



UNIVERSIDAD PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACSISTEL

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Implementación de un Método de Análisis Térmico en Películas
Agrícolas de Polietileno utilizando el Microprocesador Raspberry Pi 3
para Medir Transiciones Térmicas Endotérmicas y Exotérmicas**

Ariel Alexander Gonzalez Gonzalez

Dirigido por:
Ing. Sendey Agustín Vera Gonzalez, MACI

La Libertad - 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi padre, Wilmer Gonzalez quien se esforzó tanto para que no me faltara nada y fue un hombre comprometido y un gran ejemplo a seguir para sus hijos. A mi madre Lourdes Tumbaco que ha estado en todo momento y a mis hermanos que me apoyaron en todo lo que necesite le dedico este trabajo con mucho esfuerzo. Extiendo esta dedicatoria a mis abuelos en especial a mi abuela América Gonzalez que a pesar que ya no este en este mundo su recuerdo estará siempre presente en mi corazón y sé que ella estaría muy orgullosa por lo que hoy he logrado, este logro es también para cado uno de mis compañeros que me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria les agradezco mucho por el apoyo que me brindaron en todo momento.

Ariel Alexander Gonzalez Gonzalez

AGRADECIMIENTO

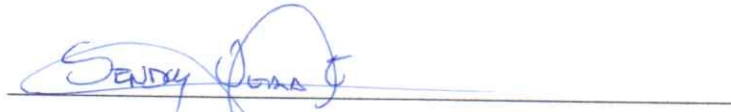
Agradezco, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía en cada decisión a lo largo de mi carrera universitaria, por iluminar mi camino y permitirme estudiar una profesión que me ha brindado experiencias y conocimientos fundamentales para mi formación. A mi familia, por acompañarme incondicionalmente en cada etapa de este recorrido. De manera especial, a mis padres Wilmer González y Lourdes Tumbaco por su apoyo constante, sus consejos y por impulsarme a seguir adelante con determinación. A mis hermanos, cuyo respaldo inquebrantable hizo posible este logro. Les estoy profundamente agradecido.

Extiendo mi gratitud a mis amigos y compañeros, que estuvieron presentes durante esta etapa. Juntos compartimos momentos de alegría, desafíos y aprendizajes que marcaron mi vida universitaria. Valoro profundamente su amistad y el compañerismo que demostraron en cada paso del camino. A mi tutor de tesis, Ing. Sendey Vera, por su orientación, disponibilidad y paciencia a lo largo de la elaboración de este proyecto. Le agradezco por compartir sus conocimientos y acompañarme en este importante desafío académico. Finalmente, a todos los ingenieros que contribuyeron a mi formación, por transmitir sus saberes con vocación, inspirarnos a superar obstáculos y motivarnos a perseverar en la búsqueda de nuestras metas.

Ariel Alexander Gonzalez Gonzalez

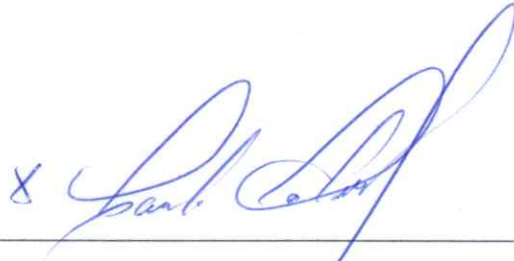
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación denominado: **“Implementación de un Método de Análisis Térmico en Películas Agrícolas de Polietileno utilizando el Microprocesador Raspberry Pi 3 para Medir Transiciones Térmicas Endotérmicas y Exotérmicas”**, elaborado por el estudiante **Ariel Alexander Gonzalez Gonzalez**, de la carrera de **Ingeniería en Electrónica y Automatización** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, declaro que luego de haber orientado, estudiado y revisado, lo apruebo en todas sus partes y autorizo al estudiante que inicie los trámites legales correspondientes.



Ing. Sendey Agustin Vera Gonzalez, M.Sc.
Tutor

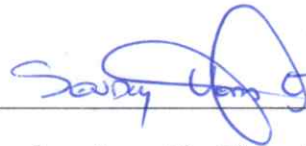
TRIBUNAL DE GRADO



**Ing. Ronald Humberto Rovira Jurado, Ph.D.
DIRECTOR DE CARRERA**



**Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.
DOCENTE ESPECIALISTA**



**Ing. Sendey Agustín Vera Gonzalez, Mgtr.
TUTOR**



**Ing. Luis Enrique Chuquimarca Jiménez, Mgtr.
DOCENTE GUÍA UIC**



**Ing. Corina Gonzabay De La A, Mgtr.
SECRETARIA DEL TRIBUNAL**

DECLARACIÓN

Declaro que el contenido presente trabajo de titulación es de mi absoluta responsabilidad, y que los derechos intelectuales del mismo pertenecen a la Universidad Estatal Península de Santa Elena.



Ariel Alexander Gonzalez Gonzalez
Autor

Resumen

Este trabajo implementó con éxito un sistema de análisis térmico basado en Raspberry Pi 3 para caracterizar el comportamiento de películas agrícolas de polietileno bajo distintas condiciones de humedad. La plataforma desarrollada integró sensores infrarrojos y una cámara termográfica, empleando el protocolo MQTT para la transmisión de datos a la nube y su posterior visualización en tiempo real mediante Grafana. Mediante la aplicación de ciclos térmicos controlados que incluyeron fases de línea base, calentamiento y enfriamiento se evaluó la respuesta del material ante un estrés térmico repetitivo. Los resultados obtenidos revelaron que la presencia de agua ejerce un efecto regulador significativo: en condición húmeda, las temperaturas máximas disminuyeron en un 7.6% y la velocidad de calentamiento se redujo en un 10%, en comparación con la condición seca. El análisis de confiabilidad mediante el modelo de Weibull corroboró un aumento del 32.3% en la vida útil del material hidratado, reflejado en una vida característica (η) de 19.14 ciclos, frente a los 14.47 ciclos registrados en condición seca. El sistema demostró ser una herramienta confiable y de bajo costo para la caracterización térmica de polímeros, permitiendo un monitoreo preciso de su degradación. Como conclusión principal, se establece que la hidratación controlada constituye una estrategia efectiva para prolongar la vida útil de las cubiertas de polietileno en ambientes agrícolas, ofreciendo así una alternativa viable para la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Palabras clave: Análisis térmico, Polietileno agrícola, Transiciones térmicas, Degradación de polímeros, Vida útil de materiales.

Abstract

This work successfully implemented a Raspberry Pi 3-based thermal analysis system to characterize the behavior of agricultural polyethylene films under different humidity conditions. The developed platform integrated infrared sensors and a thermographic camera, using the MQTT protocol for transmitting data to the cloud and enabling real-time visualization through Grafana. By applying controlled thermal cycles including baseline, heating, and cooling phases the material's response to repetitive thermal stress was evaluated. The results revealed that the presence of water exerts a significant regulating effect: under humid conditions, maximum temperatures decreased by 7.6% and the heating rate was reduced by 10% compared to the dry condition. Reliability analysis using the Weibull model confirmed a 32.3% increase in the lifespan of the hydrated material, reflected in a characteristic life (η) of 19.14 cycles, compared to 14.47 cycles in dry conditions. The system proved to be a reliable and low-cost tool for the thermal characterization of polymers, allowing precise monitoring of their degradation. As the main conclusion, controlled hydration is established as an effective strategy for prolonging the service life of polyethylene coverings in agricultural environments, offering a viable alternative for the sustainability of production systems.

