el óptimo valor del umbral.

Existe otra forma de generar un umbral que sea robusto ante las variaciones de iluminación en la imagen, los umbrales adaptativos o locales toman distintos valores de umbral para un píxel en base a la vecindad del mismo. La forma en la que se usa los píxeles adyacentes tiene muchas variaciones.

Otsu. El método de Otsu, llamado así en honor a Nobuyuki Otsu que lo publicó en 1979 (Otsu, 1979) usa técnicas de estadística para obtener el valor óptimo del umbral. Si se definen las clases C_0 y C_1 correspondientes al objeto y el fondo, en una imagen con niveles de intensidad 1, 2, ...L entonces los valores de probabilidad para cada clase delimitadas por el valor k correspondiente al nivel de intensidad en el umbral es:

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i$$

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - P_1(k)$$

La varianza entre las clases para un umbral con nivel de intensidad k está dada por:

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_g P_1(k) - \mu(k)]^2}{P_1(k)(1 - P_1(k))} \quad (Wm^{-2}m^{-1}) \quad \text{Eq 11}$$

Donde μ_g es la esperanza general, y $\mu(k)$ es la esperanza de la clase C_0 . Para encontrar el valor de k^* óptimo se debe encontrar el valor que maximice la ecuación anterior.

$$\sigma_B^2(k^*) = \sigma_B^2(k) \quad 0 < k < L \quad \text{Eq 12}$$

El valor de k^* es usado para el umbral en la ecuación. En la Figura 14 se muestra los resultados de distintos métodos de binarización mencionados para una misma imagen.

Operaciones complejas. Se mencionan las más destacadas.

Rotación La rotación de la imagen está sujeta a un ángulo de rotación θ determinado por el usuario, se representa por la matriz:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & (1 - \cos(\theta)) * x - \sin(\theta) * y \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & \sin(\theta) * x + (1 - \cos(\theta)) * y \end{bmatrix} \quad \text{Eq 13}$$

Donde x e y son los puntos del eje de rotación.

Escalamiento El escalamiento consiste en redimensionar la imagen expandiendo o reduciendo su tamaño. Esta operación se puede expresar mediante notación matricial:

$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \quad \text{Eq 14}$$

Donde S es la matriz de escalamiento y S_x e S_y son los factores de escalamiento para los ejes x e y.

Filtros. Los filtros en el procesamiento de imágenes sirven para realzar u ocultar ciertos aspectos de la imagen. Todos los filtros se aplican usando máscaras a un píxel y sus vecinos, el tamaño de la máscara depende del filtro usado. Se describen a continuación los más comúnmente usados.

Media. El filtro de la media es el más simple, ya que usa un promedio de todos los píxeles vecinos para asignarlo al píxel central.

Gaussiano. Este filtro usa distribución de pesos en la máscara de tipo gaussiano, y el resultado se asigna al valor central. Tanto el filtro de la media como el gaussiano sirven para eliminar ruido de la imagen. En la Figura 15 muestra la máscara de los filtros ya mencionados.

$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{213} \times$	1	4	7	4	1
$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$		4	16	26	16	4
$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$		7	26	41	26	7
				4	16	26	16	4
				1	4	7	4	1

(a) (b)

Figura 15. Ejemplo de matriz del filtro gaussiano. Fuente: Elaboración propia.

Sobel y Laplaciano. Existen filtros que permiten realzar patrones en la imagen, en este caso líneas, dependiendo de la configuración. Estos filtros son conocidos como derivativos, los filtros derivativos pueden ser de primer o segundo orden, siendo los más conocidos el filtro Sobel y Laplaciano correspondientes a cada orden (Chityala y Pudipeddi, 2020). Si bien las operaciones derivativas tienen una representación matemática, para realizar la operación se usan máscaras, la Figura 16 muestra algunas de las máscaras usadas.

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1
(a)		
0	1	0
-1	4	-1
0	-1	0
(c)		

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1
(b)		
-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1
(d)		

Figura 16. Ejemplos de máscaras para los filtros Sobel y Laplaciano. Fuente: Elaboración propia.

Fourier. La transformada de Fourier es una expresión matemática que permite visualizar un grupo de datos en el dominio de la frecuencia. La expresión general viene dada por:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-iu2\pi x} dx \quad \text{Eq 15}$$

Una imagen es una representación de una matriz bidimensional que puede presentar canales de color, para este caso es apropiado mencionar la expresión de Fourier para dos dimensiones dada por la siguiente expresión:

$$F(u) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad \text{Eq 16}$$

En procesamiento digital se usa la transformada rápida de Fourier, la cual consiste en algoritmos para hallar los coeficientes en tiempo discreto y de una forma eficiente. La Figura 17 muestra la aplicación de la transformada rápida de Fourier a una imagen.



Figura 17. Transformada rápida de Fourier de una imagen. Fuente: Elaboración propia.

Segmentación La fijación de los umbrales para la binarización presentan algunos problemas cuando se presentan variaciones significativas de iluminación en algunas regiones de la imagen. El algoritmo de división y fusión consiste en dividir la imagen para poder detectar regiones con características similares, procesarlas y volverlas a unir. El algoritmo consta de 3 pasos principales:

1. Dividir la imagen en cuatro regiones R_i .

2. Si las regiones no cumplen con la condición de procesamiento $Q(R_i) = TRUE$ se subdividen estas en otras cuatro regiones.
3. Una vez ya no se pueda dividir más, realizar la unión de las regiones.

Este algoritmo y algunas variaciones son usados en el cálculo adaptativo.

Reconocimiento de objetos. Existe una gran cantidad de técnicas usadas para re conocer objetos, tratar de enumerar todas y cada una de ellas sería contraproducente en este trabajo debido a los requerimientos de este trabajo de investigación, sin embargo, se pueden agrupar en dos bloques principales.

Tradicional. El reconocimiento de objetos usado en el procesamiento de imágenes de forma tradicional se refiere al uso de modelos que describan el fenómeno u objeto que se quiere identificar. Las operaciones mencionadas previamente son algunas de las usadas para generar los descriptores que permitan detectar los objetos deseados.

Aprendizaje automático. El aprendizaje automático permite realizar la detección de los objetos mediante el entrenamiento de un algoritmo a través de una gran cantidad de datos de muestra, que sirven como referencia para reconocer objetos o fenómenos en imágenes digitales.

En el presente trabajo de investigación se usarán técnicas usadas en los métodos tradicionales sin incurrir propiamente en ellos, ya que no es necesario realizarlos, tal como se verá en el siguiente capítulo.

Antecedentes del estudio

(Bower et al., 2009) proponen un método para calibrar cámaras infrarrojas (IR) usando agua como fuente de radiación. Usan sustracción de imágenes para ubicar el termistor en las muestras y enfocarse solo en esos píxeles para la captura de datos. Realizan un análisis

térmico del sistema para corregir errores debido a la interacción del sistema con el ambiente en el que se realiza la medición. Usan una regresión polinomial para obtener los valores de temperatura desde el nivel intensidad de cada píxel en la imagen. Este método está limitado al rango de temperatura 0 a 100°C, y se deben cumplir condiciones específicas de ángulo de observación y entorno para obtener resultados similares.

(Pron y Bouache, 2013) dejan de lado las calibraciones a nivel de píxel para concentrarse en la calibración global del arreglo de sensores, describen dos métodos usados para conseguir su objetivo. Comparan inicialmente la calibración de fábrica de la cámara, evaluando los valores de cada píxel a una temperatura homogénea. Para obtener una variación menor entre los píxeles proponen la calibración global polinomial y la calibración basada en la ley de Planck, este último método descartado por los autores debido a la complejidad para encontrar todos los coeficientes. Usan la regresión polinomial a cada píxel de la cámara para mejorar la precisión de la cámara, y se realiza una nueva comparación entre las respuestas de los píxeles con la calibración de fábrica y la realizada por ellos para verificar que la calibración polinomial de al menos orden 4 ayuda a mejorar la precisión de lecturas entre píxeles.

(Budzier y Gerlach, 2015) usan un modelo matemático radiométrico para cámaras infrarrojas no enfriadas, el cual considera interferencias propias para realizar correcciones a nivel del píxel. Consideran cinco pasos para realizar la calibración de una cámara IR de este tipo. Los primeros cuatro pasos, corrección de no uniformidad, dependencia de temperatura, píxel muerto y corrección del obturador; trabajan con los valores brutos del sensor y operan píxel por píxel; el último paso de calibración, calibración radiométrica, se evalúa en conjunto los píxeles dependiendo del nivel de intensidad que presente la imagen térmica. Usando una curva de Planck como modelo realizan una regresión para obtener los parámetros y usarlos en la obtención final de temperatura.

(Kelly et al., 2019) realizan una investigación aplicada al uso de cámaras térmicas en UAVs, la cual fue realizada con una cámara térmica FLIR Vue Pro 640, cuya imagen muestra valores relativos de temperatura. Sus experimentos en laboratorio incluyen la exposición de la cámara a un cuerpo negro, el uso de un ventilador para simular corrientes de aire y una lámpara halógena para simular influencia del sol. Las pruebas de laboratorio entregaron valores de temperatura con una precisión de $\pm 0,5$ °C, pero sus pruebas de campo entregaron variaciones de ± 5 °C. Usan modelos lineales para obtener las curvas de

regresión de temperatura, obteniendo varios modelos con los puntos de calibración. También consideran el tiempo de inicio de adquisición con las cámaras térmicas un factor importante, y debido al poco tiempo de vuelo de sus pruebas (< 10 minutos) comparado con el tiempo de calentamiento propuesto de al menos 30 minutos. Sin embargo, no lograron obtener lecturas adecuadas con los parámetros que consideraron.

En resumen, a lo mencionado en esta sección, el uso de la calibración global es una forma de trabajar sin acceder a los valores en bruto del sensor, pero también es importante poder evaluar los parámetros externos que afectan la medición de temperatura. Es posible usar ambos métodos de calibración, siendo la aproximación a la curva de Planck la que presenta una relación directa con los parámetros de emisividad, reflectancia, transmitancia, etc. pero la regresión polinómica ha obtenido una mejor respuesta según los estudios previos indicados.

Definición de términos

“Llamado también marco conceptual o glosario por otros, consiste en definir los términos básicos utilizados en el planteamiento del problema, objetivos e hipótesis, del proyecto de investigación, evitando repetir la definición de términos que han sido tratados dentro de las bases teóricas examinadas.” (Ñaupas, 2014, p. 175). Por lo que se listan a continuación las definiciones de los términos que no fueron declarados previamente, y son importantes para la mejor comprensión del tema.

Calibración: En física calibración se refiere a ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con respecto a un patrón de referencia. (Real Academia de la Lengua Española, 2014).

Enfocar: Hacer que la imagen de un objeto producida en el foco de una lente se recoja con nitidez sobre un plano u objeto determinado (Real Academia de la Lengua Española, 2014).

Modelo matemático: Un modelo matemático es un modelo que utiliza fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones (Roldán, 2019).

Radiometría: Según el significado de las palabras que lo componen, la radiometría se define como la medición de la radiación de un objeto, o el uso de un radiómetro para esos fines (Palmer y Grant, 2010, p. 1). Esto abarca todo el espectro electromagnético.

Termografía: Técnica de registro de las diferencias de temperatura que presenta la superficie de un cuerpo, basada en la captación de las radiaciones infrarrojas que emite. (Real Academia de la Lengua Española, 2014)

HIPÓTESIS Y VARIABLES

HipóT

Hipótesis general

El presente trabajo busca realizar la calibración radiométrica de una cámara de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos.

Hipótesis específicas

1. Es posible obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara de estudio.
2. El desarrollar un software permitirá obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por pixel.
3. Se soluciona el problema de enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias.

Variables

En la presente tesis se distinguen las siguientes variables principales:

Variable independiente C: Calibración radiométrica de una cámara de bajo costo.

Variable dependiente E: Mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos.

En cuanto a las variables complementarias se tiene lo siguiente.

Variables independientes:

- Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja
- Software.
- Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias.

Variables dependientes:

- Temperatura calculada para la cámara de estudio.
- Valores medibles de temperatura por pixel.
- Solución del problema de enfoque manual de la cámara.

Operacionalización de las variables

Definición conceptual de la variable C

Según (Mitchell, 2010) la calibración radiométrica se define como transformación a entrada de datos a una base radiométrica común.

Operacionalización de la variable C

Se desarrolló un objeto de calibración para medir los valores relacionados a la radiación infrarroja, posteriormente se usaron algoritmos de procesamiento de imágenes y reconocimiento de números con métodos tradicionales para extraer los valores de las imágenes de la cámara; y con esto generar la curva de comportamiento, es decir, el modelo matemático que describe la relación de valores numéricos y la temperatura, teniendo así la calibración radiométrica.

Definición conceptual de la variable E

Según (Vavilov y Burleigh, 2020) un estudio termográfico consiste en el análisis de distribución espacial y temporal de parámetros térmicos (temperatura) en los objetos, generalmente lograda mediante la creación de imágenes infrarrojas correspondientes.

Operacionalización de la variable E

El estudio termográfico está destinado a trabajar con imágenes en entornos volcánicos, para esto se desarrolló el software que usa la calibración radiométrica y permite obtener el valor de temperatura de cada píxel en la imagen.

Definición conceptual de la variable “Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja”

Según (de Torres Curth, 2014) un modelo matemático es la expresión formal, mediante el uso del lenguaje matemático, de las relaciones entre los componentes de un sistema.

Operacionalización de la variable “Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja”

El modelo matemático se obtuvo mediante regresión, usando los valores obtenidos en la calibración.

Definición conceptual de la variable “Temperatura calculada para la cámara de estudio”

Según (Mohan, 2019) la temperatura de un cuerpo es el grado de calor o frialdad del cuerpo.

La temperatura más alta posible alcanzada en el laboratorio es de aproximadamente 10^8 K,

mientras que la temperatura más baja posible alcanzada es 10^{-8} K.

Operacionalización de la variable “Temperatura calculada para la cámara de estudio”

Se usan los valores del ADC mostrados en la imagen térmica, los cuales entregan el valor proporcional a la temperatura. Este es calculado mediante la regresión obtenida en la calibración.

Definición conceptual de la variable “software”

Según (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017) un software se define como uno o más programas de computadora junto con cualquier elemento auxiliar no electrónico ni mecánico que lo acompañe, como documentación y hojas de trabajo, entregados bajo un solo nombre para uso de otros.

Operacionalización de la variable “software”

Se desarrolló un software capaz de realizar la conversión de temperatura desde los videos térmicos de la cámara. Usando algoritmos de reconocimiento de números, y procesamiento de imágenes.

Definición conceptual de la variable “Valores medibles de temperatura por pixel”

Según (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017) pixel se define como el elemento más pequeño de una pantalla, y la temperatura ya ha sido definida previamente, para esta variable se tiene la ratio entre ambas.

Operacionalización de la variable “Valores medibles de temperatura por pixel”

Los valores se acceden mediante el software, usando el cursor, se puede conocer el valor que tiene cada pixel en la imagen procesada. Así como los valores máximos y mínimos asociados a los valores de temperatura máximo y mínimo de la imagen.

Definición conceptual de la variable “Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias”

Según (RN Childs, 2019) el diseño es el proceso de concebir, desarrollar y realizar productos, artefactos, procesos, sistemas, servicios, plataformas y experiencias con el objetivo de satisfacer necesidades o deseos identificados o percibidos que normalmente trabajan dentro de restricciones definidas o negociadas.

Operacionalización de la variable “Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias”

Se diseñaron piezas mecánicas, para funcionar en conjunto con componentes electrónicos y electromecánicos. Es necesario un pequeño software para el microcontrolador que controle el buen funcionamiento de las piezas. Más adelante se detalla el sistema usado.

Definición conceptual de la variable “Solución al problema de enfoque manual de la cámara.”

Según (Guerrero y Caballo, 2019) el enfoque de la cámara se define a la acción o instante en que la imagen que se encuentra enfrente de la cámara quede nítida en el plano focal.

Operacionalización de la variable “Solución al problema de enfoque manual de la cámara.”

Se ajusta el enfoque mediante las piezas desarrolladas, el actuador se complementa con un radiocontrol remoto, además de observarse visualmente la variación en la pantalla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Tanto la calibración como pruebas de campo fueron realizadas en el Radio Observatorio de Jicamarca, el observatorio es una instalación del Instituto Geofísico del Perú, el cual es operado con el apoyo de la US National Science Foundation a través de un acuerdo cooperativo con la Universidad Cornell; el observatorio está ubicado a 10 km al este de la carretera Central, exactamente a 11.95° de latitud sur y 76.87° de longitud oeste. Para la calibración se dispuso del antiguo laboratorio de Investigación Desarrollo e Innovación, y las pruebas de campo en su amplio exterior.

Diseño de la investigación

El tipo del proyecto se basa en una investigación aplicada, ya que se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías (Tamayo, 2004). Para lo cual se desarrollaron sistemas de hardware y software con los que se adquirirán datos para el proyecto y obtener una regresión no paramétrica para la variable independiente.

En cuanto al diseño de la investigación, el nivel es de tipo experimental debido a que en los experimentos se ha manejado de manera deliberada la variable experimental y luego se ha observado lo que ocurre en condiciones controladas (Tamayo, 2004) para obtener la calibración, y justamente esto nos define el tipo de diseño, cuasiexperimental con diseño de series cronológicas obtenidas mediante el cuerpo negro.

Motor y sistema de enfoque

El sistema de enfoque fue pensado inicialmente para funcionar de forma autónoma, pero

en los primeros cálculos fue imposible realizarlo de esta forma debido a dos motivos: El primero es que no se disponía de un microprocesador que procese las imágenes en tiempo real, e implementar hardware no era una opción debido a la reducido tamaño del que se dispone en el multirrotor. Y el segundo fue que para conocer la posición de la lente era necesario desarrollar un sistema de detección de posición lineal para la realimentación del sistema.

Por tales motivos se optó por usar al copiloto de vuelos para realizar el ajuste del enfoque al nivel que mejor resolución ofrezca. En cuanto a la forma en que se maneja el ajuste siguió siendo de forma remota, a través de un actuador y piezas mecánicas diseñados especialmente para la cámara.

El enfoque óptimo en una cámara térmica permite tener lecturas acordes a los parámetros de calibración (Measurement Standards Laboratory of New Zealand, MSL, 2017), en caso de no usar un enfoque adecuado, la radiación en el detector se vería alterada no pudiendo relacionar esta con el patrón de calibración predefinido. En la Figura 18 se muestra lo mencionado, las dimensiones y ángulos están exagerados para apreciar la alteración.

Actuador. La variación del enfoque se consigue con la variación de la proximidad de la lente externa, esta lente rota en sentido horario o antihorario para cambiar su posición en el eje x. La lente tiene un hilo que le permite rotar un máximo de 50 vueltas aproximadamente. Debido a la naturaleza del movimiento necesario para manejar remotamente el enfoque, el actuador necesario es un motor dc, para la elección del motor se consideraron los siguientes puntos:

- **Dimensión.** Como se ha mencionado anteriormente, el espacio disponible en el multirrotor es reducido.
- **Peso.** Un aspecto de vital importancia en los vehículos aéreos es el peso, este debe ser el mínimo posible.
- **Consumo.** La cantidad de energía requerida para su funcionamiento afectará al tiempo de vuelo del multirrotor.

- **Adquisición.** Es importante que los productos sean de fácil acceso en el mercado local, con el fin de evitar largos tiempos de espera en compras internacionales.

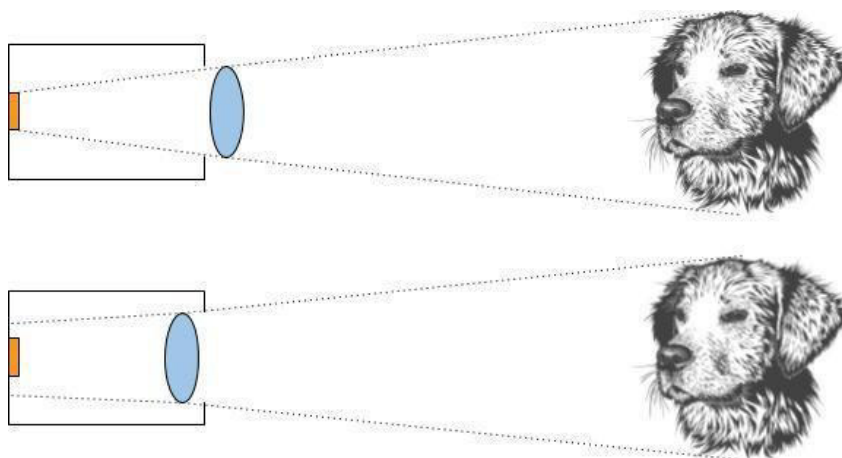


Figura 18. Variación del enfoque respecto al detector. Fuente: Elaboración propia.

Con estas consideraciones se encontraron dos opciones, el primero un motor paso a paso 28BYJ48, y el segundo un micro motor dc Pololu #2203 con reductor de velocidad (ver Anexo B). De la Tabla 2 se puede observar que el motor de escobillas es una mejor opción frente al otro posible candidato en cuanto al torque y precisión. El motor DC requiere un encoder adicional para controlar su posición. La lente de la cámara pesa 50 gr por lo que el torque de ambos es suficiente para rotarlo.

Tabla 2. Comparación de los motores.

Motor	peso	dimensiones	torque	Consumo
Paso a paso	35 gr	35 x 28 x 29 mm	3 kg.mm	120 mA
Motor escobillas DC	11 gr	12 x 10 x 32 mm	2,2 kg.mm	0,1 A @200 rpm

Fuente: Elaboración propia.

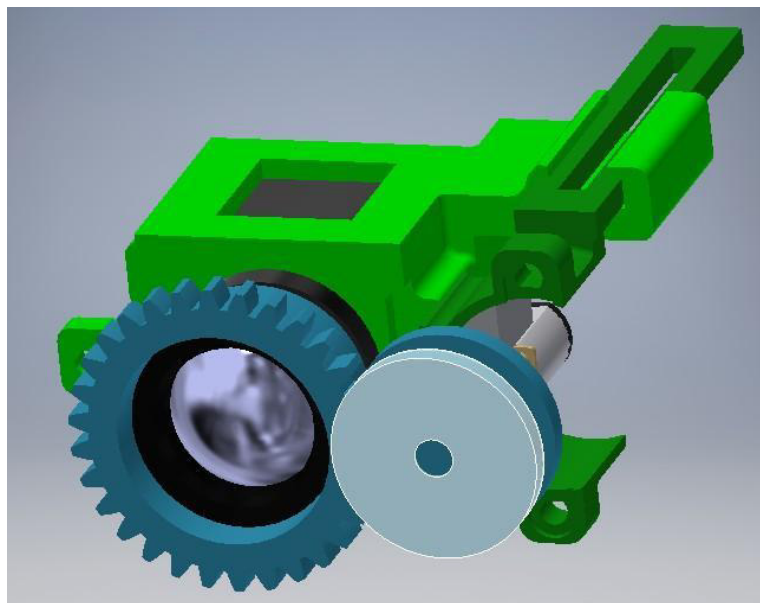
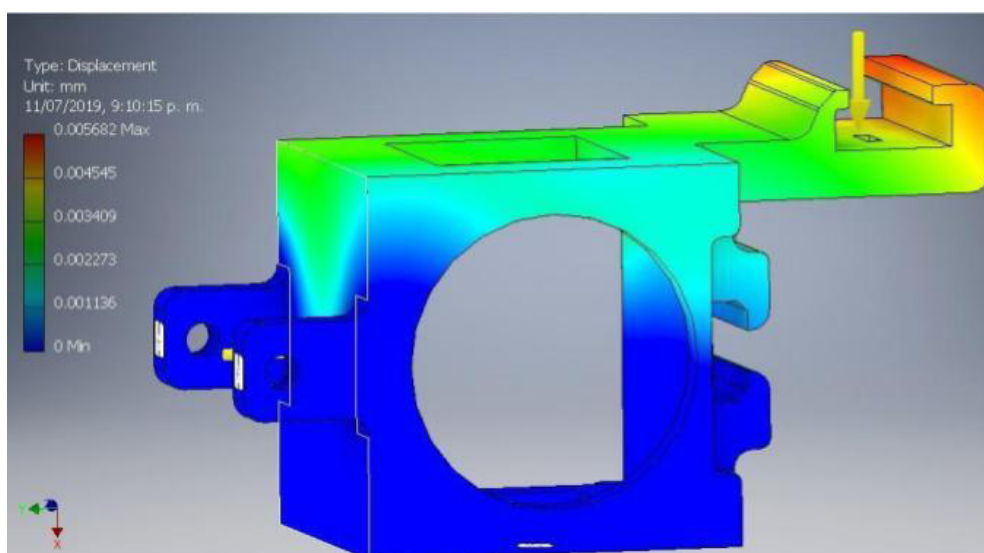


Figura 19. Piezas diseñadas en 3D. Fuente: Elaboración propia.