Keywords: Thermal analysis, Agricultural polyethylene, Thermal transitions, Polymer degradation, Material lifespan.

Índice

Índice de figuras	7
Índice de cuadros	11
1. Introducción	12
1.1. Justificación	13
1.2. Panorama Actual	14
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo General	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. Fundamentos teóricos	17
1.4.1. Sistemas de análisis térmico	17
1.4.2. Propiedades térmicas del polietileno	17
1.4.3. Degradación del polietileno en condiciones ambientales	18
1.4.4. Velocidad de calentamiento en la degradación de materiales plásticos	19
1.4.5. Transiciones térmicas	20
1.4.6. Transiciones endotérmicas	20
1.4.7. Transiciones exotérmicas	22
1.4.8. Ley de Fourier para la transferencia de calor por conducción	23
1.4.9. Películas agrícolas de polietileno	24
1.4.10. Tipos de películas agrícolas	24
1.4.10.1. Películas para invernaderos	25
1.4.10.2. Película mulching o acolchado	25
1.4.11. Termografía	26
1.4.12. Cámaras termográficas	28
1.4.13. Mecanismo de detección en microbolómetros	29
1.4.14. Parámetros ópticos en termografía	30
1.4.15. Emisividad térmica	30
1.4.16. Principio de funcionamiento de la termopila	32
1.4.17. Procesamiento digital de imágenes	33
1.4.18. Métodos de interpolación clásicos	34
1.4.19. Microordenador raspberry pi	36
1.4.20. Protocolos de comunicación	37
1.4.21. Bases de datos	39
1.4.22. Modelo predictivo de Weibull	39
1.4.23. Interfaz gráfica	42
1.5. Marco contextual	43

2. Métodos y diseño experimental	45
2.1. Métodos	45
2.1.1. Descripción del proyecto	46
2.2. Componentes de la propuesta	47
2.2.1. Componentes físicos	47
2.2.1.1. Polietileno negro calibre 600	48
2.2.1.2. Cámara térmica UWEI	49
2.2.1.3. Sensor infrarrojo MLX90614	50
2.2.1.4. Raspberry pi 3	51
2.2.1.5. Relay JQC-21FF SPDT	52
2.2.1.6. Diodo 1N4007	53
2.2.1.7. Convertidor DC-DC LM2596	54
2.2.1.8. Batería lipo – tattü	55
2.2.2. Componentes lógicos	56
2.2.2.1. Entorno de desarrollo en raspberry Pi	56
2.2.2.2. Librería adafruit MLX90614	58
2.2.2.3. Librería paho.mqtt.client	59
2.2.2.4. Librería Numpy	59
2.2.2.5. Librería PyQt5	60
2.2.3. Herramientas y protocolos del sistema	61
2.2.3.1. MySQL	61
2.2.3.2. PhpMyAdmin	63
2.2.3.3. Clever cloud	64
2.2.3.4. VNC viewer	64
2.2.3.5. SSH	65
2.2.4. Plataforma de monitoreo	65
2.2.5. Diseño estructural del sistema experimental térmico	66
2.2.6. Diseño del sistema portátil de monitoreo térmico	68
2.2.7. Diseño electrónico del sistema de medición	70
2.2.8. Diseño del sistema de comunicación	73
2.2.8.1. Algoritmo de programación del publicador del sensor	74
2.2.8.2. Algoritmo del publicador cámara termográfica	76
2.2.8.3. Algoritmo de programación del suscriptor MQTT del sistema	77
2.2.9. Diseño de la interfaz gráfica del sistema	78
2.2.9.1. Acceso a Clever Cloud console	78
2.2.9.2. Creación del servicio de base de datos MySQL en Clever Cloud	79
2.2.9.3. Definición de campos y relaciones en las tablas de datos	81

2.2.10. Diseño de la interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos térmicos	83
2.3. Desarrollo experimental	84
2.3.1. Implementación del sistema de análisis térmico	84
2.3.2. Implementación y configuración del sistema de comunicación	85
2.3.2.1. Configuración del broker MQTT	85
2.3.2.2. Conexión de la base de datos del suscriptor MQTT	87
2.3.2.3. Lógica de detección de fases térmicas	87
2.3.2.4. Detección de reacciones endotérmicas	88
2.3.2.5. Detección de reacciones exotérmicas	89
2.3.2.6. Procesamiento de imágenes térmicas	90
2.3.3. Implementación de la interfaz para el monitoreo y adquisición de datos del sistema	91
2.3.3.1. Pantalla principal del sensor infrarrojo	92
2.3.3.2. Pantalla de procesamiento de imágenes térmicas	93
2.3.3.3. Pantalla del suscriptor del sistema MQTT	94
2.3.4. Configuración de la interfaz en Grafana	95
2.3.4.1. Accesibilidad remota	96
2.3.4.2. Conexión de Grafana con la base de datos en Clever Cloud	96
2.3.4.3. Creación de paneles y dashboards	99
3. Resultados	100
3.1. Validación del sistema de registro de datos	100
3.2. Prueba de clasificación de eventos térmicos	104
3.3. Comparación del comportamiento térmico en condiciones secas y húmedas	106
3.4. Evaluación de la degradación térmica acumulativa de la temperatura máxima por ciclo	110
3.5. Evolución de la velocidad de calentamiento como métrica de degradación	111
3.6. Evaluación del modelo predictivo de la vida útil mediante análisis de Weibull	114
3.7. Graficas resultantes del modelo de Weibull	116
3.7.0.1. Función de densidad de probabilidad	117
3.7.0.2. Función de confiabilidad	117
3.7.0.3. Análisis de fallo mediante la función de riesgo	117
3.7.0.4. Gráfica de probabilidad de Weibull	118