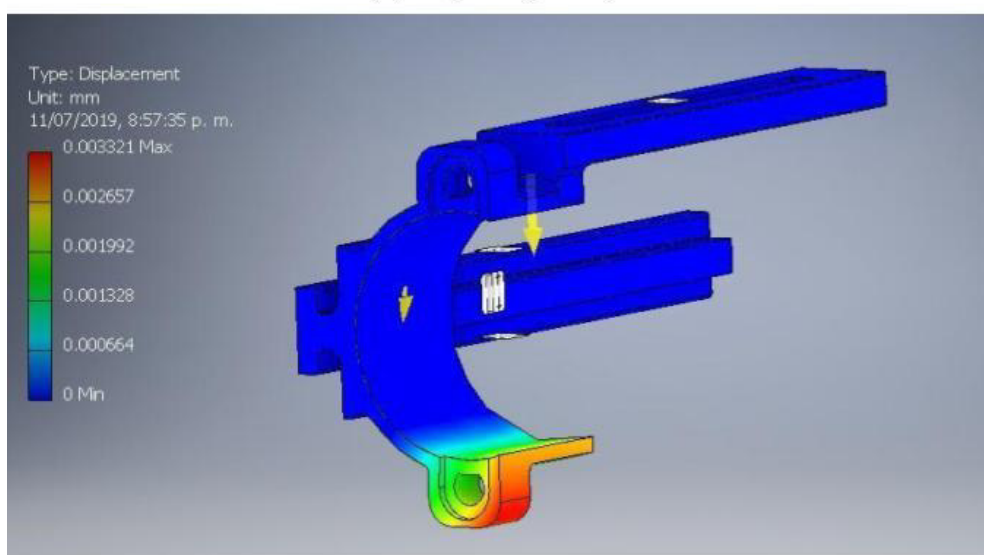
Diseño y simulación. Se virtualizaron todos los componentes involucrados en el enfoque, de este modo se puede verificar su funcionamiento antes de fabricar las piezas (Figura 19), además de poder realizar una simulación de análisis de esfuerzo a cada pieza que se vaya a fabricar mediante impresión 3D para garantizar que podrán funcionar en el equipo sin riesgo a romperse.

Se diseñaron cinco piezas en total, moldeadas para ser fabricadas con una impresora 3D usando plástico PLA (ácido poliláctico). El PLA tiene una temperatura de fusión alrededor de los 100 °C, este bajo punto de fusión podría ser inadecuada para usar en entornos volcánicos sin embargo mediciones realizadas en el volcán Sabancaya (Flores et al., 2019) muestran que los vuelos bordeando el cráter pueden presentar temperaturas cercanas a 0 °C. El drone está pensado para realizar vuelos alejados de la fumarola por lo que todo el equipamiento no se encontrará sometido a las altas temperaturas del cráter o su pluma.

El análisis de esfuerzo se realizó a las piezas principales, las cuales soportan los componentes o sirven de fijación hacia la estructura del multirrotor. En la simulación se usó una fuerza de 10 N, la cual es 5 veces lo que soportará realmente, aplicada a las piezas de soporte y sujeción. Los planos con las medidas de las piezas construidas se pueden encontrar en el Anexo D. Los resultados de esto se muestran en la Figura 20 donde se puede apreciar que el desplazamiento es menor al 0,01 mm.



(a) Soporte principal.



(b) Soporte móvil.

Figura 20. Simulación de deformación en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia.

Implementación. El vehículo donde ha de ser usado este proyecto de investigación es un multirrotor tipo hexacóptero, el cual dispone de un cardán auto estabilizado para la captura de vídeo. Este cardán permite un control de cada eje a través de señales de entrada con modulación por ancho de pulso (PWM). La radio de control del multirrotor dispone de 8 canales PWM, y para el vuelo del multirrotor se requiere como mínimo 5 (*Apaza, Avance sobre la calibración y pruebas de campo del cuadricóptero, 2018*), por lo que se dispone de 3 canales para usarlos en el control del enfoque. Para controlar la orientación del cardán son necesarias al menos dos señales PWM, para el eje X o Roll y el eje Y o Pitch, el eje Z es posible controlarlo rotando el dron en ese eje. Además, se requiere controlar el motor DC responsable del movimiento de la lente, para lo que se usará el canal restante.

Tabla 3. Asignación de canales extra en el receptor de radio.

Canal PWM	Función
Canal 6	Eje Y (Roll)
Canal 7	Eje X (Pitch)
Canal 8	Motor DC

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra la asignación de los canales con sus funciones planteadas, debido a que el canal 8 se usará para controlar el motor, es necesario un circuito lógico o un microcontrolador puente que interprete esta señal para que pueda generar el movimiento del motor en ambos sentidos, e indicarle su activación o desactivación. Con las mismas premisas de la selección de los motores, se eligió realizar el dispositivo puente con un Arduino nano y el circuito integrado L298n para el control de potencia de los motores. La Figura 21 muestra de forma simple la forma de conexión necesaria entre los componentes para controlar el motor dc desde el radio control del piloto, y en la Figura 22 se muestra el esquema de conexión de los principales componentes.

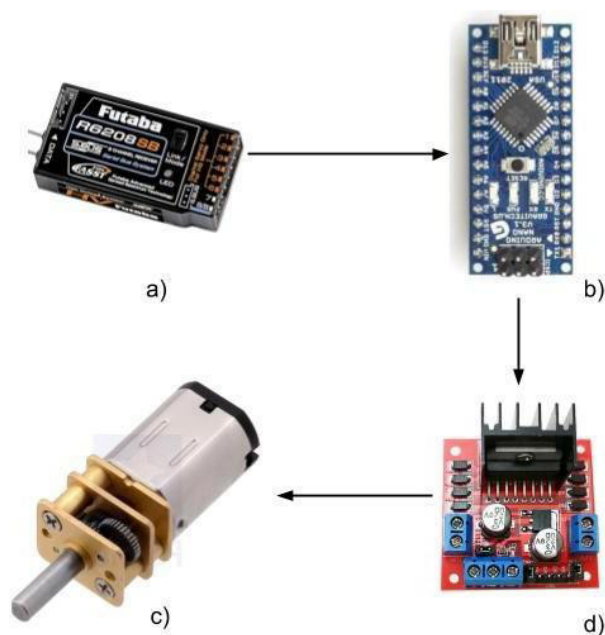


Figura 21. Componentes del sistema. Fuente: Elaboración propia.

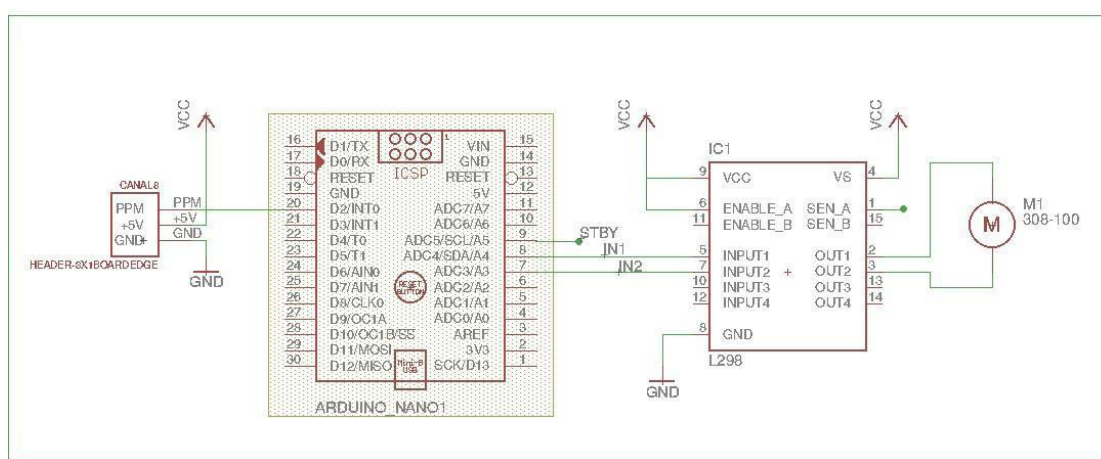


Figura 22. Esquema de conexión electrónica para enfoque. Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 23 muestra la lógica usada para la programación del bloque electrónico puente entre el motor y el receptor de radio, es decir del Arduino nano. El código completo se puede encontrar en el Anexo C.

Este hardware se montó en el cardán de tres ejes del multirrotor, las dimensiones de las piezas permitieron colocarlo con facilidad. El peso de todas las piezas, incluida la cámara térmica es de 195,8 gr. La cámara GoPro que se usa para capturar imágenes en el espectro

visible tiene un peso de 150 gr.

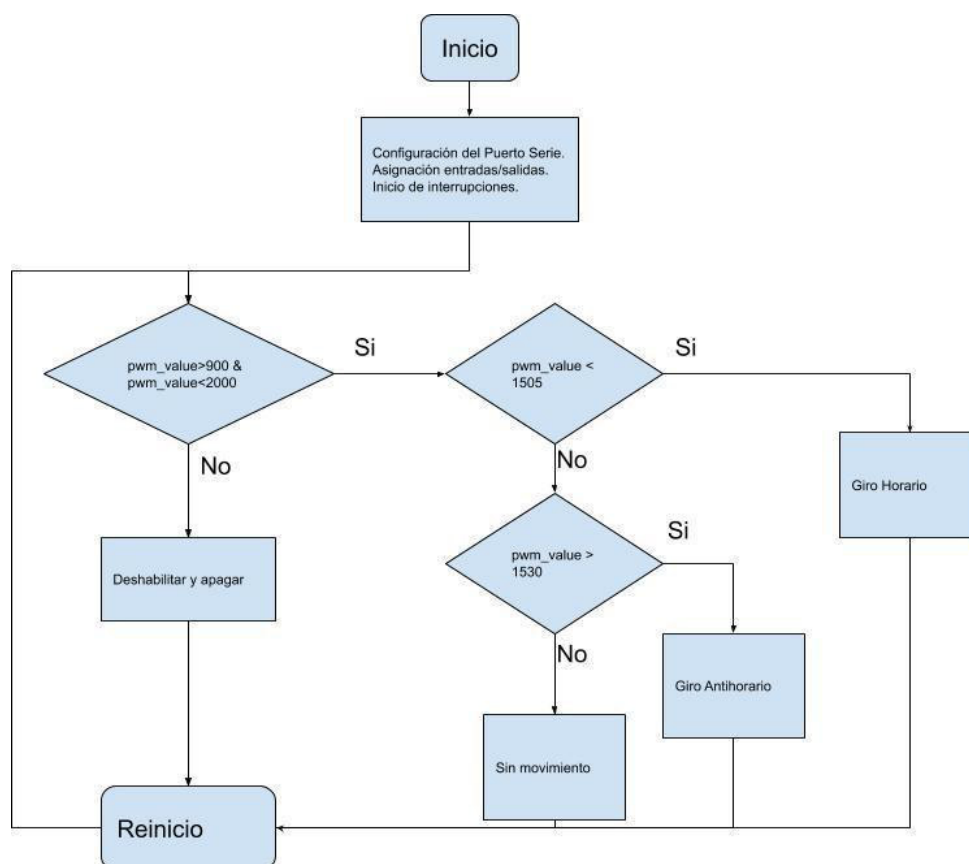
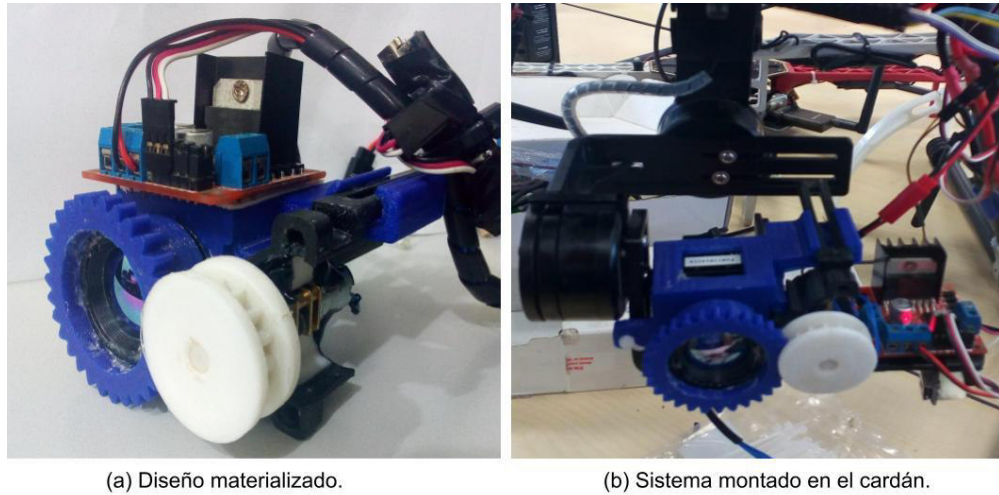


Figura 23. Diagrama de flujo para el programa de enfoque. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24 se observa la variación de colores entre algunas piezas del sistema, esto debido a que se imprimieron nuevamente algunas piezas debido a que no terminaban de encajar perfectamente con el resto, estas variaciones son debido al error propio de impresión 3D. Las reimpresiones no siempre se realizan con el mismo color de material, esto no afecta al funcionamiento del sistema, por lo que el resultado final no es uniforme respecto al color.



(a) Diseño materializado.

(b) Sistema montado en el cardán.

Figura 24. Piezas reales fabricadas con PLA ya ensambladas. Fuente: Elaboración propia.

Obtención de temperatura

Se vio que la ecuación de Planck proporciona una forma de obtener la exitancia desde la temperatura. Debido a que el valor numérico digital de los valores brutos del sensor está en relación directa a la exitancia, es posible realizar una regresión de la temperatura en la ecuación de Planck. Al despejar la temperatura desde Eq 2 se obtiene:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1 \lambda^{-5}}{M(\lambda, T)} + 1\right)} \quad (^{\circ}K) \quad \text{Eq 17}$$

(Budzier y Gerlach, 2015) muestran la regresión desde la ecuación de Planck, la cual tiene la forma:

$$T = \frac{B}{\lambda \ln\left(\frac{R}{V_D - O} + F\right)} \quad \text{Eq 18}$$

Observando estas ecuaciones, se observa que $B = c_2/\lambda$ y que $F = 1$, el valor de R no es igual a $c_1 \lambda^{-5}$ ya que esto correspondería a un cuerpo negro ideal, y la señal del sensor se encuentra afectada por otros parámetros, por lo que se dejará este valor como variable. La longitud de onda de la cámara es de 8 a 14 μm , por lo que se trabajará con la longitud central 11 μm . Reemplazando este valor de longitud de onda en:

$$B = \frac{C_2}{\lambda} = \frac{1,439 \times 10^{-2}}{11 \times 10^{-6}} = 1308,45$$

Usando este valor en Eq 18:

$$T = \frac{1308,45}{\lambda \ln\left(\frac{R}{V_D - O} + 1\right)} \text{ (}^\circ K\text{)} \quad \text{Eq 19}$$

El valor de esta ecuación está en Kelvin, por lo que para obtener en Celsius se tendrá que restar 273.

$$T = \frac{1308,45}{\lambda \ln\left(\frac{R}{V_D - O} + 1\right)} - 273 \text{ (}^\circ C\text{)} \quad \text{Eq 20}$$

En la ecuación los valores que se deben hallar son los de R y O ya que V_D corresponde al valor numérico digital que se tiene en la imagen de salida de la cámara. A primera vista se muestra complicada la forma de la ecuación para realizar una regresión de sus coeficientes, debido a esto las regresiones se desarrollaron con pequeños programas creados en software de cálculo para simplificar el proceso (Anexo C).

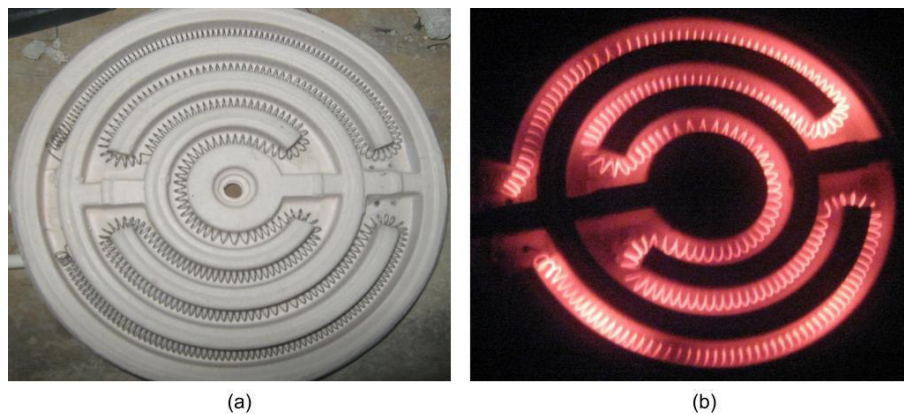


Figura 25. Resistencia de nicromo, a) Sin energía eléctrica, b) Con 220v AC. Fuente: Elaboración propia.

Diseño de cuerpo negro.

En cuerpo negro técnico que se implementó para la calibración de la cámara toma el diseño del plato caliente como fuente de radiación térmica con alta emisividad. La superficie de radiación es un disco de aluminio, de 10 cm de diámetro por 20 mm de espesor, el cual actúa como emisor final de la radiación, y permite distribuir la temperatura de forma homogénea en su superficie. La fuente de calor es un espiral de alambre bobinado de nicromo (ver Figura 25). El alambre de nicromo se puede calentar hasta aproximadamente 830 °C en aire (la temperatura exacta dependerá de los otros componentes del cable) sin oxidación severa y se puede usar solo, en forma de una tira plana o enrollado alrededor de un molde de cerámica, como una fuente muy conveniente de radiación térmica en las bandas de 3 - 5 y 8 - 14 μm .

La Figura 26 presenta el circuito de control de la resistencia de nicromo, y para el control de temperatura se usó un controlador de temperatura Rex C100 el cual ofrece una precisión de ± 3 °C (ver Anexo B) junto a un termopar tipo K.

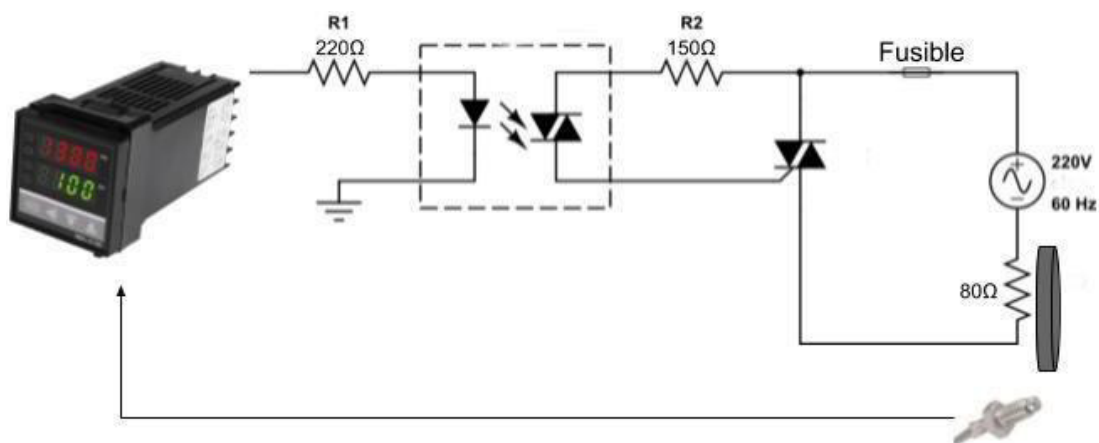


Figura 26. Diagrama de conexión para cuerpo negro. Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, las fuentes basadas en el uso de alambre de nicromo, o tira, son una de las formas más útiles de fuente de infrarrojos. Esto es el resultado de su simplicidad, larga vida, requisitos de energía relativamente bajos y alta salida de radiación. Las fuentes de alambre de nicromo por sí solas típicamente tienen emisividades del orden del 40 % al 60 %, con emisividades más altas del orden del 70 % al 90 % cuando están en forma de

alambre enrollado alrededor de un molde de cerámica (Williams, 2009, p. 89).

La placa de aluminio además de actuar como radiador, sirve para aumentar la emisividad de esta. Existen pinturas negras que proporcionan emisividades muy altas, como la desarrollada por Surrey Nano Systems (Surrey NanoSystems, 2019) con una emisividad de 0,999, aunque este material solo funciona a temperaturas inferiores a 80 °C. Para el recubrimiento se usó pintura de alta resistencia térmica Rust Oleum 313518 en color negro mate el cual tiene una emisividad de aproximadamente 0,96 (Carvill, 1994, p. 137), y soporta temperaturas de hasta 1093 °C.

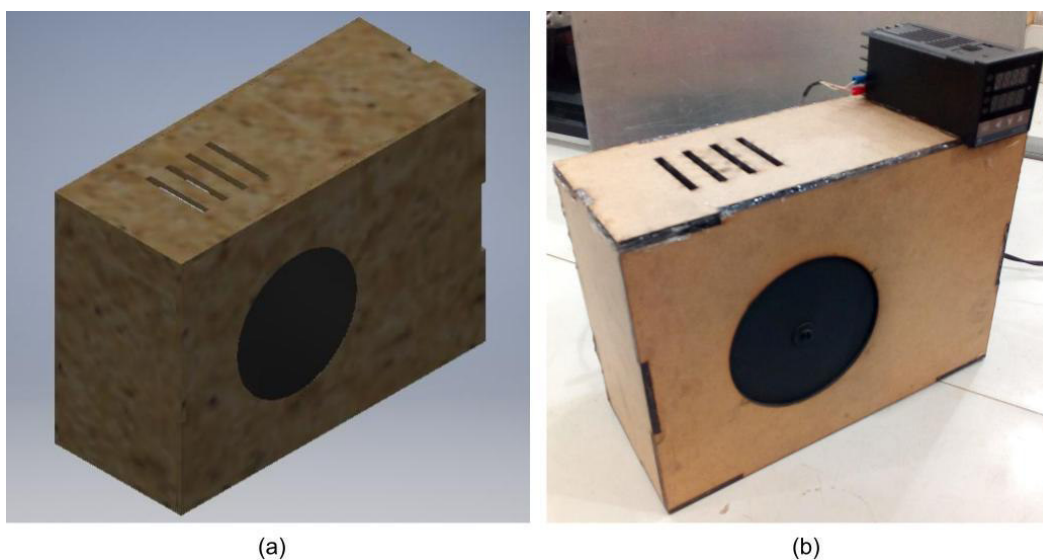


Figura 27. Diseño (a) e implementación (b) de cuerpo negro técnico. Fuente: Elaboración propia.

Se diseñó el chasis del cuerpo negro técnico en software de modelado 3D, posteriormente se fabricó en tableros de fibra de densidad media o MDF (por sus siglas del inglés Medium density fibreboard) con corte láser. Se ensambló todas las piezas junto a la electrónica de control para la resistencia de nicromo, y el controlador de temperatura tal como se muestra en la Figura 27. Si bien es posible controlar temperaturas de hasta 400 °C, el material del chasis limita el rango a 200 °C, más esto es suficiente ya que se observó que a cortas distancias el límite de medición de la cámara es de aproximadamente 185 °C. En el caso de entornos volcánicos del Perú, se ha observado que la temperatura dentro del cráter es de unos 391 °C (INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), 2015), y al no estar

directamente sobre el cráter los equipos no habría problemas por el nivel de temperatura, además de la atenuación por la distancia que se verá más adelante.

Diseño del software de procesamiento

Con la función que define la respuesta de temperatura del sensor obtenida en la sección anterior, se desarrolló un aplicativo que permita visualizar la temperatura de los cuerpos presentes en el vídeo térmico. El aplicativo fue desarrollado con lenguaje de programación Python, con la librería PyQt como base principal.

Este aplicativo tiene como objetivo reemplazar la pantalla de visualización, ya que no funciona como un software para post procesamiento como el ofrecido por algunos fabricantes de cámaras comerciales. El aplicativo final ofrece una visualización del máximo y mínimo valor de temperatura de la escena, así como un cursor para seleccionar píxeles específicos y conocer su temperatura. Debido a que este aplicativo funciona con archivos de vídeo en tiempo diferido, el cual es extraído de la memoria micro SD de la cámara térmica, se incluye los controles básicos de reproducción de vídeo: reproducir, pausar, detener, y velocidad de reproducción.

Como se mencionó en la problemática, la cámara ofrece una imagen en la cual se pueden apreciar de forma cualitativa según el color (ver Figura 28), pero es posible superponer los valores máximos y mínimos que detecta en sensor. Estos valores super puestos son los valores del ADC interno, por lo tanto, muestran un valor proporcional a la cantidad de radiación infrarroja captada por el sensor, y por ende a la temperatura. El vídeo de salida muestra imágenes en codificación JPEG, con un tamaño de 704 x 480 píxeles, no hay datos en bruto de temperatura adjuntos, por lo que se tuvo que desarrollar los algoritmos detectores de números que se describen en las siguientes secciones.

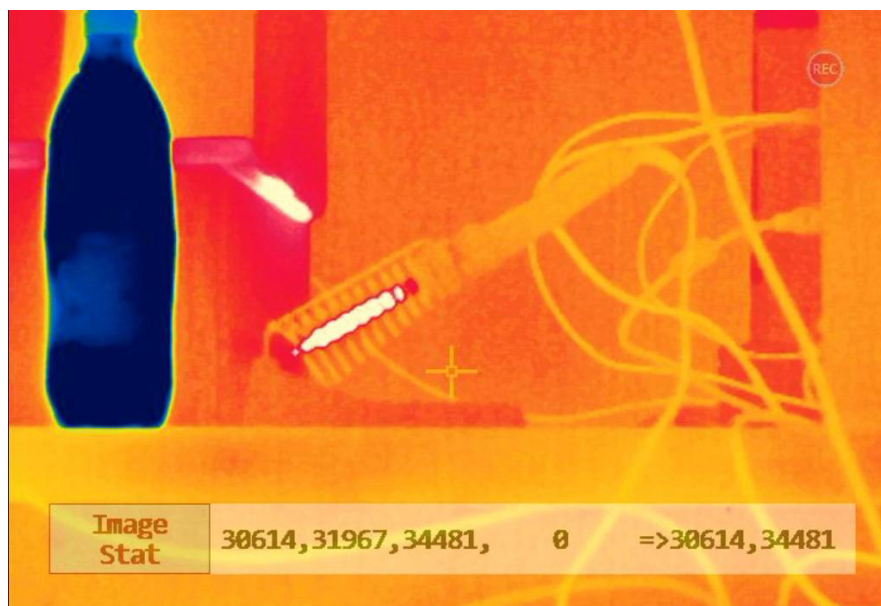


Figura 28. Imagen de salida de cámara IR con los valores de temperatura equivalente al ADC interno. Fuente: Elaboración propia.