4. Conclusiones y recomendaciones	118
4.1. Conclusiones	118
4.2. Recomendaciones	120

Índice de figuras

1.	Sistema de medición de análisis térmico. Fuente: [11]	17
2.	Curvas de degradación de los plásticos. Fuente: [13]	19
3.	Curvas de calentamiento y enfriamiento del HDPE obtenidas mediante DSC a diferentes velocidades de calentamiento. Fuente: [14]	20
4.	Ejemplo de proceso endotérmico durante la fusión del hielo. Fuente: [16]	21
5.	Curva DSC de una transición endotérmica típica en polímeros. Fuente: [16]	22
6.	Caracterización de transiciones exotérmicas en materiales. Fuente: [17]	22
7.	Termograma DSC de un polímero transiciones exotérmicas. Fuente: [17]	23
8.	Uso de cubierta plástica para la creación de microclima en invernadero. Fuente: [20]	25
9.	Aplicación de película de acolchado (mulching) en cultivo. Fuente: [21]	26
10.	Funcionamiento básico de un detector de microbolómetro. Fuente: [30]	29
11.	Representación de la correlación entre FOV y distancia focal. Fuente: [32]	30
12.	Representación esquemática de los componentes de la radiación térmica detectada por un sensor infrarrojo. Fuente: [33]	31
13.	Funcionamiento de un sensor infrarrojo de termopila. Fuente: [35]	33
14.	Flujo de procesamiento digital de imágenes. Fuente: [36]	34
15.	Estimaciones de una interpolación lineal según el número de muestras. Fuente: [37]	35
16.	Distribución de pines GPIO y funciones alternativas del microordenador Raspberry Pi 3B. Fuente: [39]	37
17.	Esquema de conexión del protocolo I2C. Fuente: [41]	38
18.	Protocolo de Comunicación MQTT. Fuente: [42]	38
19.	Esquema general de la estructura de una Base de Datos. Fuente: [43]	39
20.	Funciones de probabilidad para diferentes valores de k con $\lambda = 1$: (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de distribución acumulada. Fuente: [45]	41
21.	Esquema general de comunicación de una interfaz gráfica. Fuente: [46]	42
22.	Esquema del sistema de análisis térmico. Fuente: Autoría Propia	47
23.	Polietileno negro calibre 600. Fuente: [47]	48
24.	Cámara térmica UWEI. Fuente: [48]	49
25.	Sensor infrarrojo MLX90614. Fuente: [49]	50
26.	Controlador raspberry pi 3 modelo B. Fuente: [50]	51
27.	Rele JQC-21FF SPDT. Fuente: [51]	52

28. Diodo 1N4007. Fuente: [52]	53
29. Modulo LM2596. Fuente: [53]	54
30. Batería lipo – tatttu. Fuente: [54]	55
31. Distribución de los componentes principales del IDE Thonny. Fuente: Autoría Propia	57
32. Tipos de arreglos en 1D, 2D y 3D: [58]	60
33. Estructura general del sistema de gestión de bases de datos MySQL. Fuente: [60]	61
34. Interfaz PhpMyADMIN. Fuente: Autoría Propia [61]	63
35. Software Clever Cloud. Fuente: [62]	64
36. Interfaz VNC Viewer. Fuente: [63]	65
37. Protocolo de comunicación SSH. Fuente: [65]	65
38. Software Grafana. Fuente: [65]	66
39. Diseño estructural del sistema de medición térmica de películas de polietileno. Fuente: Autoría Propia	67
40. Configuración geométrica estandarizada de las muestras de polietileno. Fuente: Autoría Propia	68
41. Modelo 3D del prototipo portátil. Fuente: Autoría Propia	69
42. Esquema electrónico del sistema. Fuente: Autoría Propia	70
43. Diseño electrónico de la placa PCB. Fuente: Autoría Propia	71
44. Esquema electrónico del circuito PCB que integra las etapas de alimentación, protección y regulación del sistema. Fuente: Autoría Propia	72
45. Diseño del sistema de comunicación para el envío y almacenamiento de datos. Fuente: Autoría Propia	73
46. Diseño del sistema de adquisición de datos. Fuente: Autoría propia	74
47. Diagrama de flujo del publicador de datos del sensor. [Autoría propia]	75
48. Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes. [Autoría propia]	76
49. Diagrama de flujo del suscriptor MQTT para almacenamiento de datos del sensor IR y cámara térmica. [Autoría propia]	77
50. Selección del tipo de aplicación en la nube. [Autoría propia]	79
51. Selección del servicio de base de datos MySQL en la plataforma Clever Cloud. [Autoría propia]	80
52. Asignación y alojamiento del servicio en la nube en Clever Cloud. [Autoría propia]	80
53. Parametros de conexión de la base de datos. [Autoría propia]	81
54. Estructura de la tabla de datos del sensor. [Autoría propia]	82
55. Estructura de la tabla de datos de la camara. [Autoría propia]	82
56. Diagrama general del diseño de la interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos térmicos. [Autoría propia]	83

57. Estructura implementada para el sistema de análisis térmico. [Autoría propia]	84
58. Diagrama de procesamiento de imágenes de la cámara. [Autoría propia]	91
59. Interfaz principal del sistema de adquisición de datos térmicos. [Autoría propia]	92
60. Interfaz gráfica del sensor para adquisición y visualización de datos térmicos. [Autoría propia]	93
61. Interfaz de procesamiento y visualización de imágenes térmicas. [Autoría propia]	94
62. Interfaz de control del suscriptor MQTT para el envío de datos hacia la nube. [Autoría propia]	95
63. ventana de inicio de sesión de grafana. [Autoría propia]	96
64. Configuración del origen de datos MySQL en Grafana. [Autoría propia]	97
65. Configuración de la consulta SQL para la visualización de datos del sensor infrarrojo MLX90614 en Grafana. [Autoría propia]	98
66. Configuración de la consulta SQL para la representación gráfica de mediciones térmicas obtenidas por la cámara termográfica en Grafana. [Autoría propia]	98
67. Ventana de monitoreo de grafana. [Autoría propia]	99
68. Dashboard de Grafana de las temperaturas durante la validación del sistema. [Autoría propia]	100
69. Segmento de datos crudos almacenados en la base de datos durante la validación del sistema. [Autoría propia]	101
70. Tendencias de temperatura registradas por la cámara termográfica. [Autoría propia]	102
71. Muestra de los datos termográficos almacenados, incluyendo temperaturas máxima, mínima, central y fase del experimento. [Autoría propia]	103
72. Clasificación de estados térmicos. La transición entre categorías es determinada en tiempo real por el algoritmo basado en los umbrales. [Autoría propia]	104
73. Correlación entre la tasa de calentamiento y el diferencial térmico durante un evento térmico. [Autoría propia]	105
74. Comparación de la temperatura del objeto entre el Experimento 2 y el Experimento 3. [Autoría propia]	106
75. Comparación de la temperatura máxima de la cámara. [Autoría propia]	108

76.	Comparación de imágenes termográficas: (a) condición seca, (b) condición húmeda. [Autoría propia]	109
77.	Evolución de la temperatura máxima por ciclo de los cuatro experimentos. [Autoría propia]	110
78.	Tendencias de la velocidad máxima de calentamiento para los experimentos en condición seca. [Autoría propia]	112
79.	Incremento progresivo de la velocidad de calentamiento en condición húmeda. [Autoría propia]	113
80.	Análisis gráfico del modelo de Weibull: (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de confiabilidad, (c) Función de riesgo y (d) Gráfica de probabilidad de Weibull. [Autoría propia]	116

Índice de cuadros

1. Capacidad calorífica específica del polietileno en función de la temperatura	18
2. Propiedades ópticas y geométricas de muestras de polietileno	32
3. Comportamiento del modelo de Weibull en función del parámetro β	40
4. Especificaciones técnicas del material	48
5. Características técnicas de la cámara termográfica	50
6. Características técnicas del sensor MLX90614	51
7. Características técnicas de la raspberry pi 3 model B	52
8. Especificaciones técnicas del relé	53
9. Especificaciones técnicas del diodo	54
10. Especificaciones técnicas del regulador de voltaje	55
11. Especificaciones técnicas de la batería lipo	56
12. Listado de software y librerías para la raspberry pi	58
13. Comandos SQL básicos y sus funciones	62
14. Configuraciones MQTT para los módulos del sistema	86
15. Configuración de la base de datos. [Autoría propia]	87
16. Condiciones para identificación de fases térmicas	87
17. Parámetros para la detección de reacciones endotérmicas	88
18. Parámetros para la detección de reacciones exotérmicas	89
19. Comparación de parámetros entre experimento seco y húmedo	107
20. Comparación de temperaturas de la cámara termográfica entre experimentos.	110
21. Comparativa de Velocidad de Calentamiento de los experimentos realizados	113
22. Ajuste del modelo de Weibull a los datos de fallo en condición húmeda	114
23. Parámetros del modelo de Weibull para la condición de referencia no hidratada	115
24. Listado de Materiales y Costos	128