Figura 29. Localización de los números de interés. Fuente: Elaboración propia.

Los valores numéricos del ADC del sensor con los valores máximo y mínimo se muestran estáticos en su posición en la pantalla (ver Figura 29), esto fue favorable para la detección de los números, ya que simplifica el uso de algoritmos que busquen los números por toda la pantalla. En este caso los píxeles que encierran estos números están comprendidos en:

- El área delimitada por los píxeles 413 al 428 y 525 al 656.
- Los píxeles (0,11), (12,23), (24,35), (36,47), (48,59), (72,83), (84,95), (96,107), (108,119), (120,131) tomando como imagen el área anterior.

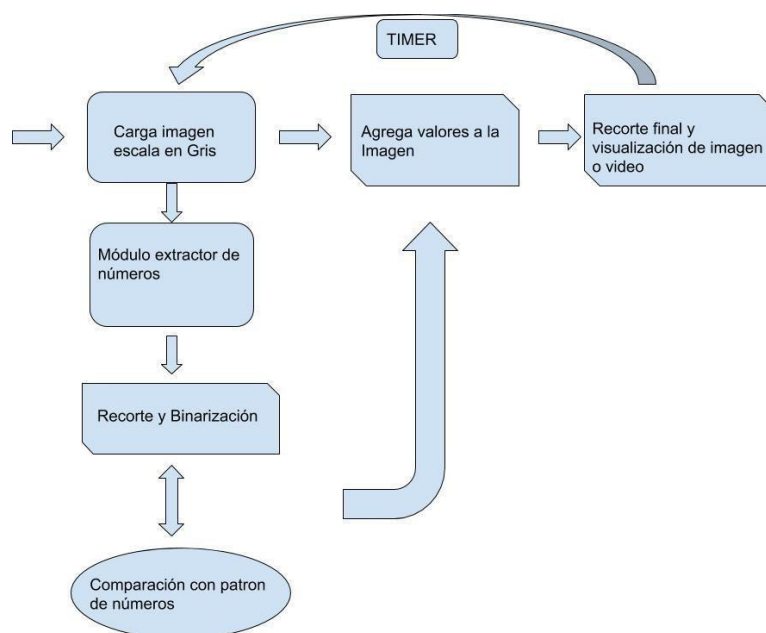


Figura 30. Diagrama de bloques del aplicativo. Fuente: Elaboración propia.

Se desarrolló un módulo, “num_recog.py”, donde se realizan las funciones del procesamiento de las imágenes y detección de números, junto a un programa principal, “Termo.py”, el cual tiene alojado el código del aplicativo en PyQt. El flujo del software se muestra en la Figura 30, en este se aprecian sus etapas, las cuales se irán mencionando en las siguientes líneas.

Imagen de entrada. La cámara ofrece hasta nueve paletas de colores, incluyendo la paleta original escala de grises, pero estas escalas son pseudocolores con un algoritmo de formación específico, algoritmo al cual no se tiene acceso. Estos pseudocolores almacenan en cada canal parte de información de la temperatura, sin embargo, no se puede usar una imagen con pseudocolor (Figura 28) como entrada del software, ya que al no conocer la función que le dio origen, no es posible obtener la imagen en escala de grises inicial.

El sensor entrega una señal que al ser procesada entrega un único valor por cada píxel, este valor es escalado a un valor de 8 bits para poder crear una imagen en formato visualizable por la pantalla, para obtener los 3 canales del formato JPEG se debe triplicar esta información, o alterarla para la formación de los pseudocolores y extraer los valores referenciales a la temperatura (Figura 29).

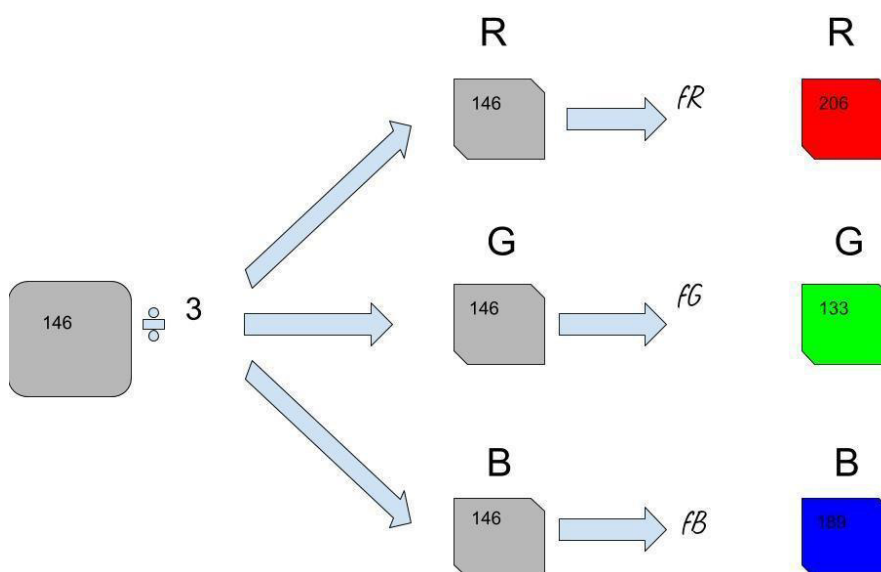


Figura 31. Conversión de escala de grises a pseudocolor. Fuente: Elaboración propia.

La imagen en escala de grises tiene todos los canales en el mismo valor, es decir $R = G = B$, esto es ideal para el procesamiento, ya que se trabaja con un solo canal de la imagen y los valores máximos y mínimos de temperatura se pueden escalar fácilmente en el rango de 0 a 255 o a los valores máximo y mínimo que se usen. Por ejemplo, supongamos que se desea usar una imagen en pseudo color (ver Figura 31), donde la imagen inicial corresponde

a un valor arbitrario de desconocido para el programa, al leer el archivo JPEG se obtiene $R = 206$, $G = 133$ y $B = 189$ valores que responden al algoritmo de la paleta de colores que representan, si se quisiera usar esta paleta como entrada no sería posible seleccionar uno de los canales, ya que todos tienen valores distintos, y el promedio no es una opción, ya que el valor promediado es de 176, muy distinto al original de 146. Por esto, se usa la escala de grises como imagen de entrada, seleccionando de esta cualquier canal.

Extracción y reconocimiento de números Primero se crea una sub-imagen a partir de la original, luego se recorta un rectángulo delimitado por los píxeles (413, 428) y (525, 656), estos son las coordenadas de la diagonal. A partir de esto se procede a recortar número a número las componentes del valor numérico digital (ver Figura 32). Tanto el valor máximo como el mínimo presentan cinco dígitos, los cuales son extraídos en forma simultánea de derecha a izquierda y convertidos a su valor decimal real, en cada ciclo se va acumulando el valor hasta tener el número digitalizado al final del bucle. En cada ciclo de extracción de números, se realiza la detección de cada uno de estos. Para esto se crearon previamente plantillas con los números del 0 al 9 (ver Figura 32), con las mismas dimensiones de píxeles que tiene cada pequeño recorte (ver Figura 33), las plantillas presentan valores binarios con 0 y 1 como sus posibles valores.

[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],	[1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],	[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
[1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1],	[1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1],	[1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1],	[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1],	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],	[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1],
[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],	[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0],	[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1],	[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],	[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],	[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1],

Figura 32. Plantillas de números 3 y 6. Fuente: Elaboración propia.

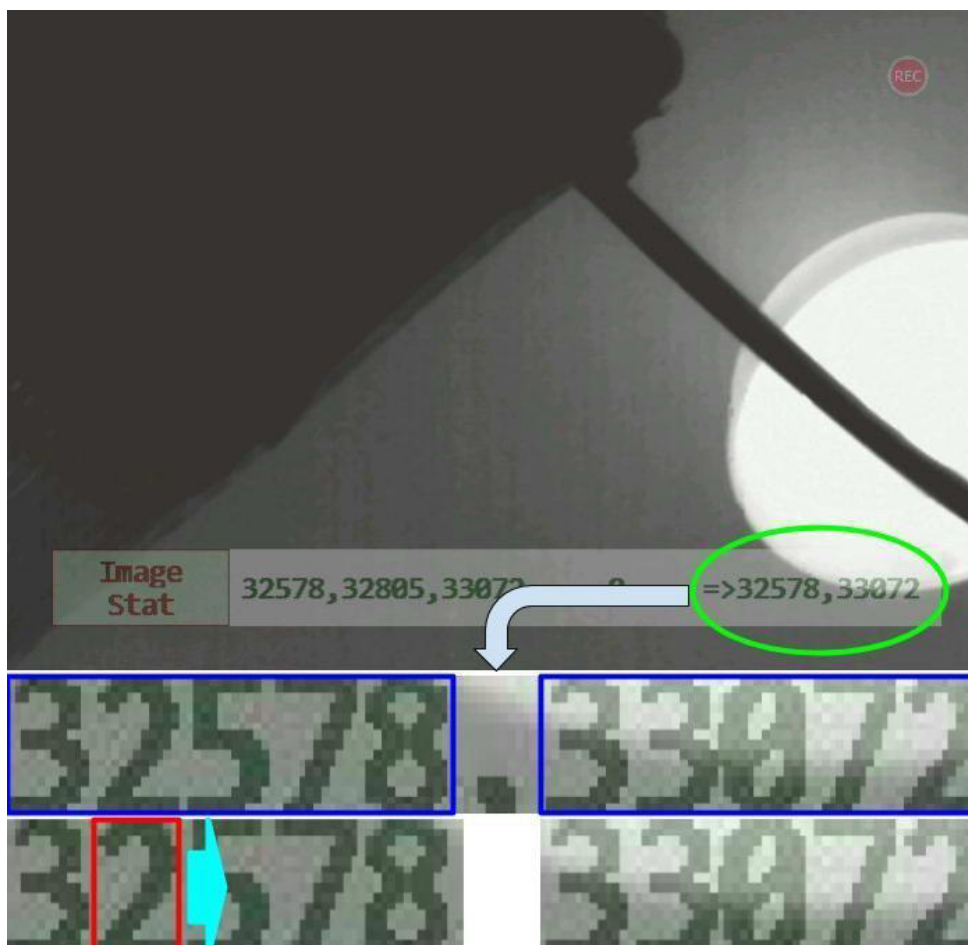


Figura 33. Extracción de fragmentos de imagen. Fuente: Elaboración propia.

Binarización de los dígitos. Para poder realizar la detección es necesario binarizar los recortes que se extraen de cada número, esta binarización se realiza con el método Otsu, junto a una segmentación y unión de cada imagen para volverlo robusto frente a las variaciones de iluminación que se podría presentar en los vídeos.

Como ejemplo se muestra la binarización de los números extraídos de la Figura 32 usando los distintos métodos mencionados en el Marco Teórico.



Figura 34. Aplicaciones de binarizaciones para los recortes. Fuente: Elaboración propia.

Las dos primeras imágenes de la Figura 34 muestra la aplicación de las binarizaciones sin el algoritmo “Dividir y fusionar”, las cuales funcionan para el primer caso en donde la iluminación es uniforme en toda la imagen, es decir se diferencia bien el fondo y el objeto en la imagen, pero cuando hay variaciones de la iluminación en la imagen (producidas por cuerpos a mayor temperatura que el resto de la escena) las binarizaciones muestran solo una parte de la imagen como resultado, y la otra se descarta como fondo. Esta fue la necesidad de complementarlo con un algoritmo que le otorgue robustez ante estos cambios, uno que permita que la imagen sea indiferente a la iluminación del fondo, el algoritmo complementario fue el ya descrito “Dividir y fusionar”. Se usaron cuatro divisiones por cada número, donde a cada una se le aplica la binarización de forma independiente para luego unirlos nuevamente y obtener la imagen correcta. En la Figura 34c se aprecia el resultado luego de usar el algoritmo dividir y fusionar, se aprecia mucho mejor la forma de los números respecto a la Figura 34b.

Indicadores de similitud. Con la imagen binarizada se puede aplicar ahora las comparaciones para realizar el reconocimiento de los números, debido a la forma en que se presentan los números, se probó con los métodos simples que se presentan a continuación.

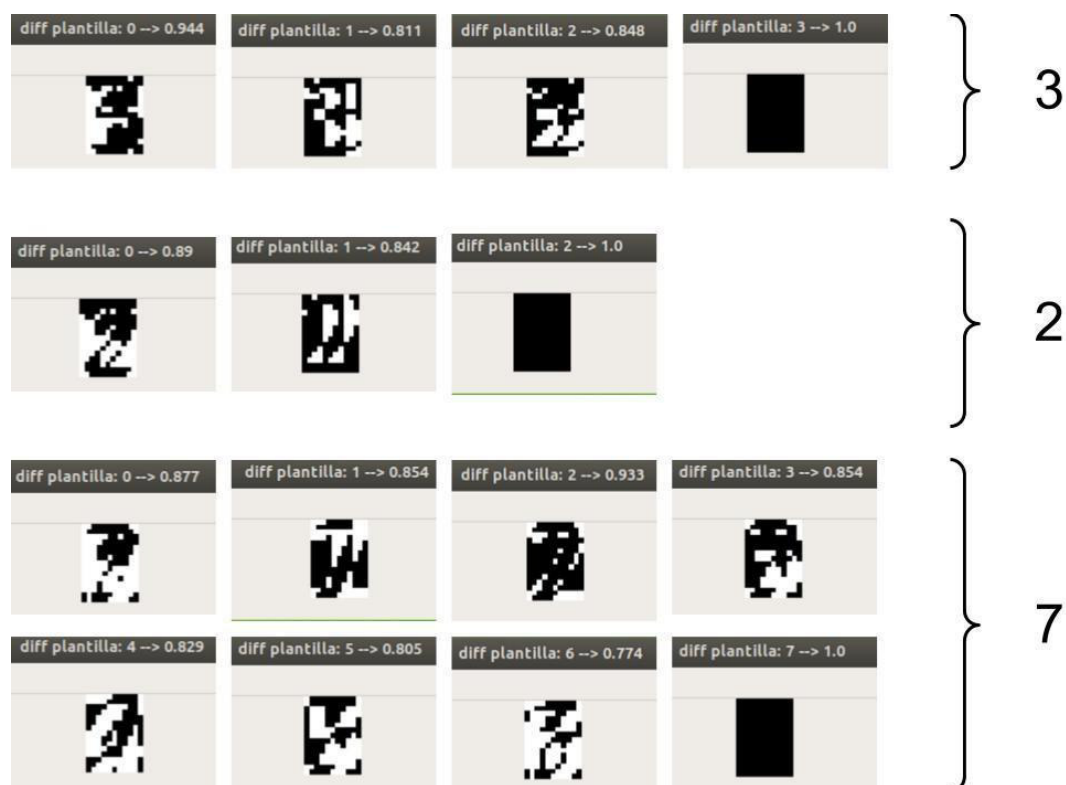


Figura 35. Reconocimiento de números usando diferencia de imágenes para los números 3, 2, y 7. Fuente: Elaboración propia.

Diferencia. El comparador más simple corresponde a una diferencia entre las imágenes, y dependiendo del resultado se puede decir que es o no las misma. Si las imágenes son exactamente iguales, cada elemento de la imagen será cero, esto es equivalente al color negro en una imagen RGB.

El algoritmo usado en la Figura 35 compara el número a reconocer con cada elemento de la plantilla hasta que encuentra el número que presenta un índice de similitud cercano a cero, y da por finalizado el proceso devolviendo el número actual.

Operador lógico. Al igual que la diferencia, se puede usar operadores lógicos para comparar la similitud de las imágenes (ver Figura 36), se usó el operador XOR para obtener los índices de similitud y al igual que en la diferencia, se genera una imagen de valor cero cuándo la imagen es idéntica. El algoritmo finaliza al tener un valor muy cercano a uno.

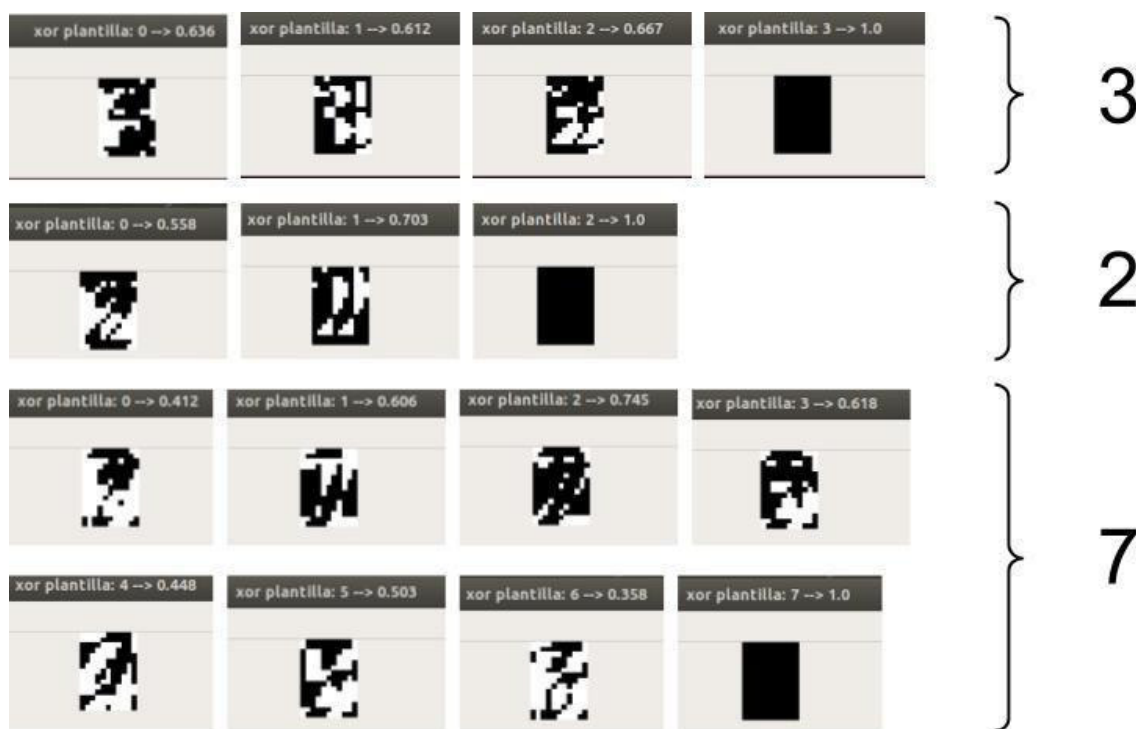


Figura 36. Reconocimiento usando un operador lógico entre imágenes para los números 3, 2, y 7. Fuente: Elaboración propia.

Correlación. Otra opción es usar la correlación entre las imágenes, ya que estas también se pueden expresar como matrices, el proceso es simple. A diferencia de los métodos previos, la correlación necesita compararse entre todos los candidatos y elegir la que esté mejor correlacionada. La Figura 37 y la Figura 38 muestran las correlaciones entre el número a reconocer y las plantillas.

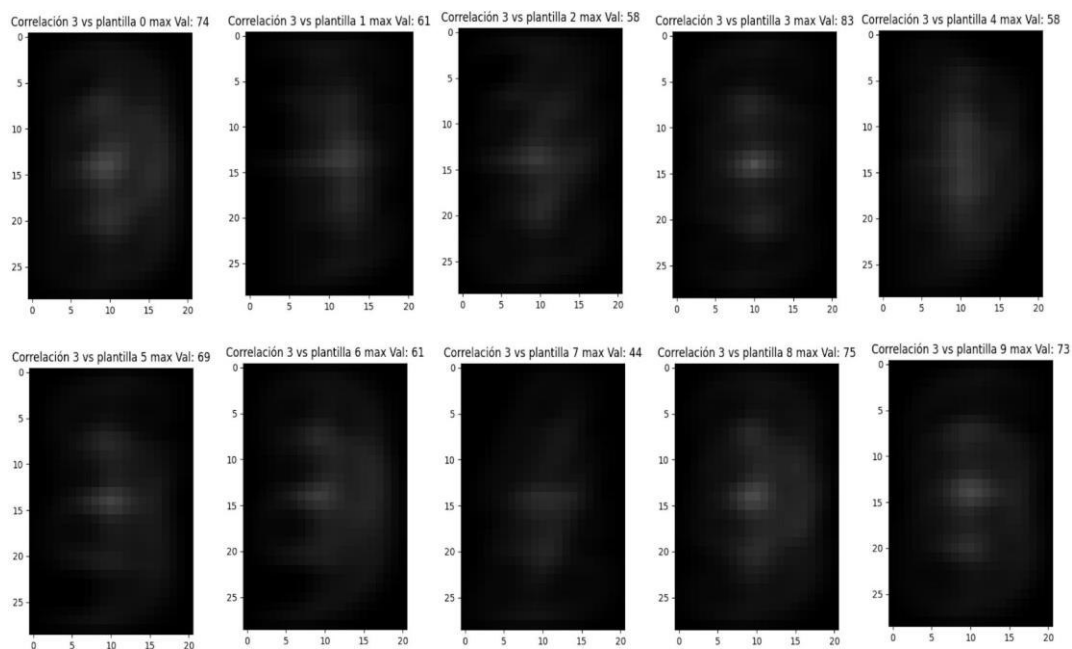


Figura 37. Reconocimiento usando una correlación para el número 3. Fuente: Elaboración propia.

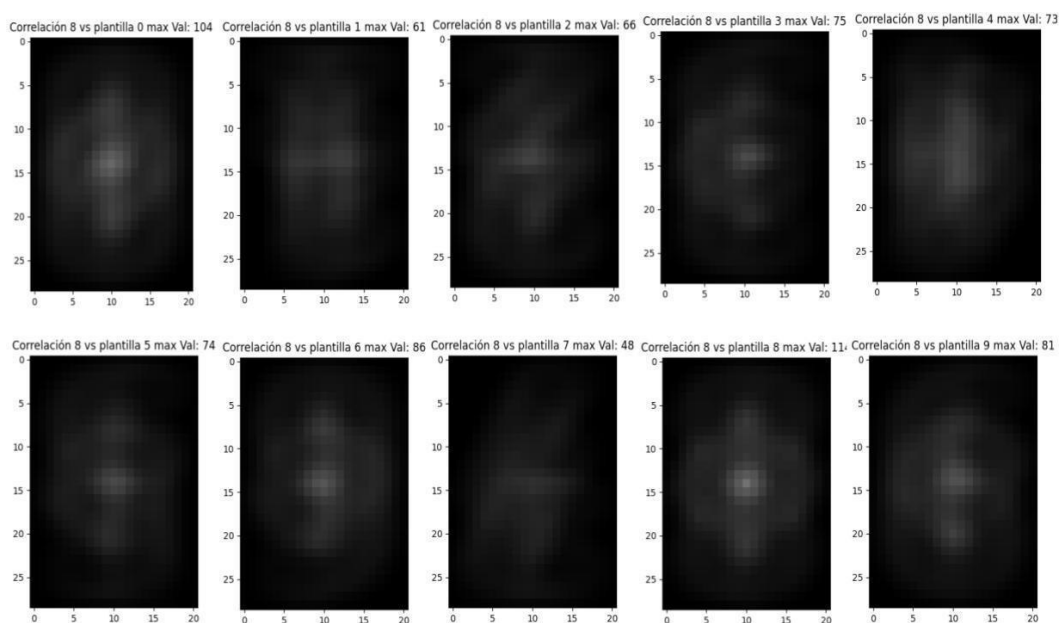


Figura 38. Reconocimiento usando una correlación para el número 8. Fuente: Elaboración propia.

Para la correlación no es necesario un índice que presente un umbral, a diferencia de los anteriores, se mide la intensidad de los píxeles centrales, ya que aquí es donde la imagen formada es el producto de ambas alineadas.

Selección del indicador de similitud. En la selección del método a usar se evaluó la rapidez de procesamiento, ya que al ser está una lectura de fotogramas se necesita que funcione lo más rápido posible.

La Tabla 4 muestra los tiempos de ejecución promediados de cada método, los tiempos de la diferencia y XOR no son muy alejados, pero si observamos la Figura 35 y la Figura 36 se podrá observar que hay mayor diferencia entre el índice uno y los números similares para el operador XOR que en la diferencia, es decir que se puede fijar un umbral más alejado al valor de la unidad con el operador XOR evitando los falsos positivos.

Tabla 4. Comparación de tiempos de ejecución, promedio de 100 repeticiones.