1. Introducción

En los últimos años, las películas agrícolas de polietileno han adquirido gran relevancia en la producción agrícola por su capacidad para modificar las condiciones microclimáticas y optimizar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la exposición continua a la radiación solar y a condiciones ambientales variables provoca alteraciones térmicas que pueden afectar sus propiedades estructurales y reducir su vida útil. Ante esta situación, resulta necesario desarrollar herramientas que permitan analizar su comportamiento térmico bajo condiciones controladas, con el propósito de mejorar su selección y aplicación en los sistemas agrícolas. El presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema portátil de monitoreo térmico, orientado a la evaluación de películas agrícolas de polietileno sometidas a una fuente de calor y al contacto con agua. El sistema integra una Raspberry Pi como unidad central de control, un sensor infrarrojo para la medición puntual de temperatura y una cámara termográfica destinada al registro visual de la distribución térmica sobre la superficie del material. La propuesta busca ofrecer una alternativa práctica y de bajo costo para el análisis térmico de materiales poliméricos, permitiendo obtener mediciones precisas, continuas y fácilmente transferibles a entornos de campo. Asimismo, el proyecto contempla el diseño estructural, la integración electrónica y la validación experimental del sistema, con el fin de generar información técnica que contribuya al uso eficiente de películas agrícolas y a la optimización de prácticas sostenibles dentro del sector agrícola ecuatoriano.

1.1. Justificación

En Ecuador, el sector agrícola constituye una de las principales fuentes de desarrollo económico y de empleo, especialmente en las regiones de la Costa y la Amazonía. Según la Organización Internacional del Trabajo, alrededor del 29.7 % de la población se dedica a labores relacionadas con la agricultura [1]. Partiendo de esta realidad, no solo se evidencia la relevancia socioeconómica del sector, sino también la necesidad de implementar herramientas que optimicen la productividad y garanticen la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

El uso de películas agrícolas de polietileno, especialmente como “mulch” en coberturas de suelo, se ha expandido considerablemente, ya que este material permite conservar la humedad, regular la temperatura del suelo y ofrecer protección a cultivos de alto valor, como flores, hortalizas y frutas, frente a condiciones climáticas adversas [2]. El impacto positivo de estas coberturas plásticas ha sido comprobado en Ecuador. Según estudios realizados sobre el cultivo de maíz en los Andes, la aplicación de mulch plástico durante temporadas secas no solo aceleró el crecimiento vegetal, sino que también incrementó la resiliencia frente a la sequía [3].

No obstante, a pesar de los múltiples beneficios, las películas agrícolas presentan un problema de desgaste acelerado debido a la exposición prolongada a condiciones ambientales extremas en concreto, el deterioro se explica porque la combinación de radiación ultravioleta (UV) y altas temperaturas genera una pérdida mensual de entre el 5 % y el 10 % en la resistencia a la tracción del material cuando no se incorporan estabilizadores UV adecuados [4]. Producto de esta degradación continua, no solo se reduce considerablemente la vida útil del producto sino que también se incrementan los costos de reposición para los agricultores, dando lugar finalmente a impactos negativos tanto en el entorno productivo como en el ecosistema circundante.

Ante esta situación nace la necesidad de implementar herramientas tecnológicas que permitan monitorear y comprender el comportamiento térmico del polietileno agrícola bajo condiciones reales de uso para abordar este desafío el presente proyecto plantea el diseño e implementación de un sistema portátil de análisis térmico basado en un microordenador Raspberry Pi 3 el cual integrará una cámara termográfica y un sensor infrarrojo. El sistema estará orientado específicamente a la medición de transiciones térmicas endotérmicas y exotérmicas, tanto en condiciones secas como húmedas, con el propósito de simular escenarios comunes en invernaderos y cultivos con riego por aspersión por último los datos obtenidos serán almacenados en un servidor web remoto y posteriormente analizados mediante modelos estadísticos y probabilísticos, todo ello dirigido a identificar patrones térmicos

y predecir el desgaste del material frente a distintos factores ambientales.

Esta propuesta más allá de optimizar los costos operativos del sector agrícola mediante la prolongación de la vida útil de las películas de polietileno busca igualmente promover prácticas sostenibles que mitiguen el impacto ambiental del desecho prematuro de plásticos, en este sentido el proyecto representa una contribución directa al desarrollo tecnológico de la agricultura ecuatoriana debido a que fortalece la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático al mismo tiempo que promueve un uso más eficiente de los recursos en el agro.

1.2. Panorama Actual

El análisis térmico se ha consolidado como una herramienta esencial en la investigación y manufactura de polímeros con una gran relevancia en el estudio de plásticos tales como los de polietileno, dentro de este campo empresas líderes como TA Instruments, Mettler Toledo y PerkinElmer han impulsado avances significativos mediante el desarrollo de equipos de alta precisión, entre los que destacan el calorímetro diferencial de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA). Estas tecnologías resultan ser muy útiles debido a que permiten caracterizar con exactitud las transiciones térmicas de los materiales poliméricos, tanto endotérmicas como exotérmicas constituyendo así un aporte clave para la ciencia de materiales y la industria moderna [5].

Como referente en el sector empresas líderes como TA Instruments han desarrollado equipamiento de alta precisión para caracterizar transiciones térmicas en polímeros, lo que garantiza un comportamiento térmico predecible en materiales como el polietileno bajo diversas condiciones operativas, esto es de mucha importancia en las industrias donde la estabilidad térmica determina el rendimiento material, como lo son la automoción, los empaques y la construcción [6]. En un plano tecnológico Mettler Toledo se ha enfocado en áreas como la automatización y el alto rendimiento de la caracterización polimérica, alcanzando niveles superiores de precisión y eficiencia, estos avances han impactado directamente en campos como los plásticos de ingeniería y los materiales reciclables, donde el control exhaustivo de las propiedades térmicas se ha vuelto indispensable para asegurar estándares de calidad y sostenibilidad [7].

El análisis térmico ha trascendido el ámbito industrial para consolidarse como una herramienta valiosa en aplicaciones ambientales, un ejemplo destacable es la iniciativa de la Melbourne Water Corporation, que en octubre de 2020 implementó en la Planta de Tratamiento Occidental de Werribee (Australia) una novedosa técnica de imagen térmica cuasi-activa. Este procedimiento combinó termografía infrarroja, un piranómetro y la ley de enfriamiento de Newton, logrando detectar con éxito la acumulación de sólidos bajo las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) empleadas en el control de gases y generación de biogás. Las pruebas de laboratorio confirmaron que el método puede identificar tanto deformaciones como acumulaciones sólidas, posicionándolo como una alternativa prometedora para el monitoreo optimizado de infraestructuras ambientales a escala real [8].

En el contexto agrícola las cubiertas plásticas han adquirido un rol estratégico para potenciar la eficiencia de los cultivos, un estudio publicado en marzo de 2018 analizó las ventajas del polietileno de baja densidad (LD-PE) aplicado en invernaderos y acolchados, destacando sus múltiples beneficios: el incremento de la temperatura del aire, la reducción de pérdidas energéticas, la protección ante condiciones climáticas extremas, el control de enfermedades fúngicas y una mejor conservación del agua. Mediante pruebas comparativas bajo la norma ISO 20473 (E) 2007 entre una película nueva y otra con más de cinco años de uso, se demostró que el envejecimiento apenas afecta sus propiedades radiométricas, este hallazgo constituye una referencia valiosa para el diseño de estructuras agrícolas más eficientes y duraderas [9].

En octubre de 2022 un estudio desarrollado en una empresa exportadora de rosas en Ecuador exploró alternativas sostenibles para la gestión de plásticos agrícolas, evaluando el compostaje como criterio de degradación si bien los resultados evidenciaron que el compostaje no produce una degradación significativa del polietileno, sí manifiesta un incremento de la actividad bacteriana y cambios en las propiedades químicas del sustrato sugiriendo que la exposición prolongada a factores ambientales, junto con la radiación solar, podría favorecer procesos de adhesión microbiana y biodegradación parcial del material. A partir de estos resultados, se hace patente la necesidad de desarrollar investigaciones futuras que evalúen tanto la ecotoxicidad como el potencial degradativo de los microorganismos identificados, constituyendo una posible estrategia complementaria para el manejo de residuos plásticos en la agricultura [10].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de análisis térmico basado en Raspberry Pi para evaluar el comportamiento térmico de películas agrícolas de polietileno bajo diferentes condiciones de estrés, mediante la medición de transiciones térmicas y la aplicación de modelos predictivos de vida útil.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de medición térmica que registre las variaciones de temperatura en películas agrícolas de polietileno durante su exposición a la radiación solar, tanto en condiciones secas como en contacto con agua.
- Comparar las mediciones de temperatura obtenidas en las películas agrícolas de polietileno bajo condiciones de exposición directa al sol y en contacto con agua, para evaluar las propiedades térmicas y la capacidad de disipación de calor en cada escenario.
- Desarrollar un sistema de adquisición de datos portátil, basado en una Raspberry Pi 3, que permita recolectar y almacenar la información térmica de manera eficiente en campo y laboratorio.
- Realizar un análisis estadístico de los datos recolectados para identificar patrones de comportamiento térmico en el polietileno agrícola y generar predicciones sobre su desgaste y durabilidad en condiciones específicas, utilizando modelos probabilísticos.

1.4. Fundamentos teóricos

1.4.1. Sistemas de análisis térmico

El análisis térmico es un conjunto de técnicas empleadas para medir propiedades físicas de un material en función de la temperatura, con la finalidad de caracterizar su comportamiento frente a procesos de calentamiento o enfriamiento. En el caso de polímeros como el polietileno de uso agrícola, estas técnicas permiten identificar transiciones térmicas claves tales como el punto de fusión, la cristalización o la degradación lo cual resulta esencial para evaluar la calidad, durabilidad y rendimiento del material en condiciones reales de trabajo. En la Figura 1 se muestra un sistema térmico equipado con una cámara infrarroja para medir la temperatura de materiales plásticos como PE o PP [11].

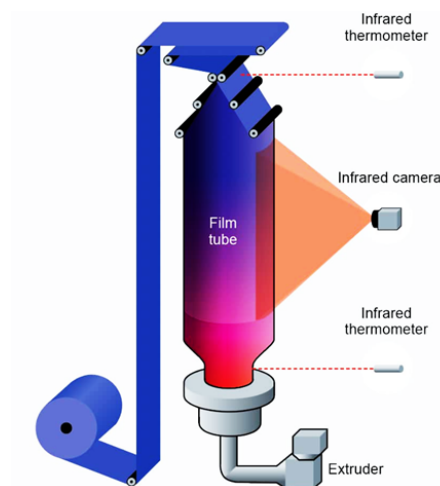


Figura 1: Sistema de medición de análisis térmico. Fuente: [11]

1.4.2. Propiedades térmicas del polietileno

Para interpretar adecuadamente las lecturas de sensores infrarrojos y cámaras termográficas es importante comprender cómo responde el polietileno al calor. Dos propiedades que adquieren especial relevancia son la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica, dado a que gobiernan la forma en que el material distribuye y almacena energía durante las fluctuaciones térmicas.

En el caso del HDPE, mediciones recientes sitúan su conductividad térmica en un rango desde $0,260 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 15 °C hasta $0,296 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 45 °C [12]. Estos valores, que reflejan su marcado carácter aislante, explican por qué resulta posible detectar con claridad variaciones locales de temperatura en su superficie. A esto se suma el comportamiento del calor específico, parámetro que como se aprecia en la Tabla 1 modifica su valor progresivamente con la temperatura, completando así el conjunto de características necesarias para un análisis termofísico riguroso [12].

Tabla 1: Capacidad calorífica específica del polietileno en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico, c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
10	1687
20	1767
30	1857
40	1923

1.4.3. Degradación del polietileno en condiciones ambientales

El polietileno es ampliamente utilizado en el sector agrícola por sus ventajas prácticas enfrenta un desafío constante la exposición continua a factores ambientales como la radiación ultravioleta, el calor, el oxígeno y los agentes biológicos que en conjunto aceleran su degradación entre estos procesos, la fotodegradación o foto-oxidación destaca por su gran impacto, debido a que la acción combinada de la luz UV y el oxígeno desencadena la ruptura de las cadenas poliméricas mediante la formación de radicales libres. Como en consecuencia de esta reacción en cadena, el material pierde resistencia y masa, desarrolla microgrietas y, con el tiempo, se fragmenta en microplásticos. Para poder observar este fenómeno en la Figura 2 se compara las curvas de degradación varían según la presencia o ausencia de aditivos fotocatalíticos lo que refuerza el papel clave de estos compuestos en la estabilidad del polímero frente a la radiación ultravioleta [13].

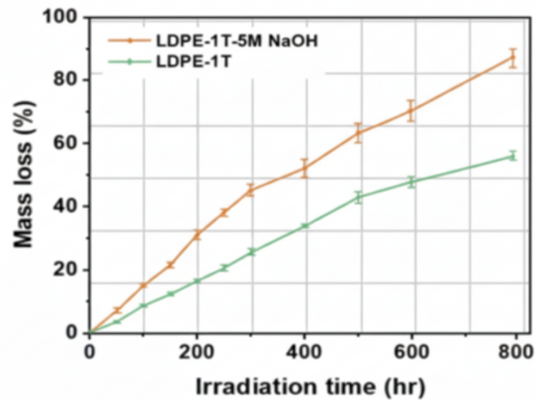


Figura 2: Curvas de degradación de los plásticos. Fuente: [\[13\]](#)

1.4.4. Velocidad de calentamiento en la degradación de materiales plásticos

La degradación de los plásticos puede manifestarse mediante diversos mecanismos, como la degradación térmica, fotooxidativa o mecánica, mencionados previamente. Entre estos, uno de los factores más determinantes es la velocidad de calentamiento del material, ya que regula la rapidez con la que el polímero absorbe energía y altera su estructura molecular. Este parámetro incide directamente en procesos fundamentales como la fusión¹, la cristalización² y la estabilidad general del material. Cuando la tasa de calentamiento es elevada, las cadenas poliméricas disponen de menos tiempo para reorganizarse, lo que genera tensiones internas, reduce el grado de cristalinidad y modifica la resistencia térmica. Como resultado, se observa un desplazamiento de los picos de transición hacia temperaturas superiores, junto con variaciones significativas en la energía absorbida durante el proceso.