Operación	Tiempo de ejecución
Diferencia	0,00325 s
XOR	0,00434 s
Correlación	0,03521 s

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo expuesto se seleccionó el operador lógico, y se describe de forma más amplia su aplicación en el programa de reconocimiento de números. A pesar que los métodos usados proporcionan una imagen binarizada donde se puede apreciar claramente la forma de los números, esta no es perfecta, por lo que se tuvo que colocar un valor umbral de semejanza $\vartheta = 0,82$ obtenido de forma experimental, exponiendo al algoritmo a distintos vídeos con variación de iluminación que son los casos donde el reconocimiento puede verse afectado. La comparación con la operación lógica XOR $\oplus$ da como resultado una matriz de salida de las mismas dimensiones de la matriz de la plantilla. Debido a la naturaleza del operador XOR, y en base a las características de la plantilla (Figura 33) y la imagen binaria con los números a reconocer (Figura 38c), la matriz de salida será una matriz de ceros cuando la imagen binaria sea idéntica a la plantilla. Para medir el nivel de similitud basta con contar la cantidad de ceros presentes en la matriz resultante, y evaluar su concentración respecto al máximo posible que es de 165 (15 x 11 píxeles), número de elementos de las matrices.

$$I_{plantilla} \oplus I_{binaria} = I_{salida}$$

Es más sencillo encontrar la relación entre cantidad de unos N_{unos} presentes en la imagen de salida, por lo que se suman la cantidad de unos y se divide entre el máximo posible. El umbral queda invertido a su complemento, por lo que se evalúa ahora la semejanza con un umbral $< 0,18$.

$$I_{salida} = \begin{cases} = I_{plantilla} & , si \ N_{unos} < 18 \% \\ \neq I_{plantilla} & , si \ N_{unos} \geq 18 \% \end{cases}$$

Se almacena el valor de temperatura máximo y mínimo en variables globales, estos valores sirven para obtener el valor de temperatura en cada píxel. Para esto se extraen los valores máximo y mínimo de intensidad en el arreglo de la imagen, los máximos valores posibles van desde 0 hasta 255, pero los valores límites no siempre coinciden con esto. El valor de temperatura correspondiente a un píxel en específico se obtiene de:

$$tp(x, y) = \frac{p_{x,y} - mn}{mx - mn} \cdot (t_{max} - t_{min}) + t_{min}$$

Donde $tp(x, y)$ es la temperatura del píxel en la posición (x, y) , p es el valor digital de ocho bits que tiene el píxel (x, y) , mx y mn son los valores digitales máximos y mínimos en la imagen, t_{max} y t_{min} son los valores de temperatura máximos y mínimos presentes en la imagen.

Fue necesario eliminar la marca de agua correspondiente a la grabación antes de procesar la temperatura de cada píxel, ya que esta marca al permanecer a una capa en RGB altera todo el procesamiento, generando valores de temperatura erróneos. Esta marca de agua fue reemplazada por un círculo negro, con valor binario (0,0,0), la modificación requiere que este valor no se tome en cuenta en la extracción del valor binario “mn”, de lo contrario “mn” siempre entregaría el valor de cero asignados al círculo negro.

Temporizador y aplicativo. El software final presenta opciones para controlar la reproducción del vídeo y para el proceso de las imágenes descrito en las secciones anteriores. Debido a que se necesitó acceder a cada fotograma del vídeo y editarlo para reconocer números y agregar temperatura, se descartó la idea de usar librerías de libre acceso tales como Phonon, Pymedia, MoviePy, etc., y se crearon funciones integradas al código principal para realizar el control del vídeo.

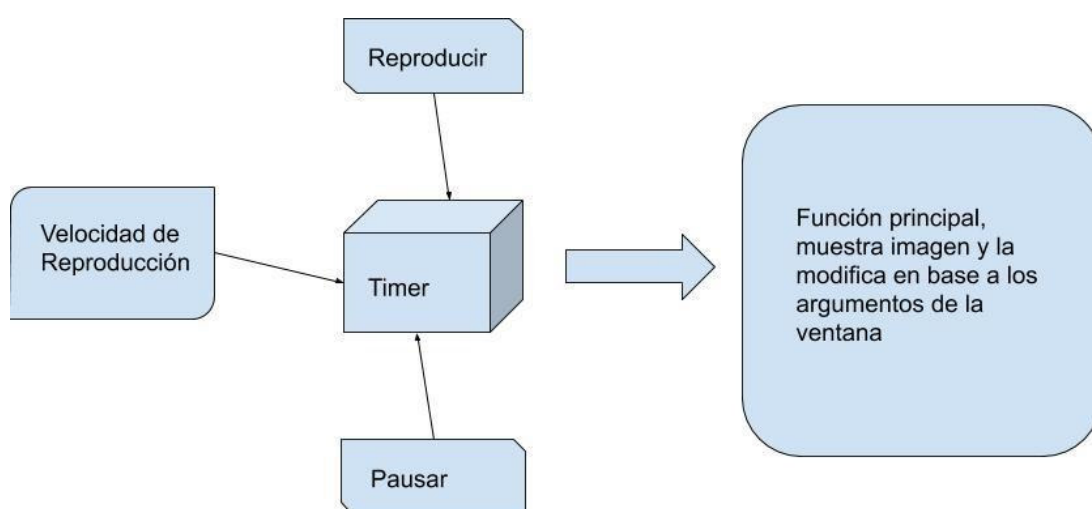


Figura 39. Bloques del programa de reproducción de video. Fuente: Elaboración propia.

Para cambiar de fotograma se usó un temporizador, el cual es influenciado por todas las funciones de control de reproducción (ver Figura 39), este temporizador no actualiza el proceso durante la pausa, por lo que cambiar el cursor durante el vídeo pausado no actualiza el valor de temperatura asociado al píxel.

Población y muestra

Para el trabajo de investigación se tiene como población todos los posibles valores que entrega el ADC del sensor de la cámara térmica, sin embargo, la cantidad total de valores posibles no se conoce, así como sus límites, esto se mencionó en la determinación del problema.

Con lo mencionado se escogió una muestra no probabilística para los modelados de regresión, como tal la muestra depende de las características y contexto de la investigación (Hernández et al., 2014). Se usó un muestreo incidental para seleccionar los valores de temperatura del cuerpo negro, para los casos de calibración y de pruebas. La cantidad total de muestras se basa en las pruebas realizadas en (Pron y Bouache, 2013), ya que es el que más se asemeja en el proceso de esta investigación donde usan dieciséis puntos para la regresión.

Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

Se realizan tres procesos para obtener la información del proyecto, el primero es relacionado a la obtención del modelo matemático del sensor de la cámara, el segundo es la forma en que se implementa en el vehículo aéreo, y el último es el uso del software que procesa las imágenes y no muestra el valor de temperatura por cada pixel.

Pruebas de calibración

Como se describió en el Marco Teórico existen factores que pueden alterar las mediciones, tales como la distancia hasta el objeto, la emisividad, y la transmitancia atmosférica. Para minimizar estos efectos se tomaron en cuenta las siguientes acciones:

- La alta emisividad del plato caliente para reducir la interferencia del entorno.
- La distancia entre la cámara y el cuerpo negro es de 10 cm, por lo que los efectos de compensación por distancia están descartados para la calibración.
- Al tener una distancia tan pequeña, la transmitancia de la atmósfera puede ser considerada 1.
- El plato caliente está alineado a la cámara para evitar la variación de la emisividad por el ángulo de incidencia.

Cada ajuste de temperatura se realizó cada 30 minutos, durante este periodo la cámara

estaba obstruida por un bloque metálico para controlar el tiempo de exposición en todas las muestras, cada exposición se realizó durante 8 minutos por cada muestra. La temperatura del entorno estuvo regulada a 20 °C. Debido a que la cámara genera una radiación propia, se dejó encendida alrededor de 35 minutos antes de realizar la calibración. La temperatura de la cámara con el chasis extra alcanza hasta un máximo de 43 °C. La Figura 40 muestra la cámara durante la calibración, la adquisición de los valores se realizó a través de una pantalla con entrada HDMI, el cable de conexión de 2m ayudo a evitar interferencias por la radiación humana durante las lecturas.

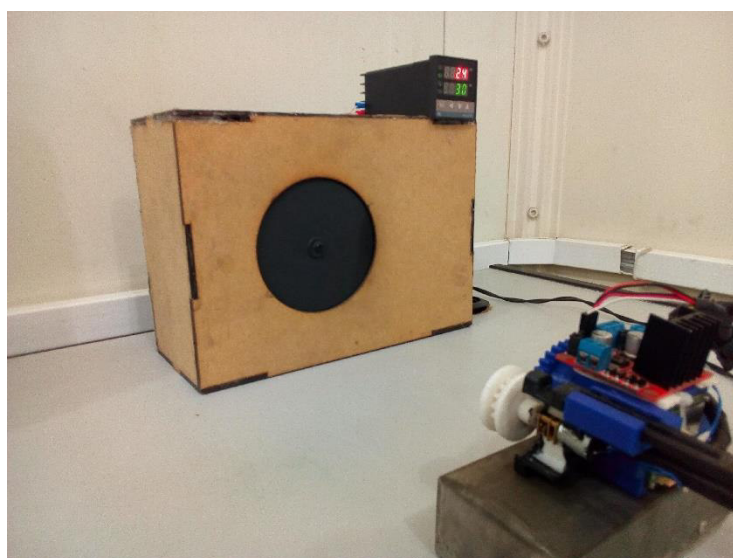


Figura 40. Calibración en el laboratorio de IDI, ROJ. Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 5, la primera columna muestra la temperatura de referencia, la cual es detectada por el termopar, la segunda columna muestra el promedio de los valores numéricos obtenidos en la pantalla en las múltiples pruebas realizadas. La temperatura final se debe modificar debido a que es función de la temperatura detectada por el sensor en base a la emisividad y la temperatura del ambiente, esto se calcula con lo visto en Eq 7 donde $\tau = 1$ debido a la cercanía con la que se realizan estas pruebas, y la temperatura total es la corrección que se aplica tomando en cuenta la emisividad y la temperatura del ambiente.

$$T_{total} = \varepsilon T_{med} + (1 - \varepsilon)T_{atm}$$

$$T_{total} = 0,96 T_{med} + (1 - 0,96)20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{corr} = 0,96 T_{med} + 0,042 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tabla 5. Datos obtenidos en la calibración, temperatura en Celsius

Temperatura medida (°C)	Promedio
0	30608
15	32028.66
25	32256.33
35	33902.66
45	34258
55	35471.33
65	36161.33
75	37962.33
85	38836.33
90	39712
105	41069.33
115	43137
120	43891.66
125	44523
135	46234.33
145	48100
150	48735.66
165	51506.33

Fuente: Elaboración propia.

Regresión del SiFT. Con los datos de la Tabla 5 se dibujó una curva SiFT, esta curva muestra la respuesta real de la temperatura medida con el valor numérico del ADC del sensor. Esta curva está sujeta a los errores de medición propios del instrumento y del operario.

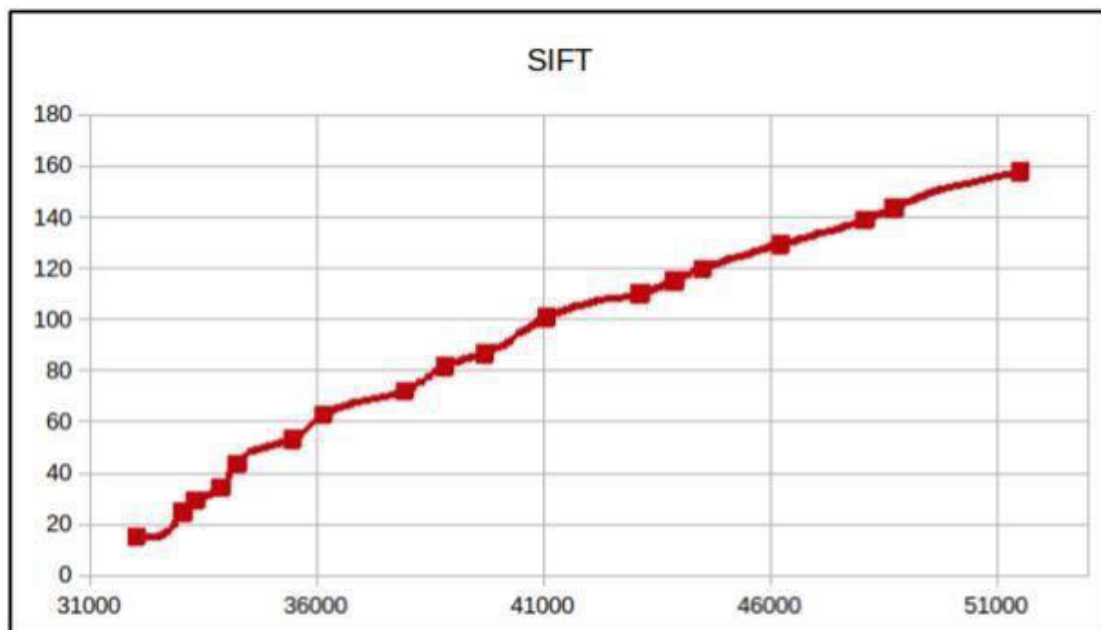


Figura 41. Curva SiFT experimental temperatura en Celsius vs números de pantalla.
Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la mejor aproximación a la curva real, y poder obtener valores de temperatura medibles, es necesario realizar regresiones no lineales a los datos de la Figura 41. Se realizaron dos regresiones para ajustar los coeficientes a las ecuaciones, la regresión con la forma de la ecuación de Planck (Eq 17). Dada la cantidad de datos se realizó un promedio entre los valores comunes a una misma temperatura (ver Tabla 5), el proceso fue realizado mediante el software Octave, creando las funciones para la regresión a la ecuación de Planck, ya que la regresión polinomial ya se encuentra implementada en este software. El código de la función, así como la ejecución de esta se encuentra en el Anexo C. El resultado para los coeficientes de Planck se observa en Eq 18.

$$T = \frac{1308,45}{\lambda \ln\left(\frac{4,59064950609725 \times 10^5}{V_D - -26758,40223} + 1\right)} - 273 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{Eq 21}$$

La regresión polinómica se ajustó al orden 4, para esto se usaron las funciones predefinidas en el software Octave. El polinomio obtenido fue:

$$T(V_D) = 1,0892 \cdot 10^{-16} \cdot V_D^4 - 1,1487 \times 10^{-11} \cdot V_D^3 + 1,2695 \cdot 10^{-7} \cdot V_D^2 + 2,4702 \cdot 10^{-2} \cdot V_D - 640,9709413$$

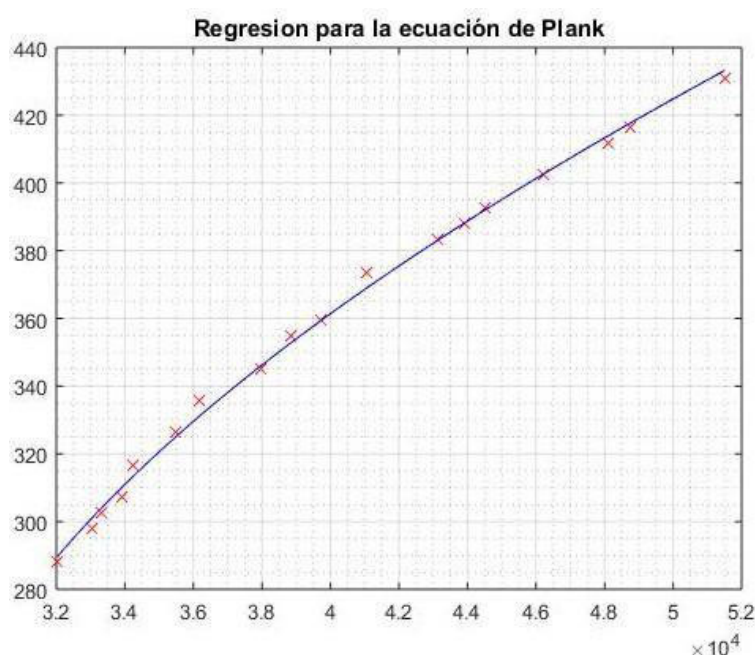


Figura 42. Curva regresión Planck para temperatura en Celsius. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42 y la Figura 43 presentan las gráficas de las funciones comparadas con las muestras usadas para generarlas, con un gran esfuerzo visual se puede apreciar la mejor adaptación de la segunda, sin embargo es posible tener una confirmación de esto con la suma cuadrática de residuos $RSS = 78,27394422$ para la regresión polinómica, mientras que la regresión a la ecuación de Planck con el método Gauss Newton (Lai et al., 2017) tiene un $RSS = 97,899913691299986$. Sin embargo, debido a que la regresión a la ecuación de Planck está más relacionada a las características físicas de la cámara, se conservará esta opción en el aplicativo final, pero como opción alternativa.

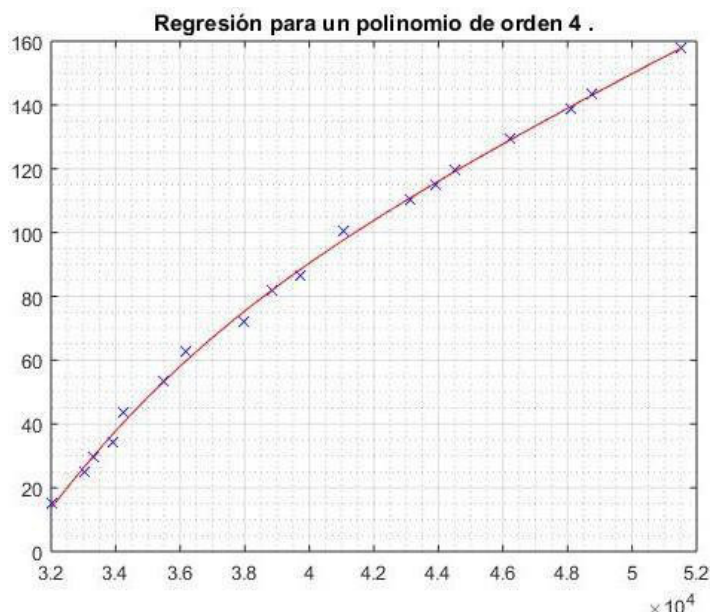


Figura 43. Curva de regresión polinomial para temperatura en Celsius. Fuente: Elaboración propia.

Antes de poder realizar el diseño final del software de procesamiento, fue necesario tener una corrección extra debido a la distancia de medición, ya que esta influye en las lecturas, tal como se muestra en la Tabla 6, donde se usó un valor casi constante de 100° C y se tomaron lecturas a diferentes distancias. Las distancias se encuentran en centímetros, y el error es calculado en base a la diferencia entre el valor real y el valor obtenido con las ecuaciones de regresión.

En base a lo obtenido se obtuvo la ecuación que describe el error en base a la distancia (ver Figura 44) con asistencia del software Octave, la función del Error es:

$$E_r = 1,76203 \cdot 10^{-9} \cdot d^3 - 6,32462 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 + 1,8269 \cdot 10^{-2} \cdot d + 1,4435$$

Donde d es la distancia de la cámara al objeto expresada en centímetros, este error fue añadido luego de realizar las correcciones de emisividad y temperatura ambiente. En el Anexo C se puede observar detenidamente las correcciones introducidas en la librería para el reconocimiento de números desarrollada.

Tabla 6. Variación de la temperatura (Celsius) según la distancia.

Temperatura real	Distancia(cm)	Temperatura calculada	Error
------------------	---------------	-----------------------	-------

100	20	98.5	1.5
101	150	97	4
101	300	94	7
96	500	87	9
102	750	89	13
102	1100	87	15
98	1500	77	21
100	2000	73	27
100	2500	65	35

Fuente: Elaboración propia.

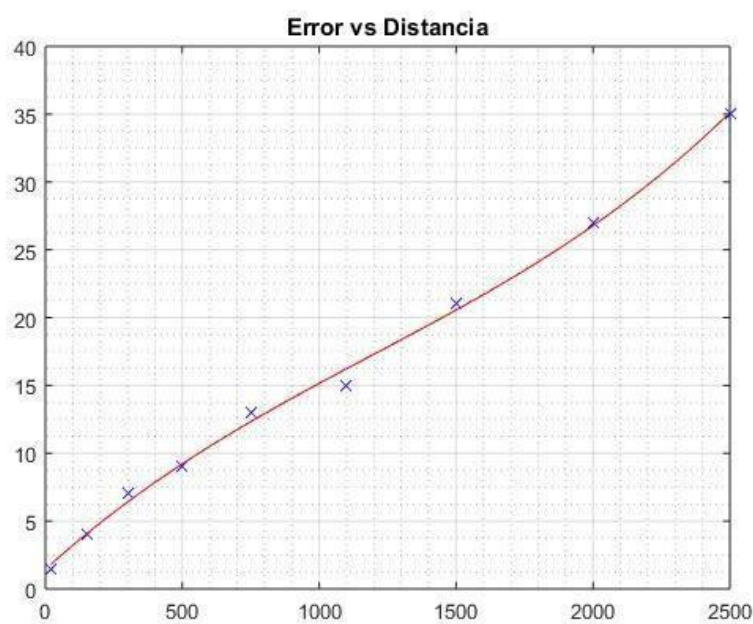


Figura 44. Obtención de función error de temperatura en base a distancia. Fuente: Elaboración propia.

Implementación en drone

La cámara se instaló en el cardán del drone, con la lente alineada con el frente del vehículo. Se tuvieron que modificar las placas de sujeción para las baterías, ya que el centro de gravedad se vio alterado. El control del enfoque y la posición del eje horizontal se conectan

directamente al receptor de radio. El transmisor de vídeo se encuentra en la parte posterior del Cardán, aprovechando la estructura de aluminio para disipar el calor producido por el dispositivo. (Figura 45)



Figura 45. Implementación en drone. Fuente: Elaboración propia.

Fue necesario usar un conversor DCDC elevador para generar 12v que alimentan al Cardán y al transmisor de vídeo. El resto de componentes, incluyendo la cámara térmica, se alimentan con una fuente de 5v la cual viene desde el conversor YEP 20A SBEC HV. Toda la energía proviene de la batería principal, la cual es usada para alimentar los seis motores, por motivos de simplicidad se realizó esto, ya que lo más adecuado y recomendable sería tener baterías independientes para los sistemas del drone.

Uso del software desarrollado.

La Figura 46 muestra el aplicativo con los datos de temperatura añadidos y las opciones de control. En la esquina superior izquierda están los valores límites de temperatura

presentes en la imagen, estos sirven para escalar las temperaturas de todos los píxeles en este rango.

Existe la opción de detectar el píxel con mayor intensidad de la imagen, este es el punto caliente de la escena el cual se muestra en un recuadro amarillo. Al lado del botón que activa o desactiva el punto caliente se muestra el valor de temperatura correspondiente al píxel seleccionado por el cursor, cuya ubicación se encuentra coloreada de turquesa.

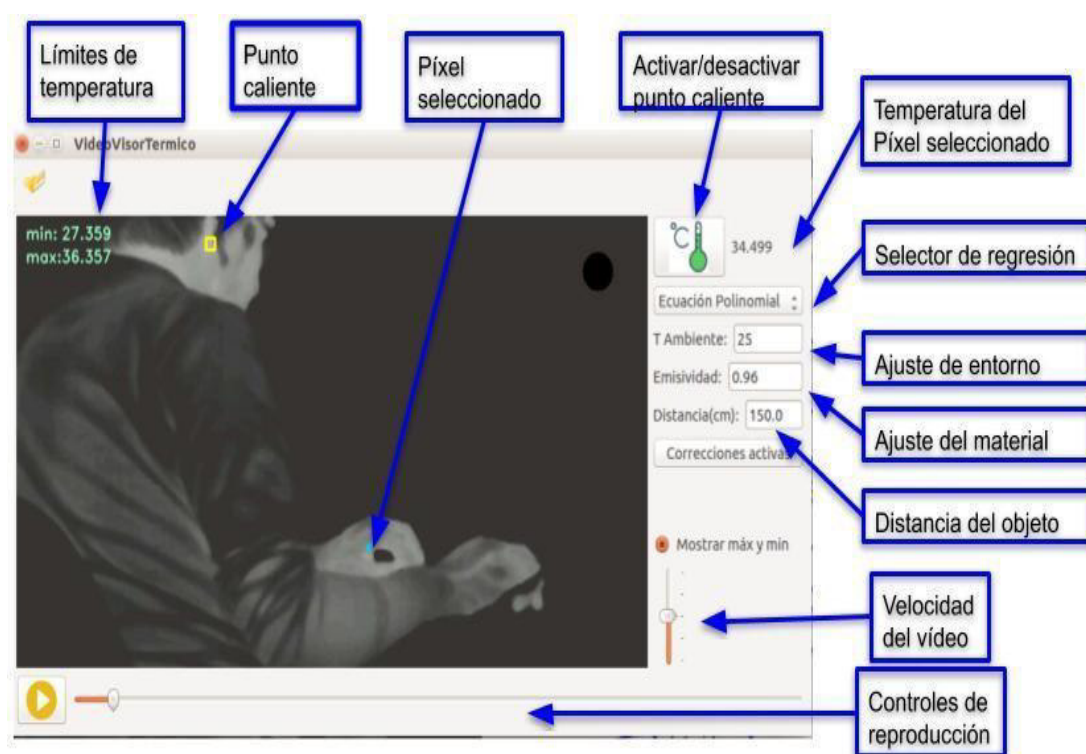


Figura 46. Aplicativo desarrollado para el procesamiento de los videos capturados con la cámara térmica. Fuente: Elaboración propia.

También en el panel derecho se encuentra la casilla de selección para la ecuación de regresión que se desea usar, como se vio en secciones previas de este capítulo, se obtuvieron dos ecuaciones que describen la curva SiFT, una ecuación polinomial y otra ecuación con la forma de la ecuación de Planck. Por debajo se observan las casillas donde se ingresa los parámetros para la corrección en base a la emisividad del objeto y la temperatura del ambiente. Los valores por defecto de esta casilla son $\varepsilon = 0,96$ y $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. La barra vertical de este panel controla la velocidad de reproducción del vídeo, y la barra inferior a lo largo de toda la ventana son los controles clásicos de reproducción.