¹Transición de estado sólido a líquido en un material, típicamente al superar su temperatura de fusión.

²Proceso de ordenamiento molecular en el que las cadenas poliméricas adoptan una estructura regular y compacta.

La Figura 3 muestra las curvas de calentamiento y enfriamiento del polietileno de alta densidad (HDPE) obtenidas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) a velocidades de 10 °C/min y 20 °C/min donde se aprecia que el incremento en la velocidad de calentamiento no solamente desplaza el pico de fusión sino que también modifica la energía absorbida mostrando así una menor estabilidad térmica, este comportamiento resalta que la velocidad de calentamiento guarda una relación directa con el proceso de degradación térmica, debido a que altera tanto las propiedades energéticas como la estructura interna del material [14].

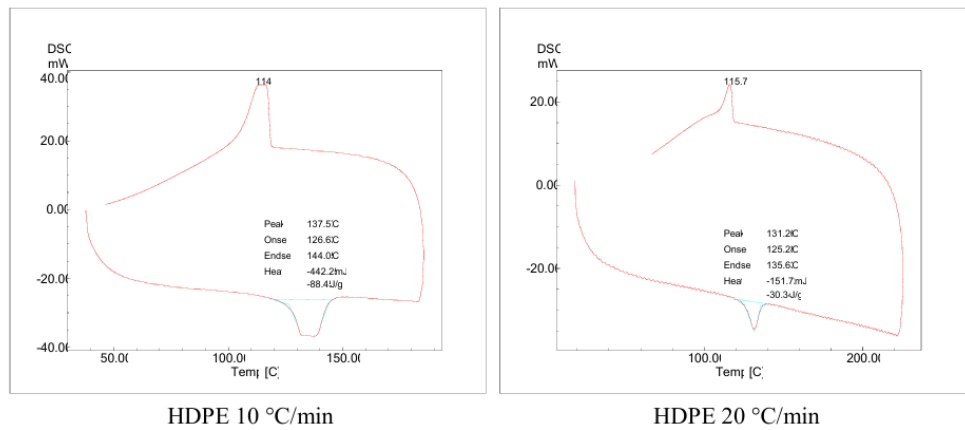


Figura 3: Curvas de calentamiento y enfriamiento del HDPE obtenidas mediante DSC a diferentes velocidades de calentamiento. Fuente: [14]

1.4.5. Transiciones térmicas

Las transiciones térmicas son cambios que ocurren en los materiales cuando son expuestos a variaciones de temperatura estas transiciones pueden ser de diversos tipos, tales como fusión, cristalización, vitrificación y cambios en la estructura molecular, durante una transición térmica el material experimenta un cambio en su estado energético, lo cual puede manifestarse como absorción o liberación de calor en el caso del polietileno, las transiciones térmicas son especialmente importantes para comprender su rendimiento bajo condiciones de exposición prolongada al sol y contacto con agua en el entorno agrícola. Este tipo de análisis permite evaluar la resistencia del material a diferentes temperaturas y sus límites operativos [15].

1.4.6. Transiciones endotérmicas

Las transiciones endotérmicas se caracterizan por requerir un aporte energético externo de modo que el material absorbe calor para lograr transformar su estado

físico o reorganizar su estructura molecular. Un ejemplo ilustrativo se observa en la Figura 4, donde el proceso de fusión del hielo demanda un aporte continuo de calor para que la sustancia pase del estado sólido al líquido. En estos fenómenos, la energía absorbida no se manifiesta como un aumento de temperatura inmediato, sino que se canaliza hacia la reconfiguración molecular del material, tal como sucede durante la transición vítrea o los procesos de relajación entrópica precisamente por su naturaleza sutil, este tipo de transformaciones requiere de técnicas especializadas de análisis térmico, siendo la calorimetría diferencial de barrido (DSC) una de las metodologías más utilizadas gracias a su precisión y capacidad para detectar y cuantificar dichos procesos con notable claridad [16].

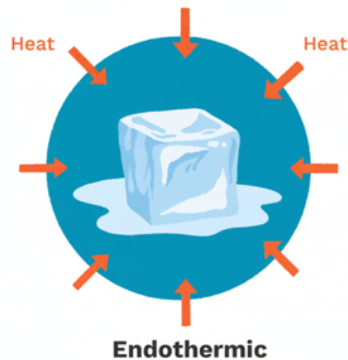


Figura 4: Ejemplo de proceso endotérmico durante la fusión del hielo. Fuente: [16]

En la Figura 5 se ilustra un termograma DSC esquemático correspondiente a materiales semicristalinos, donde se aprecian diferentes transiciones térmicas. Dentro de ellas destaca el pico endotérmico de fusión (T_m), asociado a la absorción de energía necesaria para romper la estructura cristalina del material. Asimismo, se distingue la transición vítrea (T_g), visible como un cambio en la pendiente de la curva, junto con eventos de cristalización (T_c) y degradación térmica (T_d). Este tipo de representaciones permiten correlacionar los fenómenos endotérmicos con el comportamiento térmico y las propiedades físico-químicas de los polímeros en estudio.

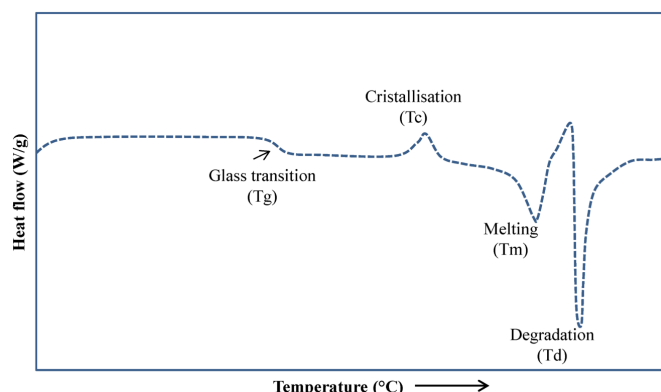


Figura 5: Curva DSC de una transición endotérmica típica en polímeros. Fuente: [16]

1.4.7. Transiciones exotérmicas

Las transiciones exotérmicas son procesos en los que el material libera energía térmica hacia el entorno como resultado de un cambio en su estructura o estado tal y como se ilustra en la Figura 6. Este fenómeno puede ocurrir durante la cristalización de polímeros o la solidificación de una sustancia, donde la energía previamente absorbida en forma de calor se libera al ordenarse las moléculas en una red más estable, a diferencia de las transiciones endotérmicas en las reacciones exotérmicas la liberación de calor puede observarse como un aumento de la temperatura del entorno o como un pico negativo en las técnicas de análisis térmico estos procesos resultan esenciales para comprender el comportamiento estructural de materiales semicristalinos y su estabilidad frente a variaciones térmicas [17].

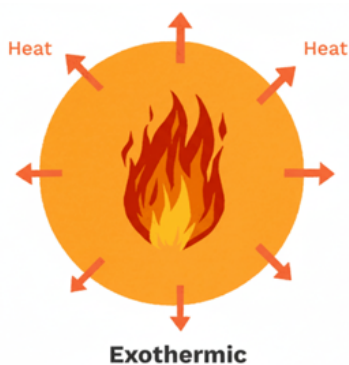


Figura 6: Caracterización de transiciones exotérmicas en materiales. Fuente: [17]

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se emplea como técnica principal para cuantificar transiciones exotérmicas debido a que registra con exactitud los

flujos térmicos asociados a cambios estructurales y químicos durante los procesos de calentamiento y enfriamiento. La Figura 7 presenta un termograma característico de un polímero semicristalino obtenido mediante DSC, donde se puede observar los tipos de transiciones térmicas, en la región superior (indicada como endo), los picos positivos corresponden a procesos endotérmicos entre ellos la transición vítrea (T_g), la cristalización en frío (T_{cc}) y la fusión cristalina (T_m), que implican absorción de calor para incrementar el desorden molecular. Por contrario en la zona inferior (designada como exo), los picos negativos representan fenómenos exotérmicos, destacándose principalmente la cristalización (T_c) que tiene lugar durante el ciclo de enfriamiento.

Durante esta fase el material libera energía térmica al reorganizar sus cadenas moleculares en una estructura más ordenada y estable manifestándose mediante una disminución en el flujo de calor registrado. Este fenómeno no solo permite identificar con exactitud las temperaturas durante la transición térmica sino que también posibilita cuantificar la energía intercambiada durante el proceso, aportando información relevante sobre la estabilidad térmica, el grado de cristalinidad y el comportamiento estructural de polímeros como el polietileno

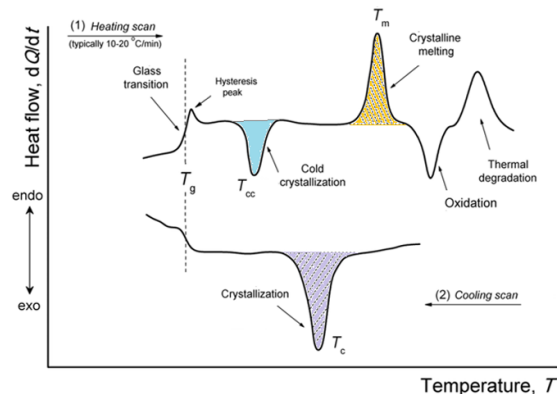


Figure 3.6: Typical DSC scans for a semicrystalline polymer.

Figura 7: Termograma DSC de un polímero transiciones exotérmicas. Fuente: 17

1.4.8. Ley de Fourier para la transferencia de calor por conducción

La Ley de Fourier es uno de los principios fundamentales de la termodinámica aplicada y describe el mecanismo por el cual la energía térmica se transfiere a través de un material debido a un gradiente de temperatura. Establece que la tasa de flujo de calor por conducción es directamente proporcional a la conductividad

térmica del material, al área perpendicular a la dirección del flujo y al gradiente de temperatura, siendo este último negativo, ya que el calor siempre fluye desde zonas de mayor temperatura hacia zonas de menor temperatura [18]. Esta relación se expresa matemáticamente mediante la ecuación 1, que constituye la base para el análisis de transferencia de calor en materiales poliméricos.

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

donde:

- Q : Tasa de transferencia de calor (W)
- k : Conductividad térmica del material ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- A : Área transversal a la dirección del calor (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura (K m^{-1})

1.4.9. Películas agrícolas de polietileno

Las películas agrícolas de polietileno son materiales plásticos de uso extendido en la agricultura cuyo propósito es mejorar las condiciones de los cultivos, proteger las plantas y optimizar el uso de recursos como el agua y los nutrientes. Estos films actúan como una barrera física frente a factores ambientales adversos entre los que se incluyen la radiación solar, las temperaturas extremas, la humedad y el viento. lo que a su vez permite un control más eficiente del microclima alrededor de los cultivos y, en consecuencia, ha contribuido significativamente a incrementar tanto el rendimiento como la calidad de la producción agrícola [19].

1.4.10. Tipos de películas agrícolas

La industria agroindustrial dispone de una variedad de películas agrícolas de polietileno, las cuales han sido exactamente diseñadas para cumplir funciones distintas. Entre las más representativas se encuentran las películas para invernaderos, el mulching o acolchado y las películas antigoteo cada una con características particulares que responden a necesidades específicas de protección, control térmico y manejo de la humedad, cabe destacar que estas variantes se diferencian principalmente por su espesor, los aditivos incorporados y sus propiedades ópticas, factores que en conjunto determinan su durabilidad y eficiencia bajo distintas condiciones ambientales.

1.4.10.1 Películas para invernaderos

Las películas plásticas para invernaderos permiten crear un microclima controlado que favorece el crecimiento y desarrollo de los cultivos durante todo el año. Estas láminas, fabricadas principalmente con polietileno de baja densidad, no solo protegen a las plantas del viento, la lluvia y las variaciones bruscas de temperatura, sino que también ayudan a conservar el calor y mejorar la eficiencia energética del sistema. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la aplicación de estas películas en un cultivo protegido. Además, muchas incorporan aditivos que filtran o modifican la radiación solar, lo que se traduce en una mayor durabilidad del material y una mejor protección de los cultivos contra los efectos nocivos de los rayos ultravioleta. Cabe destacar que los avances recientes han permitido desarrollar películas con mayor resistencia mecánica y estabilidad fotoquímica, logrando una vida útil de hasta tres años bajo condiciones óptimas de uso. En conjunto, estas ventajas no solo mejoran la productividad agrícola, sino que además contribuyen a un uso más eficiente de los recursos y a la reducción de residuos plásticos [20].



Figura 8: Uso de cubierta plástica para la creación de microclima en invernadero. Fuente: [20]

1.4.10.2 Película mulching o acolchado

La aplicación de acolchado plástico en la agricultura modifica notablemente las condiciones del suelo y favorece el desarrollo de los cultivos, especialmente en lo que se refiere a su equilibrio hídrico, térmico y de nitrógeno. En la Figura 9 se muestra una aplicación típica de este tipo de películas en un cultivo. De acuerdo con el estudio citado este tipo de film reduce la evaporación del agua del suelo al actuar como barrera física y al mismo tiempo, mejora la temperatura del perfil edáfico, condiciones que en conjunto favorecen la absorción de nutrientes y promueven una mayor tasa de transpiración y fotosíntesis en las plantas, lo que se ha traducido en incrementos del rendimiento y de la eficiencia en el uso del agua que oscilan entre

el 40 % y el 100 %, aunque dichos valores varían según factores como la técnica de instalación, el tipo de cultivo y el sistema de riego empleado. Sin embargo, el estudio también advierte sobre posibles efectos adversos como la interceptación de la lluvia o la reducción de la radiación neta a causa de la película, los cuales pueden limitar sus beneficios bajo ciertas condiciones [21].