Análisis estadístico

Tal como se mencionó en la sección de Población y muestra, se usó un muestreo no probabilístico, motivo por el cual las fórmulas estadísticas no presentan información relevante tal como se menciona en (Hernández et al., 2014, p. 176) “Aquí el procedimiento no es mecánico ni se basa en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores y, desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación”. El criterio de selección de las muestras ya se ha mencionado en la sección previa indicada al inicio de este párrafo.

RESULTADOS

Presentación y análisis de los resultados

Pruebas en laboratorio

Se iniciaron las pruebas en el laboratorio de IDI (Innovación Desarrollo e Investigación) en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), la Figura 47 contiene imágenes con capturas de los vídeos tomados luego de la calibración para verificar el funcionamiento.

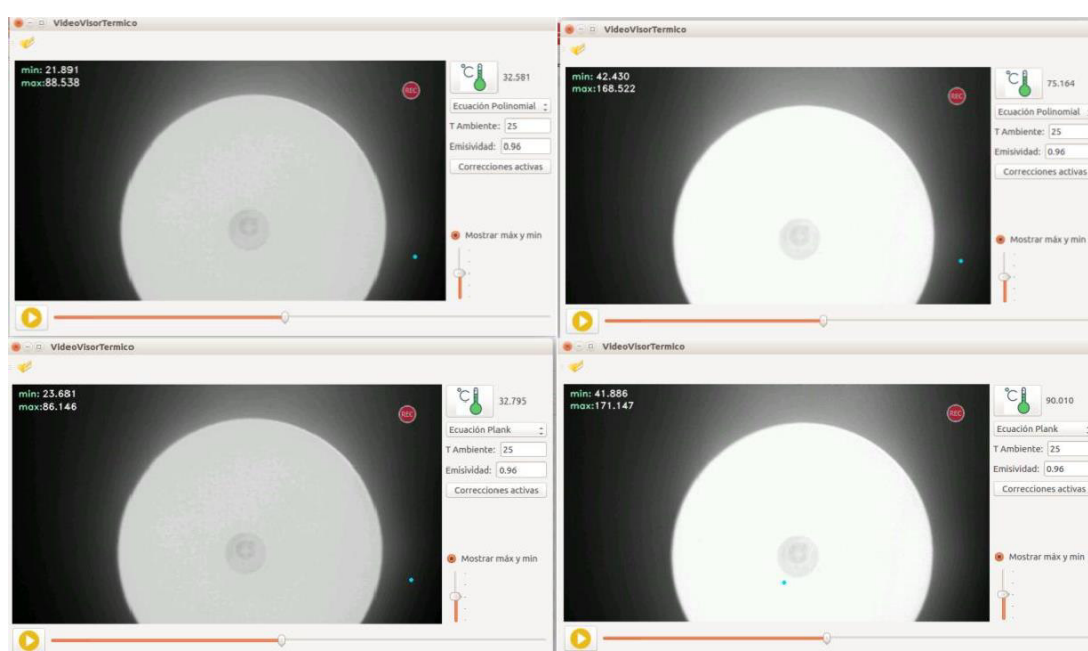


Figura 47. Medidas en laboratorio para 90 (izquierda) y 165° C (derecha) para regresión polinomial (superiores) y de Planck (inferiores). Fuente: Elaboración propia.

La primera lectura se realizó con una paleta “térmica” de colores, los posteriores fueron tomados con la paleta de escala de grises, los resultados se muestran en la Tabla 7. La segunda fila contiene los valores obtenidos con la ecuación de regresión polinómica, y la tercera los que se basan en la ecuación de Planck. Las siguientes dos filas presentan el error

de medición respecto a la temperatura deseada, y el error de la cámara el cual es, según el fabricante, de $\pm 3^\circ\text{C}$ o 3 %. Se aprecia que los errores no superan los límites permisibles de la cámara.

Tabla 7. Temperatura real y medida con la cámara, en $^\circ\text{C}$.

Parámetro	Valores medidos						
Temperatura	25	55	75	90	115	145	165
Polinómica	24.5	55.51	75.84	90.5	116.1	147.5	169.7
Planck	26.3	55.82	75.59	89.7	115.5	149.24	171.3
Error	0.5	0.51	0.84	0.5	1.1	2.5	4.7
Error 3 %	0.75	1.65	2.25	2.7	3.45	4.35	4.95

Fuente: Elaboración propia.

El cursor, el cual permite seleccionar un píxel para conocer la temperatura, está basado en la suposición que la distribución de intensidad a todos los píxeles es lineal respecto a la temperatura, tal como se menciona en la descripción de la curva SiFT, sin embargo, hay una variación entre la temperatura máxima y la temperatura del plato.

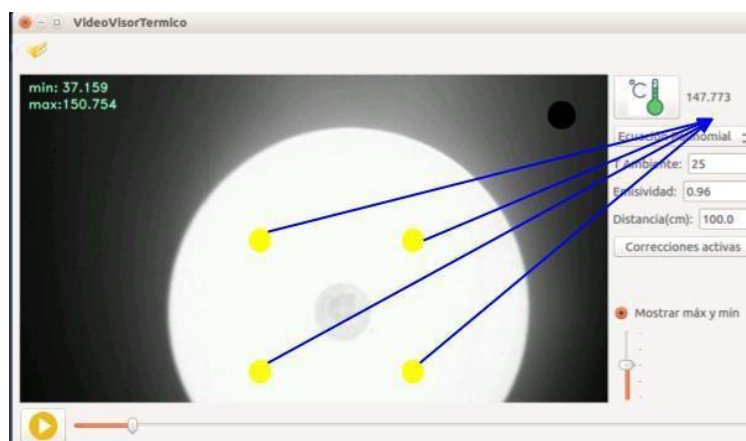


Figura 48. Puntos de prueba en el plato caliente. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 48 se puede observar que se seleccionan distintos puntos del disco, el cual

presenta una temperatura casi uniforme (apenas centesimales), y la diferencia de temperatura llega a 4,77 grados Celsius según lo que se aprecia en la Tabla 8. Por la naturaleza de la cámara y los datos que se han extraído de ella, la calibración está basada en el valor máximo, el cual presenta una pequeña diferencia de temperatura con el resto del objeto de calibración, y no llega a exceder el 3 % de la lectura máxima correspondiente a 5,5°C.

Tabla 8. Temperatura homogénea del plato respecto a la deseada en °C.

Parámetro	Valores					
T máxima	41,44	52,75	75,06	94,61	144,27	185,19
T plato	40,84	50,82	74,46	93,48	142,35	180,42
Error	0,6	1,93	0,6	1,13	1,92	4,77

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas en drone

Las pruebas en campo se realizaron en las instalaciones del ROJ, y algunas en la PUCP. Para todos los casos se realizó a la misma distancia entre el objeto y el drone. Viendo las especificaciones de la cámara térmica (Anexo B) se puede obtener la resolución por píxel o GSD en base a la fórmula (Neumann, 2008):

$$GSD = \frac{p_z \cdot H_f}{f} \quad \text{Eq 22}$$

Donde $p_z = 17\mu\text{m}$ es el tamaño del píxel, $H_f = 10\text{ m}$ es la altura del vuelo, y $f = 19\text{ mm}$ es la distancia focal. En los siguientes casos se toma como altura de vuelo la distancia entre el drone y el objeto, ya que la altura de vuelo es usada cuando la imagen se captura de forma vertical como en la Figura 49.

Con los valores descritos para la distancia de 10 metros desde el punto, y a 10 metros de

altura se tiene una distancia de 14,14 metros, la cual será tomada como altura de vuelo en adelante.

$$GSD = \frac{17 \cdot 10^{-6} \cdot 14,14}{19 \cdot 10^{-3}} = 12,65 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 12,65 \text{ mm}$$

Esto significa que cada píxel equivale a 12,65 mm en la imagen.

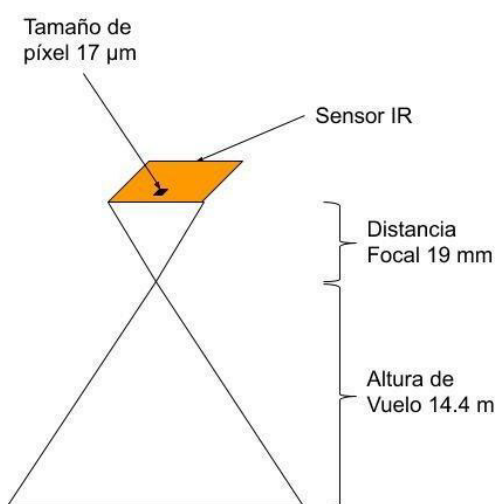


Figura 49. Resolución para las pruebas. Fuente: Elaboración propia.

La primera prueba consistió principalmente en probar el ajuste del enfoque de forma remota en pleno vuelo, el drone se maneja en modo asistido, específicamente el modo de vuelo LOITER el cual mantiene la posición y altitud sin intervención del piloto. En la primera prueba se grabó con una paleta de falso color, ya el objetivo principal era evaluar la nitidez debido al ajuste del enfoque.

Las imágenes de la primera prueba se observan en la Figura 50, en esta prueba se enfocó y desenfocó la imagen de los operarios con el propósito de observar esto en la pantalla receptora. Se toma como datos extras para esta evaluación la temperatura del ambiente $T_{amb} = 15^{\circ}\text{C}$ la emisividad de la piel humana a 0.98. Las pruebas se realizaron en el campo de fútbol de la PUCP, durante una tarde invernal.

En Radio Observatorio de Jicamarca cuenta con amplios lugares para poder realizar pruebas con el drone, pero debido a que se requiere una referencia de temperatura, estas pruebas se realizaron en la cancha de fútbol, localizada a un lado del edificio principal. Se

tomaron imágenes tanto en el espectro infrarrojo como el visible, para este último se acompañó al vehículo con una micro cámara genérica de procedencia china solo por motivo de referencia visual (Figura 51).

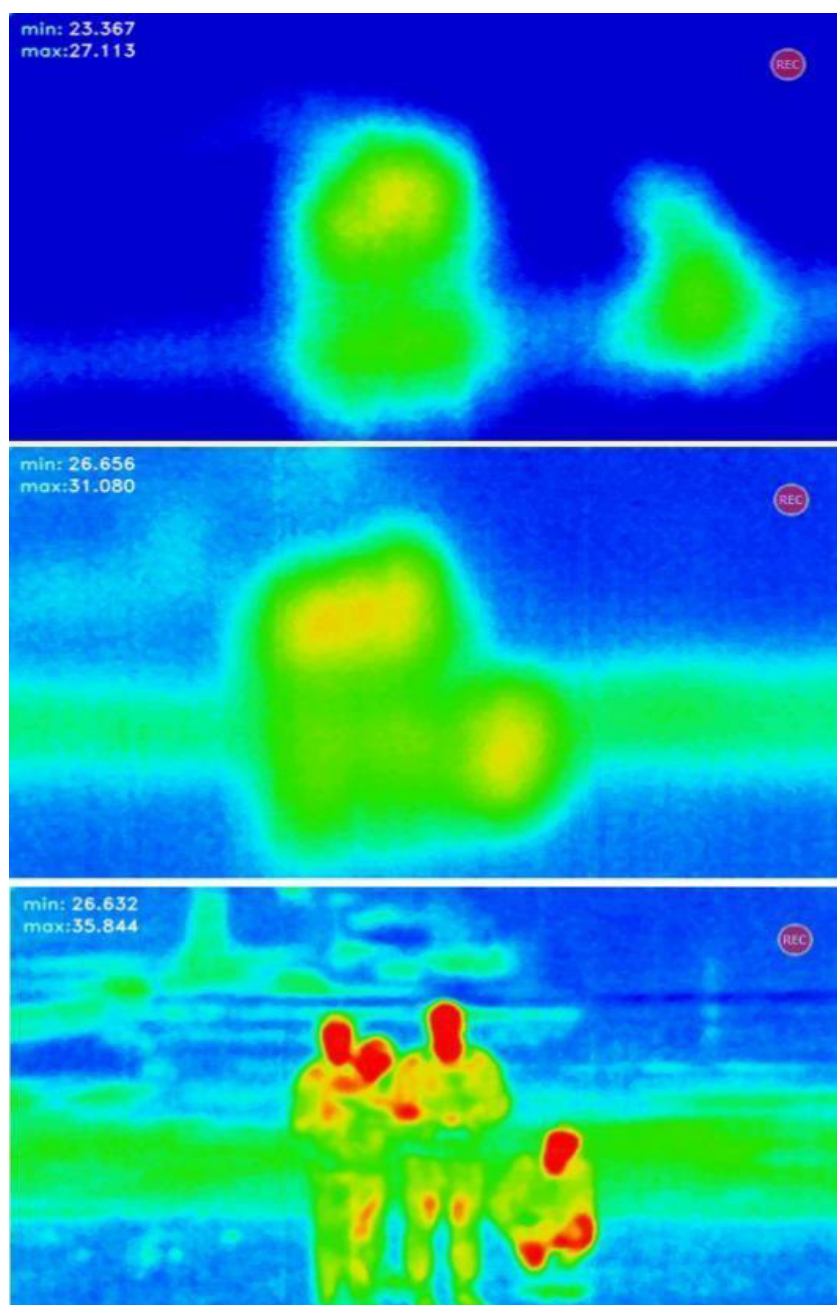


Figura 50. Variación de temperatura según el enfoque. Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Imagen tomada desde la micro cámara. Fuente: Elaboración propia.

Se usó la paleta de colores “térmica” para las pruebas en exterior, ya que esta presenta mayor información visual para el ojo humano. Esto debido a que el ojo humano puede detectar aproximadamente 10 millones de colores únicos, pero solo 30 niveles de gris (Kreit et al., 2013). Por lo cual fue más práctico visualizar la mejor posición de la lente para poder tomar las imágenes.

Tabla 9. Valores recolectados con las pruebas con el drone.

Parámetro		Valores		
Fijado	150	120	100	50
Medido	150,9	121,1	99,2	49,6
Distancia	2500	2000	1500	1500
Error	0,9	1,1	0,8	0,4

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran unas imágenes para cuatro niveles de temperatura en la Figura 52, los valores

completos se observan en la Tabla 9. Se puede apreciar que el error se mantiene casi constante, teniendo el máximo error para la temperatura de 120 °C. Es necesario mencionar las variaciones en la distancia, esto debido a las ráfagas de viento. Para obtener la mejor aproximación a la distancia real se recurrió a los logs de vuelo del drone, estos archivos almacenan datos de navegación del vehículo, con los datos de su altura y ubicación guardados se calculó la distancia para las diferentes medidas.

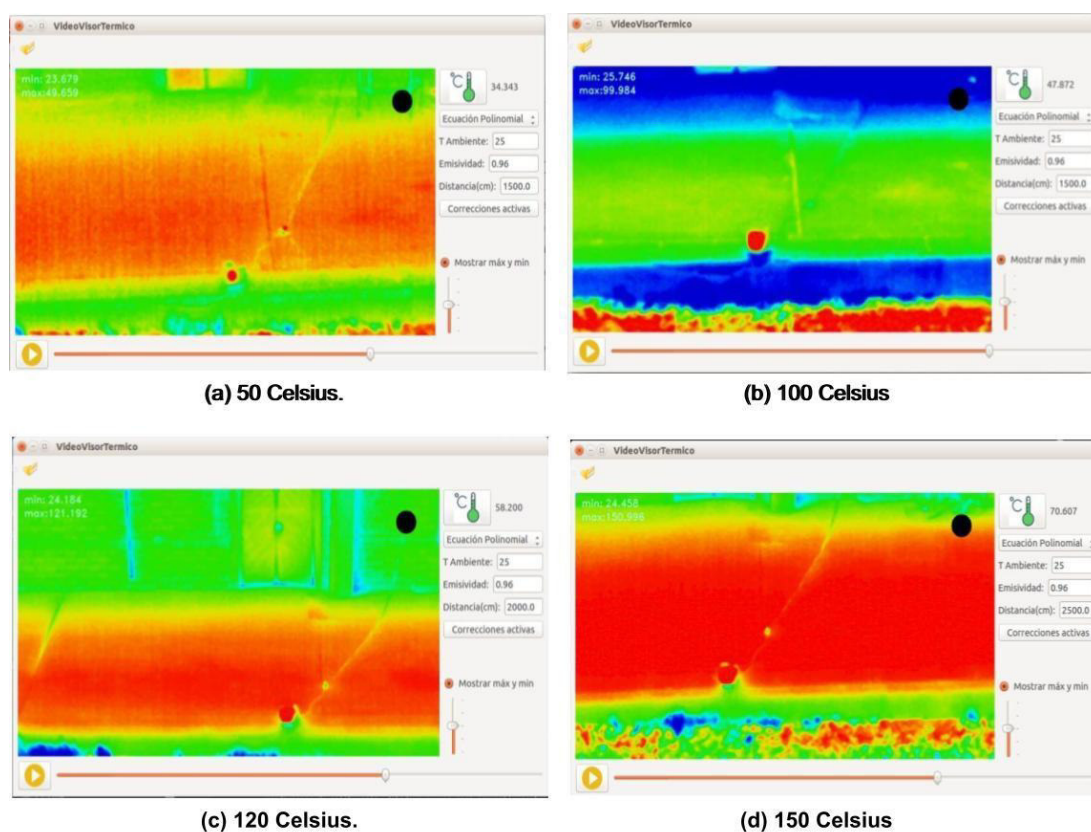


Figura 52. Imágenes capturadas desde el Drone para distintos valores de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 53 muestra el programa Mission Planner, el cual sirve para configurar, calibrar, crear planes de vuelo, y en este caso revisar los logs de vuelo. Se aprecia la altura de vuelo en la parte superior izquierda, y a la derecha las posiciones que ha tenido según el GPS. La variación en las lecturas realizadas en exteriores es afectada por factores que no se toman en cuenta en las condiciones de calibración, debido a que es casi imposible controlarlos. El primero es la temperatura del ambiente, ya que a lo largo del día esta tiene variaciones de un par de grados. El segundo factor sería las corrientes de viento presentes, si bien el

multirrotor genera flujos de aire para sustentarse, estos serían los mismos en todas las mediciones, pero las ráfagas de viento alteran el equilibrio térmico del chasis de la cámara y su entorno, produciendo variaciones de hasta 4 °C a lo largo de 2 horas (Vollmer y Möllmann, 2018, p. 183).



Figura 53. Revisión de log de vuelo en programa Mission Planner. Fuente: Elaboración propia.

Y como ya se ha mencionado la distancia ha sido estimada, ya que esta está sujeta a los errores de posición del GPS del drone, el cual puede llegar a tener hasta 2 metros de variación en horizontal. Finalmente se tiene las fuentes de radiación del entorno, las que aparentemente no producen una interferencia significativa, ya que el valor detectado es menor a lo esperado.

Un video térmico capturado desde el drone es posible visualizarlo en <https://drive.google.com/file/d/1ga5BUWpSbDiKL9-hKcSw1fk1YzFh5iN6/view> Este video muestra gran parte del proceso desde el encendido, hasta los ajustes para la toma de videos.

DISCUSIÓN

El uso de plástico PLA u otro material para impresión 3D en las etapas de desarrollo facilitó la ejecución del proyecto, su facilidad de fabricación, y la resistencia permitieron desarrollar en poco tiempo varias versiones de las adaptaciones mecánicas, y poder probarlas ensambladas. Cabe mencionar que las simulaciones previas fueron vitales para evitar que se fabriquen piezas innecesarias. El ajuste remoto del enfoque permite obtener temperaturas acordes a lo real, ya que para imágenes fuera de foco se ha observado variaciones de hasta 8°C. El compacto diseño ha permitido poder colocar todo esto en un multirrotor tipo hexacóptero, dicho drone tuvo que adaptarse a las necesidades del sistema de enfoque y no tuvo problemas que pudieran afectar al normal funcionamiento de vuelo.

La regresión polinómica ha demostrado ser un método más versátil debido a que podría usarse para obtener los modelos de casi cualquier cámara aún sin tener amplio conocimiento de sus parámetros físicos tal como se vio también en (Budzier y Gerlach, 2015), y aun cuando en este proyecto fue posible obtener los parámetros de regresión para la ecuación de Planck a diferencia de (Pron y Bouache, 2013) se consideran ambos modelos, ya que existen rangos de temperatura o escenarios (mencionados en las limitaciones) donde no se ha probado, y estos modelos podrían funcionar distinto.

La regresión polinómica comparado con la regresión usando el modelo de Planck y se tuvo un error máximo de 2,42 % y de 3,6 % respectivamente, motivo por el que se deja como primera opción en uso la regresión en el software. En la calibración se usaron en general cuerpos con temperaturas superiores a la temperatura ambiente, esto debido a que el cuerpo negro desarrollado solo cuenta con fuente de calor, mas no realiza intercambio de calor para disminuir la temperatura del plato. La cantidad de mediciones realizadas pretende compensar los ligeros cambios de temperatura presentes en el entorno y en la propia cámara, de tener múltiples cuerpos negros esto se simplifica.

Hay varios factores que interfieren en las pruebas cuando se usa un dron, y las condiciones obtenidas en un ambiente controlado pueden cambiar e incrementar el error, tal como se menciona en (Kelly, y otros, 2019). Para el proyecto en el modelo se han incluido las correcciones debido a la emisividad, temperatura del ambiente y la distancia ya que son los

principales actores en la medición, sin embargo, hay limitaciones en cada uno.

Como ya se había mencionado se requiere una emisividad cercana a la unidad, el valor usado de 0,96 obligó a incluir una corrección de procesamiento en el código del software.

La temperatura ambiente es fácil conocerla en un ambiente controlado, pero en exteriores es casi imposible saber la temperatura instantánea en ciertas zonas, más aún cuando se deben realizar vuelos donde el dron se aleja más de 500 metros desde el operario o cuando se presentan ráfagas de viento, las que por cierto son muy comunes en las cercanías de los volcanes.

A fin de salvaguardar la vida de los investigadores vulcanológicos y el personal de apoyo en las campañas, se tiene los puntos de despegue de los drones a kilómetros de distancia del cráter (4 km en Ubinas y 7 km en Sabancaya) y para realizar una calibración es imposible tener un ambiente controlado de esa longitud, por lo que se asume que la curva sigue a la ecuación de regresión de grado 3 para dicha distancia.

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

Beneficios sociales y económicos del proyecto

Los beneficios económicos del proyecto se derivan directamente de la inversión de capitales y operación/desarrollo que se detallan en las siguientes secciones de este capítulo. Respecto a los beneficios sociales, estos son indirectos y derivados de la aplicación práctica del proyecto de investigación tal como se describe en (Apaza et al., 2017), estos se describen a continuación:

Reducción de los tiempos de las campañas de monitoreo de volcanes para la adquisición de imágenes térmicas. Debido a la ubicación y morfología de los volcanes del sur del Perú, para realizar una inspección al cráter, normalmente es necesario una campaña de dos días y una noche. Además, se reduce el riesgo de los investigadores para tomar imágenes térmicas del cráter, ya que estos deben escalar hasta la cumbre del volcán para la adquisición de estas imágenes, muestra de esto se aprecia en (INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), 2015) y (INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), 2020). Otro de los beneficios radica en generar conocimiento científico, tal como se detalla en (Flores et al., 2019).

Evaluación de gastos e inversión

Gasto de capital inicial (CAPEX)

El gasto inicial de capital corresponde al monto invertido en la adquisición de la cámara térmica, así como sus componentes del sistema de transmisión y recepción de video, además de los componentes electrónicos y mecánicos adicionales. El gasto de inversión realizado en el año de ejecución se presenta actualizado al año actual también en la última columna.

Tabla 10. Gastos de materiales comprados, con precios del 2019 y 2023.

ítem	Descripción	Cantidad	Precio (2019)	Precio (2023)
1	Cámara HSN120A	01	s/. 16,184.00	s/. 5,400.00
2	TX + RX 2.4 GHz	01	s/. 1,526.00	s/. 1,250.00
3	Receptor Video	01	s/. 586.00	s/. 450.00
4	TX video 5.8GHz	01	s/. 130.00	s/. 150.00
5	Arduino Nano	01	s/. 9.00	s/. 30.00
6	Motor DC	01	s/. 14.00	s/. 25.00
7	Impresión 3D	01	s/. 150.00	s/. 200.00
8	Cuerpo Negro	01	s/. 350.00	s/. 400.00
10	Otros	01	s/. 100.00	s/. 150.00
Total			s/. 19,049.00	s/. 8,055.00

Fuente: Elaboración propia.

Gastos de operación y mantenimiento (OPEX)

Al ser este un proyecto de investigación, el único gasto operacional durante la ejecución fue el pago por la contratación de tesista durante un periodo de 3 meses desde Julio hasta agosto del 2019; ya que durante este periodo el tesista estuvo dedicado exclusivamente al presente proyecto, siendo los meses previos de avance particionado con el cierre del proyecto “Monitoreo de Volcanes Usando UAV”, por lo que los pagos al tesista eran parte de ese proyecto. A diferencia del capital anterior, en este se está optando por actualizar el sueldo asignado sin consideraciones tales como inflación o devaluación, ya que el IGP tiene como política el pago del sueldo mínimo a los tesisas contratados.

Tabla 11. Gastos operativos de la tesis, con precios el 2019 y 2023.

Descripción del costo	Pago mensual	Meses	TOTAL, soles en 2019	TOTAL, soles en 2019
Sueldo tesista	s/. 930.00	3	s/. 2,790.00	s/. 3,075.00

Fuente: Elaboración propia.

Gasto total

En la siguiente tabla se muestra el gasto total del proyecto, siendo este el resumen de las dos secciones previas. Como se ha indicado anteriormente, la última columna presenta la estimación del gasto realizado en el 2019, como si se hubiera realizado en el año 2023, con el fin de presentar una comparación más concisa al lector.

Tabla 12. Total de gastos del proyecto para el año 2019 y actualizados al 2023.

Descripción	Categoría de gasto	Precio en s/ en 2019	Precio en s/ en 2023
Materiales	Capex	s/. 19,049.00	s/. 8,055.00
Pagos a tesista	Opex	s/. 2,790.00	s/. 3,075.00
Total		s/. 21,839.00	s/. 11,130.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Precios de cámaras térmicas científicas, datos con tipo de cambio estimado a 3,3 consultados en el 2019 cuando se inició el proyecto de tesis, y actualizado al 2023 con cambio a 3.6.

Cámara	Precio en \$ en 2019	Precio en s/ en 2019	Precio \$ (2023)	Precio en s/ (2023)
FLIR A655sc	\$ 26,990.00	s/. 89,067.00	\$ 20,980.00	s/. 75,528.00
FLUKE RSE600	\$ 16,999.00	s/. 56,096.70	\$ 19,159.99	s/. 68,975.96
FLIR DUO PRO	\$ 7,665.56	s/. 25,296.35	\$ 6,599.0	s/. 23,756.4

Fuente: Elaboración propia.

Comparativa de alternativas comerciales

Como parte de los requerimientos de este proyecto se indicó el costo, motivo por el cual se presenta los precios de alternativas comerciales. Las cámaras mostradas comparten similitudes en cuanto a aplicación, dimensiones y peso con la cámara HSN120A.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto tuvo como objetivo general la calibración radiométrica de una cámara de infrarroja de bajo costo para realizar mediciones de temperatura, es decir se ha logrado realizar la adaptación de una cámara de vigilancia, la cual solo mostraba imágenes con colores de forma cualitativa respecto a la temperatura observada, a una cámara capaz de entregar un valor cuantitativo por cada píxel con un costo menor a las cámaras comerciales similares. Los estudios termográficos que se puedan realizar con esta cámara se encuentran sujetos al interés e inversión de la institución.

Respecto a los objetivos específicos se tiene lo siguiente:

1. Se obtuvo un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara. Se obtuvieron dos modelos matemáticos, el primero usando la ecuación de Planck y el segundo la regresión polinómica; siendo este último el que mejor resultados mostró.
2. Se desarrolló un software para obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por píxel. El software desarrollado es práctico e intuitivo de usar, además el uso de lenguaje de programación Python, libre y popular, facilita su comprensión e interpretación a lectores de campos de ingeniería. Este software, que usa los modelos matemáticos obtenidos en la calibración se encuentra disponible en el Anexo C y también en el repositorio GitHub personal del autor, de acceso libre pudiendo descargarse desde: <https://github.com/joabAM/ThermalCamPy.git>.
3. Se logró solucionar el enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias que permitieron el control a distancia. Estos componentes de hardware desarrollados han sido esenciales para las pruebas de calibración en el drone y modelamiento matemático. Además de fácil adquisición en el mercado local, lo que posibilita la replicación fácil y rápida de los componentes en casos de averías.

Trabajos futuros

Se iban a realizar mediciones térmicas durante el 2020 y se tenía como objetivos los volcanes Ubinas y Sabancaya, de ellos, el Ubinas presenta una mejor opción debido a la localización y porque tiene más relevancia ya que podría provocar la desaparición de un pueblo entero; pero debido a la pandemia las actividades extras se vieron paralizadas y las últimas pruebas que se realizaron en el 2019 solo incluyeron el uso de cámaras en el espectro visible para la reconstrucción del volcán Ubinas y su evaluación de riesgo (INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), 2022). Además, se tiene pendiente, realizar más comparaciones de los valores de calibración obtenidos en este proyecto, con alguno generado por un laboratorio o empresa que ofrezca este servicio. Las pruebas que se puedan realizar dependen del Instituto Geofísico del Perú, ya que todos los componentes son de su propiedad, y el traslado de materiales hacía Arequipa junto con la logística es costoso. El aplicativo permite visualizar las imágenes en escala de grises, pero como ya se ha mencionado, el ojo humano es más sensible a los colores, por esta razón es necesario crear una paleta térmica de falsos colores e incluirla como resultado final de la aplicación además de una opción para crear y guardar un nuevo vídeo junto a la paleta y los valores máximo y mínimo.

BIBLIOGRAFÍA

- Apaza, J. (2018). *Avance sobre la calibración y pruebas de campo del cuadricóptero*. Lima: Instituto Geofísico del Perú IGP.
- Apaza, J., Scipión, D., Lume, D., & Saito, C. (2017). Development of two UAVs for volcano studies in southern peru. *2017 IEEE INTERCON*, 1-4.
- Bower, S., Kou, J., & Saylor, J. (2009). A method for the temperature calibration of an infrared camera using water as a radiative source. *AIP Review of Scientific Instruments*, 80-85. <https://doi.org/10.1063/1.3213075>
- Budzier, H., & Gerlach, G. (2015). Calibration of uncooled thermal infrared cameras. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 4, 187-197. <https://doi.org/10.5194/jsss-4-187-2015>
- Carvill, J. (1994). *Mechanical Engineer's Data Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Chityala, R., & Pudipeddi, S. (2020). *Image Processing and Acquisition using Python* (2 ed.). Florida: CRC Press.
- Chrzanowski, K. (2010). *Testing Thermal Imagers: Practical guidebook*. Polonia: Military University of Technology.
- CONRED, Guatemala . (2018). *Informe Erupción Volcán de Fuego*. Guatemala : CONRED.
- Davies, A. (200). William Herschel and the discovery of near infrared. *NIR news*, 11, 3. <https://doi.org/10.1255/nirn.556>
- de Torres Curth, M. (2014). *Los reyes de la pasarela, modelos matemáticos en las ciencias*. Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Dehn, J., Dean, K., & Engle, K. (2002). Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano. *The Bulletin of Volcanology*, 64, 525-534. <https://doi.org/10.1007/s00445-002-0227-0>
- Domínguez Faura, N. (9 de 9 de 2019). *Noticias SER.PE*. https://www.noticiasser.pe/opinion/huaynaputina-419-anos-de-la-mas-grande-erupcion-volcanica-en-los-andes-ii?fbclid=IwAR3optaIPfFhWDwYqiusm6udjMWtQB_yi8hE0pH11MPRJtmBO8P8LM5R8FI
- Fidali, M., & Mikulski, M. (2008). An inexpensive blackbody mode. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 1-6. https://doi.org/10.21611/qirt.2008.14_01_04
- Flores, A., Scipión, D., Saito, C., Apaza, J., & Milla, M. (2019). Unmanned Aircraft System for Andean Volcano monitoring and surveillance. *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 297-302. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2019.8848941>

- Guerrero, B., & Caballo, D. (2019). *Fundamentos básicos de la fotografía*. Madrid: Universidad CEU San Pablo, Departamento de Comunicación Audiovisual y Publicidad.
- Harris, A. (2013). *Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes : A User's Manual* (1 ed.). Cambridge: Cambridge University Press. Retrieved 2019.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. D. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering--Vocabulary. *ISO/IEC/IEEE 24765:2017(E)*, 1-541. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.8016712>
- IGP, INGEMMET, & UNSA. (2017). *Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro*. Arequipa: IGP; INGEMMET; UNSA.
- INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP). (26 de 7 de 2015). OVS: Inspección del cráter volcán Sabancaya. Arequipa, Arequipa, Peru. Retrieved 9 de 9 de 2019, from <http://www.youtube.com/watch?v=ZPvEeqxNisl>
- INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP). (2017). *Investigación y Monitoreo de Volcanes Activos en el Sur del Perú*. Arequipa: IGP.
- INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP). (2 de Enero de 2020). IGP: inspección del cráter del Misti y toma de imágenes térmicas. Arequipa, Arequipa, Perú. <https://www.youtube.com/watch?v=cuQEpFvB3vo>
- INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP). (2022). *Morfología del cráter del volcán ubinas y peligro inminente de colapso en su flanco sur*. Instituto Geofísico del Perú . Lima: Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5227>
- Kelly, J., Kljun, N., Olsson, P.-O., Mihai, L., Liljeblad, B., Weslien, P., . . . Eklundh, L. (2019). Challenges and Best Practices for Deriving Temperature Data from an Uncalibrated UAV Thermal Infrared Camera. *Remote Sensing*, 11, 567-588. <https://doi.org/10.3390/rs11050567>
- Kreit, E., Mäthger, L. M., & Hanlon, R. T. (2013). Biological versus electronic adaptive coloration: how can one inform the other? *Journal of the Royal Society Interface*, 1-13. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0601>
- Lai, W., Kek, S. L., & Gaik, T. (2017). Solving Nonlinear Least Squares Problem Using Gauss-Newton Method. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology (IJSET)*, 258-262.
- Measurement Standards Laboratory of New Zealand, MSL. (2017). *Focus Effect in Thermal Imagers*. WELLINGTON : Measurement Standards Laboratory of New Zealand.
- Measurement Standards Laboratory of New Zealand, MSL. (2017). *Size-of-Source Effect in Infrared Thermometers*. WELLINGTON: Measurement Standards Laboratory of New Zealand.

- Mitchell, H. (2010). *Image Fusion: Theories, Techniques and Applications* (Vol. 1). Berlin: Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11216-4>
- Mohan, K. (2019). *Handbook of Physics*. Meerut: Arihant Prakashan.
- Neumann, K. J. (2008). Trends for Digital Aerial Mapping Cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 551-554.
- Ñaupas, H. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Omega Engineering Inc. (1 de 12 de 2018). *Infrared Calibrator: Hot Blackbody Calibration Source*. cl.omega.com: <https://cl.omega.com/pptst/BB-2A.html>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Palmer, J. M., & Grant, B. G. (2010). *The art of radiometry* (1 ed.). Bellingham: SPIE. Retrieved 2019.
- Prieto, M. (7 de 9 de 2018). *Enerheating expone los beneficios de la calefacción por infrarrojos en la salud*. smartlightinghome.com: <https://www.smartlightinghome.com/enerheating-expone-los-beneficios-de-la-calefaccion-por-infrarrojos-en-la-salud/>
- Pron, H., & Bouache, T. (2013). Alternative thermal calibrations of focal plane array infrared cameras. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 13, 94-108. <https://doi.org/10.1080/17686733.2015.1131854>
- Real Academia de la Lengua Española. (2014). *Diccionario de la lengua española*. 23. <https://dle.rae.es/>
- RN Childs, P. (2019). *Mechanical Design Engineering*. Oxford: Elsevier.
- Roldán, P. N. (3 de Enero de 2019). *Modelo matemático*. Economipedia: <https://economipedia.com/>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). *Physics for scientists and engineers* (6 ed.). California: Thomson-Brooks/Cole.
- Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Surrey NanoSystems. (9 de 9 de 2019). *Vantablack - Super-black coatings for stray light suppression*. surreynanosystems.com: <http://www.surreynanosystems.com/vantablack>
- Tafur, R., & Izaguirre, M. (2014). *Cómo hacer un proyecto de investigación*. Lima: Tarea Asociación gráfica Educativa.
- Tamayo, M. (2004). *El Proceso De La Investigacion Cientifica*. Mexico: Editorial LIMUSA S.A.

Teledyne FLIR LLC. (9 de 9 de 2019). *Cámaras térmicas de alta velocidad: la velocidad necesaria*. www.flir.es: <https://www.flir.es/discover/rd-science/high-speed-thermal-cameras--the-need-for-speed/>

Vavilov, V., & Burleigh, D. (2020). *Infrared Thermography and Thermal*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48002-8>

Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2018). *Infrared thermal imaging : fundamentals, research and applications* (2 ed.). Weinheim: Wiley-VCH. Retrieved 2019.

Williams, T. (2009). *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance*. Oxfordshire: Taylor and Francis Group.

ANEXOS

Anexo A

Matriz de consistencia

Acorde (Tafur y Izaguirre, 2014) la matriz de consistencia, es la tabla que elabora un investigador cuando expresa las concordancias entre cada una de las partes y subpartes o elementos constitutivos de que consta un proyecto de investigación, presentado sintéticamente.

También acorde (Ñaupas, 2014), la matriz de consistencia es un cuadro resumen de una sola entrada presentado en forma horizontal con cinco columnas en la que figura de manera panorámica los cinco elementos básicos del proyecto de investigación: Problemas, objetivos, hipótesis, variables e indicadores y la metodología. De la última definición, se observa la estructura de la matriz de consistencia, sin embargo, se dice son los elementos básicos. Se detalla en (Tafur y Izaguirre, 2014) que “*En realidad no existe norma para la presentación de los elementos constitutivos de la matriz de consistencia. El investigador tiene libertad para hacer su elaboración y presentación*” por lo que el autor no presenta un modelo estándar. Debido a esto, para la estructura de la matriz, se usará como referencia el modelo detallado y descrito en (Ñaupas, 2014) para trabajos de investigación cualitativa y cuantitativa, la matriz de consistencia se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Matriz de consistencia del proyecto.

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general			
¿Es posible realizar la calibración radiométrica de una cámara infrarroja de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos?	Desarrollar la calibración radiométrica de una cámara de infrarroja de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos.	Se puede realizar la calibración radiométrica de una cámara de bajo costo para realizar mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos	Independiente: Calibración radiométrica de una cámara de bajo costo Dependiente: Mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos Dimensiones: Adimensional Grados °C - °K / pixel	Pruebas en ambiente controlado y en drone para la calibración radiométrica de una cámara de bajo costo Valores de temperatura en imagen procesada para mediciones de temperatura para aplicarlo a estudios termográficos	Tipo de investigación: Investigación aplicada Nivel de la investigación: Experimental Diseño de la investigación: Cuasiexperimental de series cronológicas
Problemas Específicos	Objetivos Especificos	Hipótesis Especificas			
¿Se puede obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara de estudio?	Obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara de estudio.	Es posible obtener un modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja con la temperatura calculada para la cámara de estudio.	Independiente: Modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja Dependiente: Temperatura calculada para la cámara de estudio Dimensiones: Grados brutos Grados °C - °K / pixel	Curva de regresión del modelo matemático de la intensidad de radiación infrarroja Valor numérico de temperatura calculada para la cámara de estudio	Población: Todos los posibles valores del sensor térmico Muestra: No probabilística Técnica de recolección: Muestreo incidental

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			Instrumentos:
¿Se puede desarrollar un software para obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por pixel?	Desarrollar un software para obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por pixel	El desarrollar un software permitirá obtener imágenes térmicas con valores medibles de temperatura por pixel	Independiente: Software Dependiente: Valores medibles de temperatura por pixel Dimensiones: Adimensional Grados °C - °K / pixel	Ejecución y buen funcionamiento del software Nueva imagen con visualización de valores medibles de temperatura por pixel	Instrumentos: Cuerpo negro Sistema de enfoque Software desarrollado
¿Es posible solucionar el problema de enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias?	Solucionar el enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias	Se soluciona el problema de enfoque manual de la cámara mediante el diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias	Independiente: Diseño e implementación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias Dependiente: Solución del problema de enfoque manual de la cámara. Dimensiones: Adimensional Adimensional	Diseño y simulación de esfuerzo y deformación de piezas mecánicas y electrónicas complementarias Apreciación visual de mejor resolución en la imagen térmica debido a la solución al problema de enfoque manual de la cámara.	

Nota: La tabla contiene un tamaño de letra 8, ya que no es posible ajustar a los formatos del documento un diseño adecuado visualmente para el lector.

Fuente: Elaboración propia

Anexo B

Hojas de datos de los componentes principales usados.

Cámara Térmica

Se presentan las hojas de datos proporcionadas por el fabricante de la cámara, estas páginas solo se refieren a las especificaciones técnicas, más no al manual de operación.



Figura 54. Cámara térmica con envoltura impresa en 3D. Fuente: Elaboración propia.

También se muestra las hojas de datos del controlador de temperatura y el motor DC usado en ajuste del enfoque.

1 Introduction

The ASP-N20/ASP-N120A Network Thermal Imaging Camera is equipped with UFPA detector with real-time image processing. Featured with ultra-low power consumption and high sensitivity. ASP-N20/ASP-N120A produces clear infrared images of observed objects. ASP-N20/ASP-N120A does not require any visible light and can operate in complete darkness as well as hazed weather conditions such as smoke, haze, dust, glare and light fog.

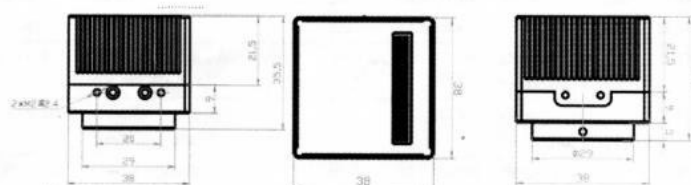
NBT digital calibration patented technology allows ASP-N20/ASP-N120A producing infrared images without shutter. To compare with the Network thermal imaging cameras with shutter ASP-N20/ASP-N120A takes advantage in continuous, uninterrupted video. TIE Network thermal imaging enhance patented technology can recognize tiny details of the image, wide gray dynamic range, H & L temp display. The product is designed to comply with analog surveillance system and digital output for integration. ASP-N20/ASP-N120A is applicable for different industries, such as surveillance system, fire control, investigation, border defense, marine, research, etc.

2 Product Diagram

2.1 HSN10/HSN120

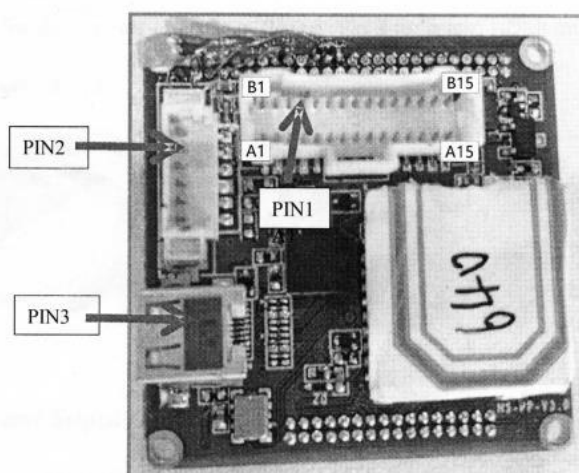


2.2 ASP-N20/ASP-N120A Outline Size



3 Connection

3.1 Interfaces Pins Definition



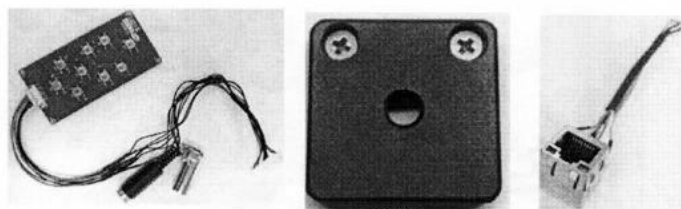
Pin1 definition

Pin	Name	Explanation	Level	Name	Explanation	Function	Level
A1	P_CVBS	Analogue		B1	PWM0_OUT	PWM 0 output	3.3V
A2	GND	Video Ground		B2	PWM1_OUT	PWM 1 output	3.3V
A3	GND	GND		B3	PWM2_OUT	PWM 2 output	3.3V
A4	GND	GND		B4	PWM3_OUT	PWM 3 output	3.3V
A5	KEY_COL2	determinant keyboard (Column 3)	3.3V	B5	GND	GND	
A6	KEY_COL1	determinant keyboard (Column 2)	3.3V	B6	GND	GND	
A7	KEY_COL0	determinant keyboard	3.3V	B7	GND	GND	

		(Column 1)					
A8	GND	GND		B8	COM_TXD	Serial port output	3.3V
A9	GND	GND		B9	COM_RXD	Serial port input	3.3V
A10	TXP	100Mnetwork interface sending data+		B10	KEY_ROW2	determinant keyboard(Column 3)	3.3V
A11	TXN	100Mnetwork interface sending data -		B11	KEY_ROW1	determinant keyboard(Column 2)	3.3V
A12	RXP	100Mnetwork interface sending data +		B12	KEY_ROW0	determinant keyboard(Column 1)	3.3V
A13	RXN	100Mnetwork interface sending data -		B13	CMD_TXD	Serial port output	3.3V
A14	GND	GND		B14	CMD_RXD	Serial port input	3.3V
A15	GND	GND		B15	VSYS	Power input (3.3V~12V)	

Pin 2 for debug, not open to customer; Pin 3 for micro HDMI interface,

3.2 Accessories



4 Power Supply

The ASP-N20/ASP-N120A is designed of use DC 12V. To obtain the best performance, a 1+ A electric current with 12V power is recommended.

The ASP-N20/ASP-N120A is designed with overload protection; however using an incorrect power supply will still lead to device failure. Please make sure the power source, current and power is correct for the device in order to avoid malfunction.

5 Key Features

- NBT digital calibration, Continuous video output
- gray threshold alarm function and to identify hot target

ASP-N20/ASP-N120A Lens and distance indication

Man and car detect distance indication							
	ASP-N20	MAN (1.8m x 0.5m)(m)			CAR (4.2m x 1.8m) (m)		
Focal Length	FOV (°)	Detect	Recog.	Idef.	Detect	Recog.	Idef.
8	44.4 × 34.0	175	55	25	540	180	90
10	36.2 × 27.5	220	70	35	675	225	110
15	24.6 × 18.5	330	110	55	1015	335	165
19	19.5 × 14.7	415	140	70	1285	425	210
35	10.7 × 8.0	770	255	125	2365	785	395
50	7.5 × 5.6	1100	365	180	3380	1120	560
75	5.0 × 3.7	1650	550	270	5070	1690	840
100	3.7 × 2.8	2200	735	368	6765	2255	1120
150	2.5 × 1.9	3300	1100	550	10140	3380	1690

ASP-N120A Lens and distance indication

Man and car detect distance indication							
	ASP-N120A	MAN (1.8m x 0.5m)(m)			CAR (4.2m x 1.8m) (m)		
Focal Length	FOV (°)	Detect	Recog.	Idef.	Detect	Recog.	Idef.
8	68.4 × 54.0	175	55	25	540	180	90
10	57.1 × 44.4	220	70	35	675	225	110
15	39.9 × 30.4	330	110	55	1015	335	165
19	32.0 × 24.2	415	140	70	1285	425	210
35	17.7 × 13.3	770	255	125	2365	785	395
50	12.4 × 9.3	1100	365	180	3380	1120	560
75	8.3 × 6.2	1650	550	270	5070	1690	840
100	6.2 × 4.7	2200	735	368	6765	2255	1120
150	4.2 × 3.1	3300	1100	550	10140	3380	1690

9 ASP-N20/ASP-N120A Specification

Detector	
Type	ASP-N20 ASP-N120A
Array format	384×288 640×480
Pixel size	17μm
Detector	Uncooled FPA
Spectral range	8~14μm
NETD	≤60mk@30°C
Image	
Calibration	NBT digital calibration patented technology
Noise reduce	Digital filtering
Image enhancement	TIE thermal imaging enhance patented technology
Electric zoom	2X, 4X, 8X, 16X digital zoom
Polarity reversal	Available
Frame rate	50Hz
Display	
Video output	CVBS 50Hz (PAL) / 60Hz (NTSC)
Palette	12 Palettes
Level adjustment	Automatic/Manual
Brightness/Gain	Automatic/Manual
OSD	Firmware programmable, Full-screen overlay
Interface	
Port	RS485/232 optional
Power	Available
Alarm interface	Input and output of a group
Network interface	Gigabit Ethernet ports (10/100 / 1000M adaptive)
Analog video interface	BNC
Power Supply	
Operate voltage range	DC3-12V
USB power supply	Yes
Power consumption	<2.35W <2.5W
Reverse connect	Available

protect	
Over-voltage protection	Available
	Environment
Operating temp.	-40°C ~ +60°C
Storage temp.	-50°C ~ +85°C
Humidity	≤95% (non-condense)
	Lens
Focal length	(8mm, 10mm, 15mm, 19mm, 35mm, 50mm, 75mm, 100mm, 150mm)optional
Focus	Fixed, manual, electric (optional)
	Physical
Dimension	41mm x 38mm x 38mm(L x W x H) without lens or 41mm x 32mm x 32mm(L x W x H) without lens Optional
Weight	< 70g(without lens) or 50g(without lens)
	Features
Calibration	NBT digital calibration, Continuous video output
Imaging	Thermal image enhancement , Noise reduction
Network protocol	TCP/IP,HTTP,RTSP,RTMP,DHCP,DNS,DDNS,PPPOE,S MTPFTP , ONVIF
Playback	Constant Video playback, pick up details
Coding	Master code: D1 FULL CBR/VBR Secondary code: CIF/CIF/D1 1 ~ FULL CBR/VBR
OSD overlay	Firmware program, Full-screen overlay
Storage	Embedded SD card video record control by remote end
Network interface	Support Pelco D protocol for remote control

10 Trouble shooting

If you encounter any problems, please refer to the table below. If the problem persists, turn off the power and contact our technology services persons.

Fault	Solution
No image after power on	1.Check if power is connected correctly 2.Check if you are using the correct power supply
Only OSD is being displayed	1.Check if lens cover has been take off 2.Check if image freeze feature is on
Image isn' t being displayed correctly	1.Check if playback features is on

11 Accessories List

Name	PCS	Remark
Thermal Imaging Camera	1	Standard
Lens	1	15mm (optional)
Mount Bracket	1	Standard
Aviation Socket Cable	1	Standard
DC Adapter	1	optional
Serial Port Pocket	1	Standard
Warranty Card	1	Standard
User Manual	1	Standard
Packing List	1	Standard

Rex C100



Ibérica de Automatismos S.A.



REX-C100
REX-C400
REX-C410
REX-C700
REX-C900



General Description

The REX Century series is the high performance PID controller with easy-to-use. Heat/cool control and two alarms including heater break alarm and loop break alarm are available. The REX Century series is available in five DIN sizes from 1/16 DIN to 1/4 DIN.

Features

- ☆ Heat/cool control for extrusion process (except for REX-C100)
- ☆ Heater break alarm (single or three-phase) and loop break alarm
- ☆ CE marked, UL approved and CSA certified
- ☆ Power supply selection among 100 to 240VAC, 24VDC and 24VAC

Loop break alarm (LBA)

The control loop break alarm (LBA) monitors and protects an entire temperature control system. The LBA detects heater break, thermocouple or RTD failures, short circuits, or the failure of an operating device such as a mechanical or solid state relay.

When the PID computed value reaches 100% and the temperature does not respond in LBA set time, the loop break alarm is activated. Conversely, when the PID value reaches 0% and the temperature does not respond accordingly, the loop break alarm is turned on.

Heat/cool control

The heat/cool PID controller has heat and cool outputs for use where process-generated heat exists. The controller allows the input of overlap or deadband settings which can contribute to energy savings.

Heater break alarm (HBA)

The HBA function monitors the load via an external current transformer*1 and detects failures in the control circuit such as heater breaks and the failure of a mechanical or solid state relay. When the control output is on and the load current drops below the HBA set value, the heater break alarm is activated. Conversely, when the control output is off and the load current still exists, the heater break alarm is turned on.

HBA for three phases is available. Please contact RKC for details.

*1 Current transformer: CTL-6-P-N (0 to 30A), CTL-12-S56-10L-N (0 to 100A)

info@ibericadeautomatismos.com

www.ibericadeautomatismos.com



Specifications

Inputs

Input (Universal input)

- a) Thermocouple : K, J, R, S, B, E, T, N (JIS/IEC), PLII (NBS)
W5Re/W26Re (ASTM), U, L (DIN)
• Influence of external resistance : Approx. 0.35µV/Ω
• Input break action : Up-scale
- b) RTD : Pt100 (JIS/IEC), JPt100 (JIS)
• Influence of input lead resistance : Approx. 0.01[%/Ω] of reading
• Maximum 10Ω per wire
- Input break action : Up-scale
- c) DC voltage : 0 to 5V, 1 to 5V (0.0 to 100.0% fixed)
• Input break action : Down-scale
- d) DC current : 0 to 20mA, 4 to 20mA (0.0 to 100.0% fixed)
• Input break action : Down-scale

Sampling time

0.5 sec

Performance

Measuring accuracy

- a) Thermocouple
±(0.5% of reading + 1 digit) or ±3°C (6°F) whichever is larger
R, S inputs: ±6°C (12°F) between 0 and 399°C (0 and 799°F)
• Accuracy is not guaranteed between 0 and 399°C (0 and 799°F) for type B.
- b) RTD
±(0.5% of reading + 1 digit) or ±0.8°C (1.6°F) whichever is larger
- c) DC voltage and DC current
±(0.5% of span + 1 digit)

Insulation resistance

More than 20MΩ (500V DC) between measured and ground terminals
More than 20MΩ (500V DC) between power and ground terminals

Dielectric strength

1000V AC for one minute between measured and ground terminals
1500V AC for one minute between power and ground terminals

Control

Control method

- a) PID control with autotuning
• Available for reverse and direct action (Specify when ordering)
- b) Heat/cool PID control with autotuning (Not available on REX-C100)
• Available for air and water cooling type (Specify when ordering)

Major setting range

Setting range : Same as input range.
Heat-side proportional band: 1 to span or 0.1 to span
(ON/OFF action when P=0)
• Differential gap at ON/OFF action is 2°C (°F) as standard
(Factory set value)

Cool-side proportional band: 0 to 1000% of heat-side proportional band
(Heat/cool ON/OFF action when P=0)

Integral time : 0 to 3600sec.(PD action when I=0)

Derivative time : 0 to 3600sec.(PI action when D=0)

Anti-reset windup (ARW) : 1 to 100% of heat-side proportional band

Deadband/overlap : -10 to 10°C (°F) or -10.0 to 10.0°C (°F)

Proportional cycle : 1 to 100 sec.

Control output

Relay output : Form C contact, 250V AC 3A (resistive load)
(Form A contact : REX-C100)

Voltage pulse output : 0/12V DC
(Load resistance : More than 600Ω)

Current output : 4 to 20mA DC
(Load resistance : Less than 600Ω)

Triac trigger output : For medium capacity triac drive
(less than 100A)

• Not available on Heat/cool PID type.

info@ibericadeautomatismos.com

Alarms

(Optional)

Temperature alarm

- a) Number of alarm : 2 points (Maximum)
- b) Alarm action : Deviation High, Low, High/Low, Band
Process High, Low
- c) Alarm differential gap: 2°C (°F) or 2.0°C (°F) as standard.

Heater break alarm (For single phase)

- a) Number of inputs : 1 point
- b) CT type : CTL-6-P-N(30A), CTL-12-S56-10L-N(100A)
- c) Display range : 0.0 to 100.0A
- d) Accuracy : ± 5% of input value or 2A
(whichever is larger)

• Output from alarm 2 terminal.

Control loop break alarm (LBA)

- a) LBA time setting : 0 to 7200 sec.
- b) LBA deadband : 0 to 999 °C(°F) or 100% of span
(OFF when LBA deadband = 0)
- Not available for triac trigger output type.
- Not available for heat/cool type.

Alarm output

Relay output, Form A contact 250V AC 1A (resistive load)

General specifications

External Dimensions (W x H x D)

REX-C100 : 48 x 48 x 100mm
REX-C400 : 48 x 96 x 100mm
REX-C410 : 96 x 48 x 100mm
REX-C700 : 72 x 72 x 100mm
REX-C900 : 96 x 96 x 100mm

Supply voltage

- a) 85 to 264V AC (Including supply voltage variation)
[Rating : 100 to 240V AC] (50/60Hz common)
- b) 21.6 to 26.4V AC (Including supply voltage variation)
[Rating : 24V AC] (50/60Hz common)
- c) 21.6 to 26.4V DC (Ripple rate 10% p-p or less)
[Rating : 24V DC]

Power consumption

Less than 17VA for standard AC type
Less than 7.5VA for 24V AC type
Less than 200mA for 24V DC type

Effect by power failure

A power failure of 20msec or less will not affected the control action.
If power failure of more than 20msec occurs, controller will restart.

Operating environment : 0 to 50°C [32 to 122°F] , 45 to 85% RH

Memory backup : Backed up by Non-volatile memory.

Net weight

REX-C100 : Approx. 170g
REX-C400 : Approx. 260g
REX-C410 : Approx. 260g
REX-C700 : Approx. 250g
REX-C900 : Approx. 340g

www.ibericadeautomatismos.com



Ibérica de Automatismos S.A.

Model and Suffix Code

Specifications	Model and Suffix Code
Model	C100 (48 x 48mm size) C400 (48 x 96mm size) C410 (96 x 48mm size) C700 (72 x 72mm size) C900 (96 x 96mm size)
Control method	PID control with AT (reverse action) PID control with AT (direct action) Heat/cool PID with AT (Water cooling type) • Except REX-C100 *1 Heat/cool PID with AT (Air cooling type) • Except REX-C100 *1
Input type	See range and input code table
Scale range	See range and input code table
Control output (OUT1)	Relay contact output Voltage pulse output DC current output : 4 to 20mA *2 Triac trigger output *3
Control output (OUT2)	Control action : F, D Relay contact output Voltage pulse output DC current output : 4 to 20mA
Alarm 1	No alarm See alarm code
Alarm 2	No alarm See alarm code

Note

*1 Triac trigger output and LBA are not available on heat/cool type.

*2 HBA is not available if current output is specified.

*3 Alarm 2 is not available for REX-C100 if triac trigger output is specified.

• For CE marked, UL approved and CSA certified products, please add the suffix of "CE" to the end of the model code.

Range and input code table

Thermocouple input

Input	Code	Range
K	K 01	0 200°C
	K 02	0 400°C
	K 03	0 600°C
	K 04	0 800°C
	K 05	0 1000°C
	K 06	0 1200°C
	K 07	0 1372°C
	K 13	0 100°C
	K 14	0 300°C
	K 20	0 500°C
	K A1	0 800°F
	K A2	0 1600°F
	K A3	0 2502°F
	K A9	20 70°F
	J 01	0 200°C
	J 02	0 400°C
J	J 03	0 600°C
	J 04	0 800°C
	J 05	0 1000°C
	J 06	0 1200°C
	J A1	0 800°F
	J A2	0 1600°F
R	R 01	0 1600°C
	R 02	0 1789°C
	R 04	0 1350°C
	R A1	0 3200°F
	R A2	0 3218°F
	S 01	0 1600°C
S	S 02	0 1789°C
	S A1	0 3200°F
	S A2	0 3218°F
B	B 01	400 1800°C
	B 02	0 1789°C
	B A1	800 3200°F
	B A2	0 3308°F

• Type B input : Accuracy is not guaranteed between 0 and 399°C (0 and 799°F)

Input	Code	Range
E	E 01	0 800°C
	E 02	0 1789°C
K	E A1	0 1600°F
	E A2	0 1832°F
N	N 01	0 1200°C
	N 02	0 1300°C
N	N A1	0 2300°F
	N A2	0 2372°F
T	T 01	-199.9 400.0°C
	T 02	-199.9 100.0°C
	T 03	-100.0 200.0°C
	T 04	0.0 350.0°C
	T A1	-199.9 752.0°F
	T A2	-100.0 200.0°F
	T A3	-105.0 480.0°F
	T A4	0.0 450.0°F
	T A5	0.0 752.0°F
W5Re /W26Re	W 01	0 2000°C
	W 02	0 2320°C
W	W A1	0 4000°F
	W A2	0 1300°C
A	A 01	0 1300°C
	A 02	0 1390°C
A	A 03	0 1200°C
	A A1	0 2400°F
A	A A2	0 2534°F
U	U 01	-199.9 600.0°C
	U 02	-199.9 100.0°C
	U 03	0.0 400.0°C
U	U A1	-199.9 999.9°F
	U A2	-100.0 200.0°F
	U A3	0.0 999.9°F
L	L 01	0 400°C
	L 02	0 800°C
L	L A1	0 800°F
	L A2	0 1600°F

RTD input

Input	Code	Range
Pt100	D 01	-199.9 645.0°C
	D 02	-199.9 200.0°C
	D 03	-100.0 50.0°C
	D 04	-100.0 100.0°C
	D 05	-100.0 200.0°C
	D 06	0.0 50.0°C
	D 07	0.0 100.0°C
	D 08	0.0 200.0°C
	D 09	0.0 300.0°C
	D 10	0.0 500.0°C
	D A1	-199.9 999.9°F
	D A2	-199.9 400.0°F
	D A3	-199.9 200.0°F
	D A4	-199.9 100.0°F
	D A5	-100.0 300.0°F
	D A6	0.0 100.0°F
JPt100	D A7	0.0 200.0°F
	D A8	0.0 400.0°F
	D A9	0.0 500.0°F
	P 01	-199.9 645.0°C
	P 02	-199.9 200.0°C
	P 03	-100.0 50.0°C
	P 04	-100.0 100.0°C
	P 05	-100.0 200.0°C
	P 06	0.0 50.0°C
	P 07	0.0 100.0°C
	P 08	0.0 200.0°C
	P 09	0.0 300.0°C
	P 10	0.0 500.0°C

Voltage and Current input

Input	Code	Range
0 5V DC	4 01	0.0 100.0 (Fixed)
1 5V DC	6 01	0.0 100.0 (Fixed)
0 20mA DC	7 01	0.0 100.0 (Fixed)
4 20mA DC	8 01	0.0 100.0 (Fixed)

Alarm code

Code	Type
A	Deviation High
B	Deviation Low
C	Deviation High - Low
D	Deviation Band
E	Deviation High with hold
F	Deviation Low with hold
G	Deviation High/Low with hold

Code	Type
H	Process High
J	Process Low
K	Process High with hold
L	Process Low with hold
R	Loop break alarm (LBA)
P	Heater break alarm (CTL-6P-N [30A])
S	Heater break alarm (CTL-12-S6-10L-N [100A])

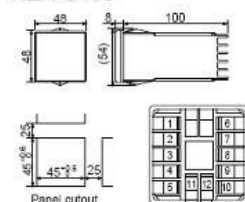
Supply voltage

100 - 240V AC
24V AC
24V DC
info@ibericadeautomatismos.com
www.ibericadeautomatismos.com

External Dimensions and Rear Terminals

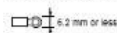
(Unit : mm)

REX-C100



No.	Description
1	Alarm output
2	Relay contact output
3	Control Output
4	(1) Relay contact output
5	(2) Voltage DC/Current DC
6	(3) Triac trigger output

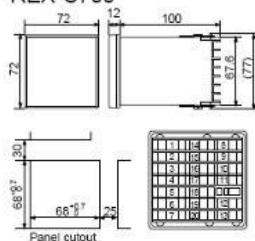
• Use 5.2mm or less solderless terminal.



No.	Description
7	Power supply
8	Measured input
9	(1) Thermocouple
10	(2) RTD
11	(3) Voltage/Current

No.	Description
11	CT input for heater break alarm
12	Current transformer input

REX-C700

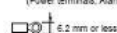


No.	Description
1	Ground
2	Power supply
3	Control Output
4	(1) Relay contact output
5	(2) Voltage DC/Current DC
6	(3) Triac trigger output

• Solderless terminal

Use the lug suitable for a screw of M3.

• For terminal No. 1 to 10 (Power terminals, Alarm terminals and Output terminals)



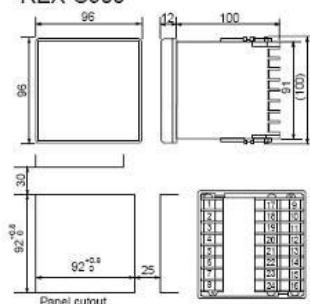
No.	Description
8	Alarm output
9	Relay contact output
10	Measured input
11	(1) Thermocouple
12	(2) RTD
13	(3) Voltage/Current

No.	Description
19	CT input for heater break alarm
20	Current transformer input

• For terminal No. 11 to 13 (input terminals)

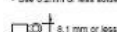


REX-C900



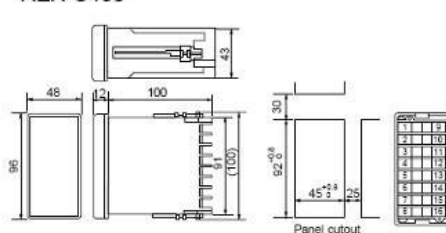
No.	Description
1	Ground
2	Power supply
3	Control Output
4	(1) Relay contact output
5	(2) Voltage DC/Current DC
6	(3) Triac trigger output

• Use 5.2mm or less solderless terminal.

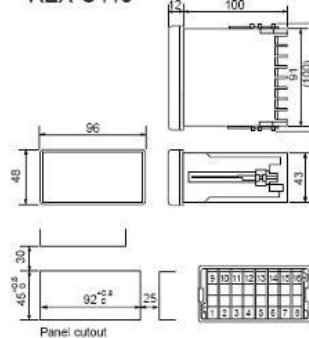


No.	Description
9	Alarm output
10	Relay contact output
11	Measured input
12	(1) Thermocouple
13	(2) RTD
14	(3) Voltage/Current

REX-C400



REX-C410


info@ibericadeautomatismos.com
www.ibericadeautomatismos.com

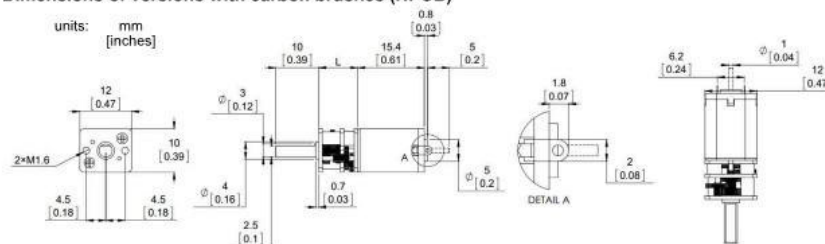
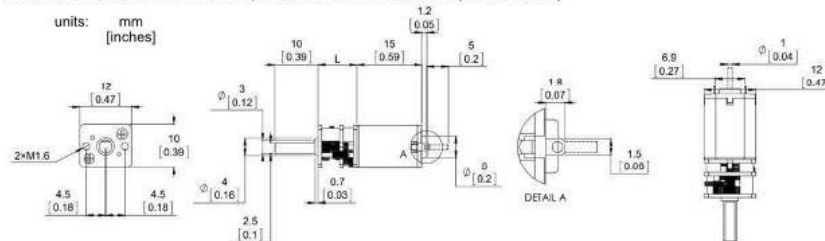
*Motor DC***Micro Metal Gearmotors**

Pololu Micro Metal Gearmotors are available in 12 different gear ratios, from 5:1 up to 1000:1, and with five different motor options:

- **LP 6V:** Low-power 6 V with precious metal brushes
- **MP 6V:** Medium-power 6 V with precious metal brushes
- **HP 6V:** High-power 6 V with precious metal brushes
- **HPCB 6V:** High-power 6 V with long-life carbon brushes
- **HPCB 12V:** High-power 12 V with long-life carbon brushes



Each motor is available with an optional extended rear motor shaft to allow for the addition of an encoder such as Pololu item #3081 Magnetic Encoder Pair Kit.

Dimensions of versions with carbon brushes (HPCB)**Dimensions of versions with precious metal brushes (HP, MP, LP)**

L = 9 mm [0.35 in] for all gear ratios except 1000:1. L = 12.5 mm [0.49 in] for the 1000:1 gear ratio. Max length for M1.6 mounting screws is 1.3 mm (from gearbox mounting surface). Approximate weight is 10 g.

Micro Metal Gearmotors



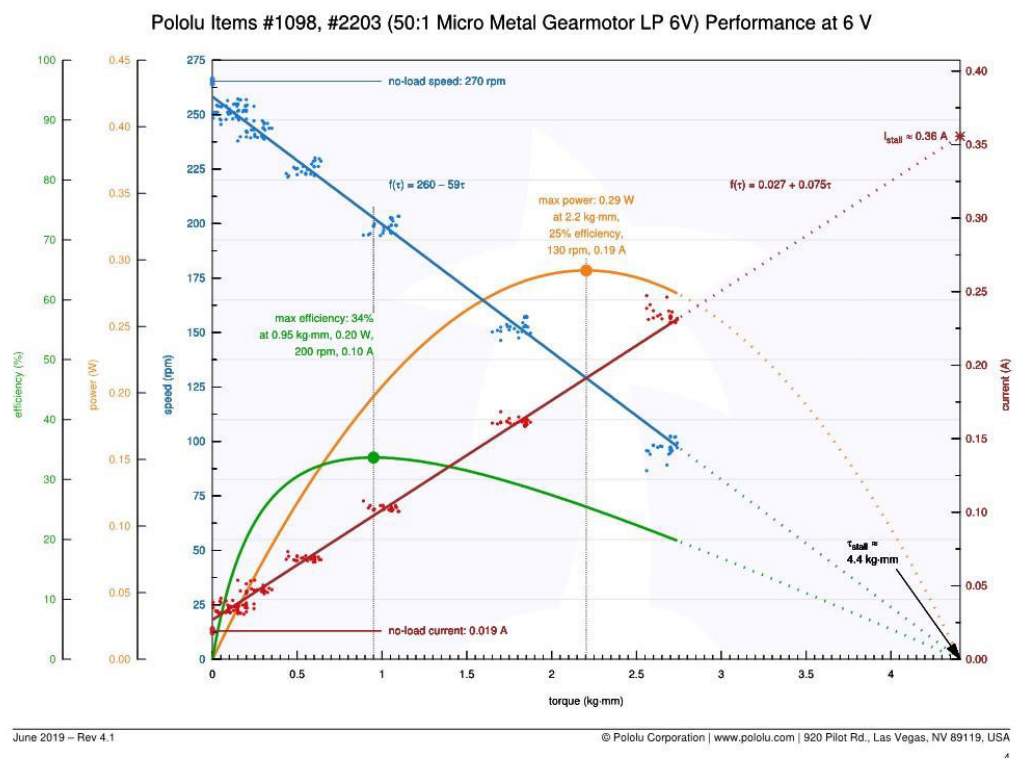
Performance summary and table of contents

Motor Type	Rated Voltage	Pololu Item #	Gear Ratio	No Load		At Maximum Efficiency				Max Power	Stall Extrapolation		Graph Page
				Speed	Current	Speed	Torque	Current	Output		Torque	Current	
			1:1	RPM	A	RPM	kg mm	A	W	W	kg mm	A	
Low-Power (LP 6V)	6 V	1100, 2200	4.995	2500							0.5		
		1099, 2201	9.96	1300							1.0		
		993, 2202	29.86	450		320	0.66	0.11	0.22	0.31	2.9		3
		1098, 2203	51.45	270		200	1.0	0.10	0.20	0.29	4.4		4
		2360, 2209	75.81	180		140	1.3	0.10	0.19	0.29	6.4		5
		992, 2204	100.37	130	0.02	100	1.7	0.10	0.17	0.25	7.4	0.36	6
		1097, 2205	150.58	90		67	2.6	0.19	0.18	0.25	11		7
		1096, 2206	210.59	65		46	4.1	0.12	0.19	0.25	16		8
		1095, 2207	248.98	54		39	4.2	0.11	0.17	0.23	17		9
		1094, 2208	297.92	45		34	4.4	0.09	0.15	0.22	20		10
		4790, 4791	379.17	36		29	5.4	0.08	0.16	0.27	29		11
Medium-Power (MP 6V)	6 V	1596, 3058	986.41	13		10	12	0.09	0.12	*	55		12
		2362, 2376	4.995	4400							0.6		
		2363, 2377	9.96	2200							1.1		
		2364, 2378	29.86	720		510	0.80	0.21	0.41	0.57	3.3		13
		2365, 2379	51.45	420		310	1.2	0.19	0.38	0.55	5.4		14
		2366, 2380	75.81	290		220	1.6	0.17	0.35	0.54	7.8		15
		2367, 2381	100.37	220	0.04	170	1.9	0.17	0.32	0.50	9.4	0.67	16
		2368, 2382	150.58	150		110	2.6	0.15	0.30	0.48	13		17
		2369, 2383	210.59	100		83	3.4	0.16	0.29	0.46	17		18
		2370, 2384	248.98	88		69	4.5	0.17	0.31	0.48	22		19
		2371, 2385	297.92	73		56	5.9	0.17	0.29	0.44	24		20
		4792, 4793	379.17	57		46	6.9	0.16	0.33	0.53	36		21
High-Power (HP 6V)	6 V	2372, 3059	986.41	22		17	13	0.16	0.23	*	63		22
		1000, 2210	4.995	6100							1.1		
		999, 2211	9.96	3100		2300	0.46	0.42	1.1	1.6	2.2		23
		1093, 2212	29.86	1000		830	1.0	0.36	0.89	1.5	5.7		24
		998, 2213	51.45	590		490	1.5	0.32	0.75	1.3	8.6		25
		2361, 2215	75.81	410		340	2.3	0.34	0.80	1.4	13		26
		1101, 2214	100.37	310	0.07	250	2.9	0.33	0.73	1.3	17	1.6	27
		997, 2386	150.58	210		170	3.9	0.31	0.68	1.2	24		28
		996, 2216	210.59	150		120	5.0	0.32	0.62	1.1	29		29
		995, 2217	248.98	120		100	5.5	0.30	0.59	1.1	34		30
		994, 2218	297.92	100		87	6.5	0.31	0.58	1.1	40		31
		4794, 4795	379.17	84		70	8.4	0.28	0.61	1.1	55		32
High-Power Carbon Brushes (HPCB 6V)	6 V	1595, 2373	986.41	31		26	20	0.32	0.53	*	120		33
		3060, 3082	4.995	6500							0.9		
		3061, 3071	9.96	3300		2300	0.42	0.51	1.0	1.3	1.7		34
		3062, 3072	29.86	1100		840	1.0	0.43	0.85	1.2	4.5		35
		3063, 3073	51.45	650		490	1.6	0.42	0.80	1.2	7.4		36
		3064, 3074	75.81	430		330	2.5	0.43	0.87	1.3	11		37
		3065, 3075	100.37	330	0.10	260	3.3	0.44	0.86	1.3	16	1.5	38
		3066, 3076	150.58	220		170	4.1	0.39	0.73	1.1	20		39
		3067, 3077	210.59	160		120	5.9	0.40	0.74	1.1	28		40
		3068, 3078	248.98	130		100	6.6	0.40	0.71	1.1	32		41
		3069, 3079	297.92	110		85	7.4	0.42	0.65	1.0	34		42
		4796, 4797	379.17	85		68	10	0.40	0.71	1.0	50		43
High-Power Carbon Brushes (HPCB 12V)	12 V	3070, 3080	986.41	33		26	22	0.39	0.59	*	110		44
		3036, 3047	4.995	6800							0.9		
		3037, 3048	9.96	3400		2500	0.43	0.25	1.1	1.5	1.7		45
		3038, 3049	29.86	1100		840	1.0	0.23	0.82	1.1	3.9		46
		3039, 3050	51.45	650		500	1.5	0.22	0.79	1.1	6.7		47
		3040, 3051	75.81	450		350	2.1	0.20	0.76	1.1	10		48
		3041, 3052	100.37	330	0.06	260	2.9	0.21	0.78	1.1	13	0.75	49
		3042, 3053	150.58	220		170	4.2	0.21	0.73	1.0	18		50
		3043, 3054	210.59	160		120	5.6	0.21	0.71	1.0	25		51
		3044, 3055	248.98	130		110	6.6	0.21	0.72	1.1	30		52
		3045, 3056	297.92	110		87	7.3	0.21	0.65	1.0	33		53
		4798, 4799	379.17	85		67	11	0.20	0.75	1.0	50		54
High-Power Carbon Brushes (HPCB 12V)	12 V	3046, 3057	986.41	35		27	21	0.19	0.59	*	100		55

* Operating the 1000:1 gear ratios at maximum power is likely to damage the gearboxes.

Notes:

- 1) Max efficiency data and performance graphs currently unavailable for all 5:1 gear ratios and LP and MP 10:1 gear ratios.
- 2) Listed stall torques and currents are theoretical extrapolations; units will typically stall well before these points as the motors heat up. Stalling or overloading gearmotors can greatly decrease their lifetimes and even result in immediate damage. The recommended upper limit for instantaneous torque is 25 kg mm for the 380:1 and 1000:1 gearboxes, and 20 kg mm for all other gear ratios; we strongly advise keeping applied loads well under these limits. Stalls can also result in rapid (potentially on the order of seconds) thermal damage to the motor windings and brushes, especially for the versions that use high-power (HP and HPCB) motors; a general recommendation for brushed DC motor operation is 25% or less of the stall current.



Página adjunta 14

Anexo C

Código del microcontrolador para el mecanismo de enfoque

```

1  volatile int pwm_value = 0;
2  volatile int prev_time = 0;
3  int in1 = 7;
4  int in2 = 8;
5  int stby = 6;
6
7  int r_max = 1990;
8  int r_min = 1000;
9  int r_mid = 1520; //valor medio de la radio
10 float a1 = 0;
11 void setup() {
12   Serial.begin(115200);
13   pinMode(in1,OUTPUT);
14   pinMode(in2,OUTPUT);
15   pinMode(en,OUTPUT);
16   pinMode(stby,OUTPUT);
17   attachInterrupt(0, rising, RISING);//pin 2
18 }
19 //1515 - 1530 cero, 1100 min, 1944 max
20 void loop() {
21
22   if(pwm_value>900 & pwm_value<2000) {
23     digitalWrite(stby,HIGH);
24     //Serial.println(pwm_value);
25
26     if(pwm_value < 1505){
27       digitalWrite(in1,HIGH);
28       digitalWrite(in2,LOW);
29       Serial.println("Dir 1");

```

```
30     }
31     else if(pwm_value > 1530) {
32         digitalWrite(in1, LOW);
33         digitalWrite(in2, HIGH);
34         Serial.println("Dir 2");
35     }
36     else{
37         digitalWrite(in1, LOW);
38         digitalWrite(in2, LOW);
39     }
40     a1 = abs(255);
41     analogWrite(en, (int)a1);
42
43 }
44 else{
45     digitalWrite(in1, LOW);
46     digitalWrite(in2, LOW);
47     digitalWrite(en, LOW);
48     Serial.println("Apagado");
49     digitalWrite(stby, LOW);
50 }}
51
52 void rising() {
53     attachInterrupt(0, falling, FALLING);
54     prev_time = micros();
55 }
56
57 void falling() {
58     attachInterrupt(0, rising, RISING);
59     pwm_value = micros()-prev_time;
60     Serial.println(pwm_value);
61 }
```

Código de regresión

Se trabajó un script en Octave, el cual es capaz de funcionar también en MatLab, este consta de una función la cual realiza la regresión a la forma de Planck, y el archivo general que ejecuta esta función y a su vez realiza la regresión polinomial. Este programa es capaz de realizar cualquier regresión usando el método de Gauss-Newton, para este caso específico se usó una ecuación con la forma de Planck.

```

1 function [P, R, Sr] = GNregression(func, xdata, ydata,p,maxIter)
2
3 syms nd p1 p2
4
5 y = matlabFunction(func);
6 j= jacobian(func,[p1,p2]);
7 j_f = matlabFunction(j);
8 J = zeros(length(xdata),length(p));
9 Y = zeros(length(ydata),1);
10 Sr = 0;
11 Ss = 0;
12 Smin = [1000000 0];
13 if length(xdata) ~= length(ydata)
14     disp('error: longitud de datos distinta');
15     return;
16 end
17
18 for i = 1 : maxIter;
19     Sr = 0;
20     for k = 1: length(xdata);
21
22         R(k) = y(xdata(k),p(1),p(2)) - ydata(k);
23         J(k,:) = j_f(xdata(k),p(1),p(2));
24     end
25     r = R';
26     for t = 1:length(R)

```

```

27         Sr = Sr + (R(t))^2;
28     end
29
30     if Sr < Smin(1)
31         Smin = [Sr,i];
32     end
33
34     if Ss == Sr
35         break;
36     else
37         Ss = Sr;
38     end
39     pk = (J'*J)^-1 * (J'*(-r));
40     p = p + pk';
41
42 end
43 disp('rss:')
44 rss = rssq(R)
45 t = linspace(xdata(1),xdata(length(xdata)));
46 Y =y(t,p(1),p(2)) ;
47 plot(xdata,ydata,'rx',t,Y,'b')
48 title('Regresion para la ecuación de Plank');
49 grid on
50 grid minor
51 disp('Residuos:')
52 for h=1:length(R)
53     disp(R(h))
54 end
55 disp('Mínimo cuadrático:')
56 Smin
57 disp('Coeficientes:')
58 p

```

El programa de prueba sirve para ejecutar la función anterior, y realizar la regresión polinomial a través de los comandos del software.

```

1
2 syms nd p1 p2
3
4 x = [30608 32028.6666700000 32256.3333300000 33908
5      35471.3333300000 36161.3333300000 37962.3333300000
6      38836.3333300000 39712 41069.3333300000 43137 43891.6666700000
7      44523 46234.3333300000 48100 48735.6666700000 51506.3333300000];
8
9 Yk = Y + 273.5; %en Kelvin para Planck
10 Y = Y';
11 Yk = Yk';
12 ordenPx = 4;
13 format long
14 GNregression(1308.35./log(p1./(nd - p2) +1), X, Yk,[1000
15              1000],50)
16 pl = polyfit(X,Y,ordenPx)
17 tp = linspace(X(1),X(length(X)));
18 Yp = polyval(pl,tp) ;
19 figure
20 plot(X,Y, 'bx',tp,Yp, 'r')
21 title(['Regresión para un polinomio de orden ',num2str(ordenPx), '
22         .']]);
23 grid on
24
25 grid minor
26
27 format short
28

```

Librería para el reconocimiento de números y procesamiento de Imágenes

Se presenta la librería de reconocimiento de números que se desarrolló escrita en Python.

```

1 import numpy as np
2 import cv2
3 import math as mt
4
5 # plantillas 0 al 9
6 digitos=[
7  [[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1],
8   [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
9   [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
10  [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
11  [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
12  [0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0],
13  [0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
14  [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
15  [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0],
16  [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0],
17  [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0],
18  [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],
19  [0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0],
20  [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
21  [1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1]],
22
23  [[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
24   [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
25   [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
26   [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
27   [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
28   [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
29   [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
30   [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],

```

```

31 [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
32 [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
33 [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
34 [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
35 [1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],
36 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
37 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]],
38
39 [[1, 1, ...],[]]
40
41 ]
42
43 pos_pix={0:(0,11), 1:(12,23),
44          2:(24,35),3:(36,47),4:(48,59),5:(72,83),6:(84,95)
45          ,7:(96,107),8:(108,119),9:(120,131)}
46
47 def extrae_numeros(img):
48     numero1 = 0
49     numero2 = 0
50     img2 = img[413:428 , 525:656]
51     th1 = img2
52     for i in pos_pix:
53         p = 0
54         j,k = pos_pix[i]
55         im = th1[0:15 , j:k]
56         im = cv2.cvtColor(im, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
57         im_1 = cv2.threshold(im[0:8, 0:5 ], 0,
255,cv2.THRESH_BINARY_INV | cv2.THRESH_OTSU)[1]
58         im_2 = cv2.threshold(im[0:8 , 5:11], 0,
59 255,cv2.THRESH_BINARY_INV | cv2.THRESH_OTSU)[1]
60         im_3 = cv2.threshold(im[8:15, 0:5], 0,
255,cv2.THRESH_BINARY_INV | cv2.THRESH_OTSU)[1]
61         im_4 = cv2.threshold(im[8:15, 5:11], 0,
62 255,cv2.THRESH_BINARY_INV | cv2.THRESH_OTSU)[1]
63
64         imgg = im

```

```

65         imgg[0:8, 0:5 ]=im_1
66         imgg[0:8 , 5:11]=im_2
67         imgg[8:15, 0:5]=im_3
68         imgg[8:15, 5:11]=im_4
69         im = imgg
70         a=cv2.split(im)
71
72         for p in range(10):
73             m =np.array(digitos[p],dtype=np.uint8)
74             m=cv2.bitwise_not(m*255) #los unos indican en
75 numero,se escala de 0-1 a 0-255
76             n=np.array(a,dtype=np.uint8)
77
78             w = np.logical_xor(n,m)
79             unos = (w).sum()
80             unos = unos / 165
81             if unos < 0.18 :
82                 valor = p
83                 if i < 5 :
84                     numero1 += (valor * (10 ** (4 - i)))
85                 else :
86                     numero2 += (valor * (10 ** (9 - i)))
87                 break
88         return numero1, numero2
89
90
91 def agrega_temperatura(img,tmin,tmax, Ec, em, Ta, Corr,dist):
92     d = float(dist)
93     E = float(em)
94     tAmb = float(Ta)
95     if Ec == 0 :
96         a = 1.089247464*(10**-16)*tmin**4 - 1.148710973*(10**-
97 11)*tmin**3 + 1.269505043*(10**-7)*tmin**2 + 2.470194145*(10**-
98 2)*tmin - 640.9709413

```

```

99         b = 1.089247464*(10**-16)*tmax**4 - 1.148710973*(10**-
100 11)*tmax**3 + 1.269505043*(10**-7)*tmax**2 + 2.470194145*(10**-
2)*tmax - 640.9709413
101
102     elif Ec == 1 :
103         a = (1308.45/(mt.log(4.59064950609725*(10**5)/(tmin -
104 0.267584022320203*10**5) + 1.0 )))-273.15
105         b = (1308.45/(mt.log(4.59064950609725*(10**5)/(tmax -
0.267584022320203*10**5) + 1.0 )))-273.15
106
107     if Corr :
108         if(d>10):
109             err = 1.762026991*(10**-9)*d**3 - 6.324618148*(10**-
110 6)*d**2 + 1.826922911*(10**-2)*d + 1.443509426
111         else:
112             err = 0
113
114         a = (a*0.96) + (0.04*22)
115         b = (b*0.96) + (0.04*22)
116         a = (a - ((1-E)*tAmb))/E
117         b = (b - ((1-E)*tAmb))/E + err
118     if( a>500 or a < -80):
119         a = "--"
120     else:
121         a=str('%.3f'%(a))
122
123     if( b>500 or b < -80):
124         b = "--"
125     else :
126         b=str('%.3f'%(b))
127
128
129     font = cv2.FONT_HERSHEY_DUPLEX
130     img = cv2.putText(img,'min: ',(10,20), font,
0.5,(200,255,155),1,cv2.LINE_AA)
131
132

```

```

133     img = cv2.putText(img, 'max: ', (10,40), font,
134 0.5, (200,255,155), 1, cv2.LINE_AA)
135     img = cv2.putText(img, a, (50,20), font,
136 0.5, (200,255,155), 1, cv2.LINE_AA)
137     img = cv2.putText(img, b, (50,40), font,
138 0.5, (200,255,155), 1, cv2.LINE_AA)
139
140     return img,a,b
141
142 def recortaImagen(img):
143     im=img.copy()
144     im = cv2.circle(im, (648,48), 17, (0,0,0), -1)
145     return im[0:392,:]
146 def pixel_Temp(img,imgP, tmin, tmax, x, y, Ec, em, ta):
147     E = float(em)
148     tAmb = float(ta)
149     try:
150         t_min = float(tmin)
151         t_max = float(tmax)
152     except ValueError:
153         print("Error de temperatura")
154         t_min = 0.0
155         t_max = 0.0
156
157     mn = np.amin(imgP[:, :, 0])
158     mx = np.amax(img[:, :, 0])
159     print("límites:", mn, mx)
160
161     p = (float(img[y,x,0]) + float(img[y,x,1]) +
162 float(img[y,x,2]))/3
163     print("Valor pixel:", img[y,x,0], img[y,x,1], img[y,x,2])
164     tp = ((p-mn)/(mx-mn))
165     tp = tp*(t_max - t_min)+t_min
166     return tp

```

```

167
168
169 def cursor(img,x,y):
170     img = cv2.circle(img,(x,y), 2, (250,210,1), 2)
171     return img
172
173 def punto_caliente(img):
174     mn,mx,mnLoc,mxLoc = cv2.minMaxLoc(img[:, :, 0])
175     top = (mxLoc[0]-5,mxLoc[1]-5)
176     bot = (mxLoc[0]+5, mxLoc[1]+5)
177     try:
178         im = cv2.rectangle(img,top,bot, (0,255,255),2)
179     except:
180         im=img
181     return im
182
183
184
185

```

Software desarrollado para procesar y visualizar de vídeos térmicos

El software presenta una jerarquía respecto a sus layouts para poder darle forma a la ventana que sirve para visualizar las imágenes e ingresar algunos parámetros de los objetos observados y del ambiente. La Figura 55 presenta la jerarquía de forma visual, señalando la pertenencia de cada uno. El diseño principal esta dado por el layout1. El código del aplicativo, también elaborado en Python se presenta a continuación:

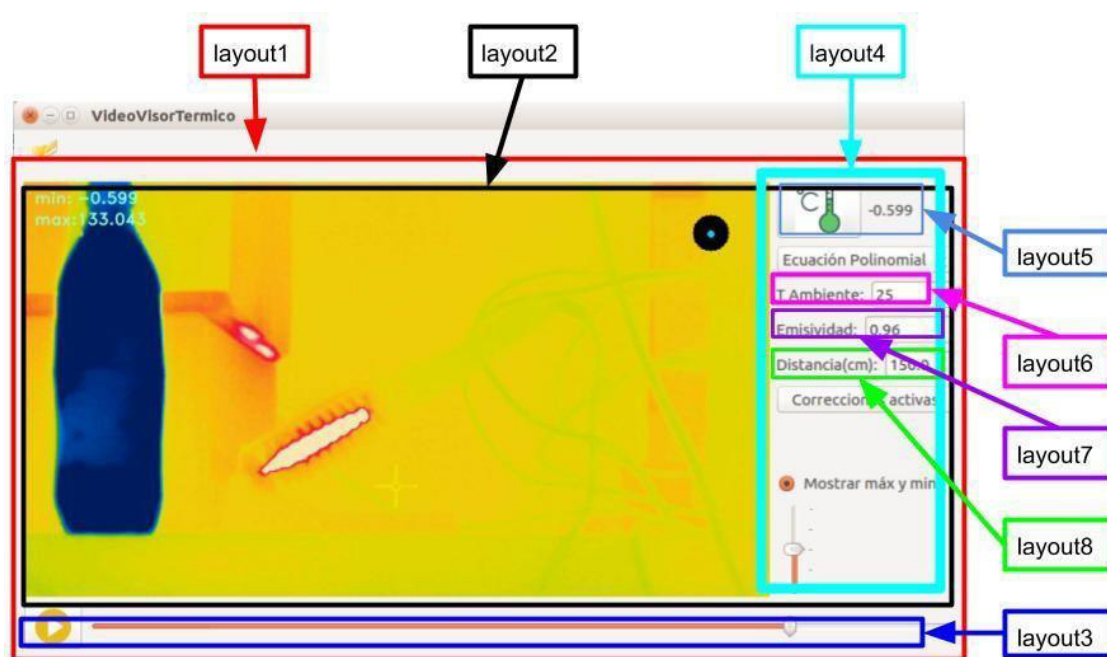


Figura 55. Jerarquía en el diseño del programa. Fuente: Elaboración propia.

```

from PyQt4.QtCore import *
from PyQt4.QtGui import *
import sys
import num_recog as nr
import cv2
import numpy as np
import os
import math as mt

path=""
pp = False
barra = 0
nframes = 0
count = 0

class Ventana(QMainWindow):

    def __init__(self,parent=None):

```

```

super(Ventana, self).__init__(parent)

self.setWindowTitle("Visor Termico")


tb = QMainWindow.addToolBar(self, "File")

self.abrir = QAction(QIcon("open.ico"), "abrir", self)
tb.addAction(self.abrir)
tb.actionTriggered[QAction].connect(self.abrirPath)


self.mywid = MainWidget(self)
self.setCentralWidget(self.mywid)


def abrirPath(self):
    self.fvideo = QFileDialog.getOpenFileName(self, 'Abrir
Video', 'C:\\', "Video files (*.avi)")
    path = os.path.normpath(self.fvideo)
    path = self.fvideo
    print(path, type(path))
    self.mywid.getVideo(path)


class MainWidget(QWidget):

    def __init__(self, parent):

        super(MainWidget, self).__init__(parent)

        self.pr = False
        self.q = 1
        self.tym = 80
        valueChanged = pyqtSignal(object)
        self.layout1 = QVBoxLayout(self)
        self.layout2 = QHBoxLayout(self)
        self.layout3 = QHBoxLayout(self)
        self.layout4 = QVBoxLayout(self)
        self.layout5 = QHBoxLayout(self)


        self.layout6 = QHBoxLayout(self)

```

```

self.layout7 = QHBoxLayout(self)
self.layout8 = QHBoxLayout(self)
self.temp = QPushButton()
self.temp.setIcon(QIcon(QPixmap(("thm.png"))))
self.temp.setIconSize(QSize(44,44))

self.tA = 0
self.tB = 0
self.T = QLabel("      ")

self.TambText = QLabel(self)
self.TambText.setText('T Ambiente:')
self.T_amb_in = QLineEdit(self)
self.T_amb_in.setText("25")

self.EmText = QLabel(self)
self.EmText.setText('Emisividad:')
self.Emi_in = QLineEdit(self)
self.Emi_in.setText("0.96")

self.Dist = QLabel(self)
self.Dist.setText('Distancia(cm):')
self.Dist_in = QLineEdit(self)
self.Dist_in.setText("100.0")

self.Reg = QComboBox()
self.Reg.addItem(['Ecuación Polinomial','Ecuación Plank'])

self.img = QLabel()
self.im = QImage(704,480,QImage.Format_RGB888)

```

```

self.br=QRadioButton("Mostrar máx y min")
self.br.setChecked(True)

self.cr = QPushButton()
self.cr.setText("Correcciones activas")

self.speed=QSlider(Qt.Vertical)
self.speed.setMinimum(0)
self.speed.setMaximum(160)
self.speed.setValue(80)

self.speed.setTickPosition(QSlider.TicksBelow)
self.speed.setTickInterval(40)
self.speed.valueChanged.connect(self.velVideo)
self.x = 0
self.y = 0

self.nroEcuacion = 0;
self.Reg.currentIndexChanged.connect(self.selEcuacion)

self.mostrarMinMax = True
self.p = QPushButton(self)
self.sp = QSlider(Qt.Horizontal)

self.p.setCheckable(True)
self.p.toggle()

self.temp.clicked.connect(self.addPunto)
self.p.clicked.connect(self.playVideo)
self.sp.valueChanged.connect(self.slider)

self.cr.clicked.connect(self.correcciones)

```

```
self.layout2.addWidget(self.img)

self.layout5.addWidget(self.temp)
self.layout5.addWidget(self.T)

self.layout6.addWidget(self.TambText)
self.layout6.addWidget(self.T_amb_in)

self.layout7.addWidget(self.EmText)
self.layout7.addWidget(self.Emi_in)

self.layout8.addWidget(self.Dist)
self.layout8.addWidget(self.Dist_in)

self.layout4.addLayout(self.layout5)
self.layout4.addWidget(self.Reg)
self.layout4.addLayout(self.layout6)
self.layout4.addLayout(self.layout7)
self.layout4.addLayout(self.layout8)
self.layout4.addWidget(self.cr)
self.layout4.addStretch()
self.layout4.addWidget(self.br)
self.layout4.addWidget(self.speed)
self.layout2.addLayout(self.layout4)

self.layout3.addWidget(self.p)
self.layout3.addWidget(self.sp)

self.layout1.addLayout(self.layout2)
self.layout1.addLayout(self.layout3)

self.setLayout(self.layout1)
```

```

self._timer = QTimer(self)
self._timer.timeout.connect(self.setframes)

def getVideo(self, path):
    global nframes
    self.vid = cv2.VideoCapture(path)
    nframes = self.vid.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT)
    print(nframes)
    self.sp.setMinimum(0)
    self.sp.setMaximum(nframes)

def velVideo(self):
    if self._timer.isActive():
        self._timer.stop()
        self.tym = mt.fabs(self.speed.value() - 160)
        print("intervalo", self.tym)
        self._timer.start(self.tym)
    else:
        self.tym = mt.fabs(self.speed.value() - 160)
        print("interval", self.tym)

def playVideo(self):
    global pp

    if pp :
        pp = False
        self._timer.start(self.tym)
        self.p.setIcon(QIcon("pause.png"))
        self.p.setIconSize(QSize(34, 34))

```

```

    else:
        pp = True
        self._timer.stop()
        self.p.setIcon(QIcon("play.png"))
        self.p.setIconSize(QSize(34,34))
    print(pp)

def addPunto(self):
    if self.pr:
        self.pr = False
    else:
        self.pr = True

def correcciones(self):
    if self.q:
        self.q = False
        self.cr.setText("correcciones desactivadas")
    else:
        self.q = True
        self.cr.setText("correcciones activadas")

def selEcuacion(self,k):
    self.nroEcuacion = k
    if k :
        print("Ecuación de Plank") #igual a 1
    else :
        print("Ecuación Polinomial") #igual a 0

def slider(self):
    global count
    if self.sp.value() == count :
        pass
    else :
        count = self.sp.value()
        self.sp.setValue(count)

```

```

def setframes(self):
    global nframes
    global count
    count += 1
    self.vid.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, count)
    self.ret, self.frame = self.vid.read()
    self.f = nr.recortaImagen(self.frame)
    self.minT, self.maxT = nr.extrae_numeros(self.frame)
    print("valores:", self.minT, self.maxT, self.x, self.y)
    if self.pr:
        self.f = nr.punto_caliente(self.f)

    self.T.setText(
str('%.3f'%(nr.pixel_Temp(self.f, self.frame, self.tA, self.tB,
self.x,
self.y, self.nroEcuacion, self.Emi_in.text(), self.T_amb_in.text()))))

    if self.br.isChecked():
        self.f, self.tA, self.tB = nr.agrega_temperatura(self.f,
self.minT, self.maxT, self.nroEcuacion,
self.Emi_in.text(), self.T_amb_in.text(), self.q, self.Dist_in.text())

    self.f = nr.cursor(self.f, self.x, self.y)
    self.f = cv2.cvtColor(self.f, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    self.im = QImage(self.f, self.f.shape[1], self.f.shape[0],
QImage.Format_RGB888)
    self.pix = QPixmap.fromImage(self.im)

    self.img.setScaledContents(True);
    self.img.setPixmap(self.pix)

    self.img.setObjectName("img")
    self.img.mousePressEvent = self.getPos #no lleva parentesis
- evento

```

```

        self.sp.setValue(count)

        if count >= nframes-1 :
            count = 0

            self._timer.stop()

            self.vid.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, count)

def getPos(self , event):
    self.x = event.pos().x()
    self.y = event.pos().y()
    print (self.x, self.y)

def main():
    app = QApplication(sys.argv)
    win = Ventana()
    win.setGeometry(100,100,500,500)
    win.setWindowTitle("VideoVisorTermico")
    win.show()
    app.exec_()

if __name__ == "__main__" :

    sys.exit(main())

```

Anexo D

Planos de las piezas fabricadas

En las siguientes páginas se muestran los planos de las piezas fabricadas para este proyecto, no se incluyeron los modelos 3D que se realizaron a algunos componentes como la cámara y motores. El material del cuerpo negro es MDF de 3mm de espesor. Las piezas realizadas en impresión 3D en algunos casos requirieron adhesión mediante pegamento, esto fue realizado usando pegamento instantáneo de Ciano-acrilato.



Figura 56. Captura de las primeras pruebas realizadas, con temperatura a 190°C.
Fuente: Elaboración propia.

Para las piezas de MDF se usó pegamento de resina SOLDIMIX, ya que tiene una mejor resistencia a las altas temperaturas que otros pegamentos de madera. Las primeras pruebas para observar los límites de temperatura que puede detectar la cámara requirieron elevar la temperatura cerca a los 200 °C, así como se observa en la Figura 56.