Figura 9: Aplicación de película de acolchado (mulching) en cultivo. Fuente: [21]

1.4.11. Termografía

La termografía es una técnica de medición que permite determinar la temperatura superficial de un objeto sin necesidad de un contacto físico. Esta técnica se basa en el principio de que todos los cuerpos cuya temperatura se encuentre por encima del cero absoluto o $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ emiten radiación infrarroja, cuya intensidad puede ser captada y cuantificada por un sensor especializado [22]. Una de sus principales ventajas es que permite detectar variaciones térmicas muy sutiles en el entorno, incluso en condiciones de visibilidad reducida como la oscuridad, la niebla, el humo o la presencia de partículas en suspensión [23].

Para comprender los fundamentos físicos de la termografía, es necesario introducir el concepto de "cuerpo negro", un modelo teórico establecido por Gustav Robert Kirchhoff este concepto se define como un objeto idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética incidente, sin reflejar ninguna porción de energía y que a su vez es capaz de emitir radiación con la máxima eficiencia posible, incluso en el vacío debido a que la radiación se entiende como el proceso de emisión continua de energía desde la superficie de un cuerpo hacia su entorno, el cuerpo negro representa el radiador perfecto, constituyendo así un pilar teórico esencial

para los fundamentos físicos de la termografía [24]. Existen leyes fundamentales que describen la forma de radiación de un cuerpo, tales como:

- **Ley de radiación térmica de Kirchhoff.** Se fundamenta en el principio de equilibrio térmico, estado en el cual la radiación absorbida por un cuerpo equivale exactamente a la emitida. Kirchhoff estableció dos postulados fundamentales al respecto:
 1. La relación entre la emisividad e y la absorptividad a de un material es una constante universal que depende exclusivamente de la temperatura, independientemente de la naturaleza del cuerpo. Esto implica que la capacidad de un material para emitir radiación es directamente proporcional a su eficiencia para absorberla.
 2. En condiciones de equilibrio térmico, la emisividad espectral (e_λ) coincide numéricamente con la absorptividad espectral (a_λ), donde el subíndice λ denota la dependencia de estos coeficientes con la longitud de onda. Por el principio de conservación de la energía, el valor de la emisividad no puede exceder la unidad.
- **Ley de radiación de Planck.** La Ley de Radiación de Planck proporciona la descripción teórica de la distribución espectral de la energía radiante emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico a una temperatura determinada. Desarrollada por Max Planck, esta ley revolucionó los fundamentos de la física al introducir el concepto de cuantización de la energía. Cabe señalar que la intuición física subyacente reside en que un cuerpo en equilibrio no emite radiación en una única longitud de onda, sino que lo hace a lo largo de todo el espectro electromagnético, siguiendo una distribución característica cuya forma depende directamente de la temperatura [25]. En este marco, la potencia espectral emitida por unidad de área se modela mediante la ecuación [2].

$$W_{b\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (W/m^2) \quad (2)$$

Las constantes de esta ecuación son:

- La constante de Planck, $h = 6,6 \times 10^{-34}$ J·s.
- La constante de Boltzmann, $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K.
- La velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s.

- **Ley de desplazamiento de Wien.** Describe el comportamiento del máximo de emisión espectral de un cuerpo negro en función de su temperatura. Si bien la materia emite radiación en un amplio rango del espectro electromagnético, la distribución de esta energía no es uniforme. Wien estableció que la longitud de onda correspondiente al pico máximo de emisión λ_{\max} es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo T . Esto implica que a medida que aumenta la temperatura, el máximo de radiación se desplaza hacia longitudes de onda más cortas [26]. Matemáticamente, esta relación se expresa mediante la ecuación [3].

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

donde b es la constante de desplazamiento de Wien, T es la temperatura absoluta en Kelvin, y λ_{\max} es la longitud de onda del pico de máxima emisión en metros.

1.4.12. Cámaras termográficas

Las cámaras termográficas representan la tecnología fundamental para la captación y visualización bidimensional de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, en cuanto a su principio de detección estos dispositivos se clasifican en dos categorías principales: detectores de fotones y detectores térmicos. Dentro de esta última categoría, los detectores térmicos no refrigerados han adquirido especial relevancia en aplicaciones prácticas debido a sus ventajas comparativas, entre las que destacan dimensiones reducidas, bajo consumo energético, alta rentabilidad, amplia respuesta espectral y capacidad de operación continua [27].

Por lo que respecta a la arquitectura básica de estos sistemas, requieren de un arreglo bidimensional de sensores conocido como FPA (Focal Plane Array) para generar imágenes térmicas completas, dado que un solo sensor resulta insuficiente para este propósito. En la actualidad, existen tres tecnologías predominantes para FPAs no refrigerados: microbolómetros, termopilas y sensores piroeléctricos. Según la evidencia técnica disponible, los microbolómetros presentan una sensibilidad superior en comparación con las otras tecnologías, a lo que se suma su beneficio de procesos de fabricación más simplificados [28].

1.4.13. Mecanismo de detección en microbolómetros

Un microbolómetro funciona como un dispositivo pasivo cuya resistencia eléctrica varía en función de los cambios de temperatura que experimenta. Esta variación resistiva se convierte en una señal de tensión cuantificable mediante un conversor analógico-digital (ADC). La arquitectura característica de este tipo de detector, ilustrada en la Figura 10, consiste en un material absorbedor que recibe la radiación infrarroja incidente proveniente de las películas de polietileno bajo estudio. Dicho material se encuentra suspendido sobre una estructura aislada térmicamente, permitiendo que el calor absorbido genere un incremento de temperatura localizado.

Este aumento térmico produce una modificación en la resistencia interna del material, cuya magnitud y sensibilidad están determinadas por su Coeficiente de Temperatura de Resistencia (TCR, α). La relevancia del TCR en este proyecto radica en que determina directamente la capacidad del sistema para detectar las sutiles transiciones térmicas en las películas de polietileno, un valor de TCR alto permite que la cámara termográfica capture variaciones de temperatura tan pequeñas como $0,1^{\circ}\text{C}$, lo que resulta esencial para identificar los patrones de calentamiento y enfriamiento característicos durante los ciclos térmicos controlados. La señal eléctrica resultante, proporcional al cambio resistivo y amplificada gracias al TCR del material, es transmitida a un circuito integrado de lectura (ROIC) para su posterior procesamiento y digitalización [29]. Esta cadena de medición, basada en el principio del TCR, permite al sistema desarrollado generar los mapas térmicos y las curvas de temperatura que constituyen la base del análisis comparativo entre las condiciones estudiadas.

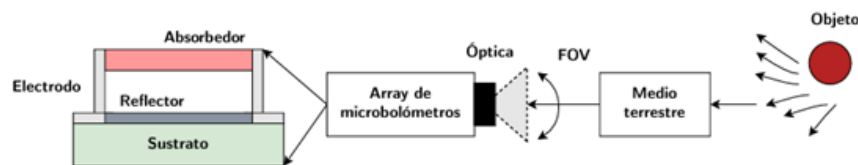


Figura 10: Funcionamiento básico de un detector de microbolómetro. Fuente: [30]

El Coeficiente de Temperatura de Resistencia (TCR, α) constituye una de las principales figuras de mérito para evaluar el rendimiento de un microbolómetro. Según, este parámetro se define matemáticamente mediante la siguiente ecuación [4]

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (4)$$

El parámetro α representa la sensibilidad térmica del material, expresada como el cambio relativo de la resistencia eléctrica R por unidad de variación de temperatura T . Un valor elevado de TCR implica que pequeñas fluctuaciones térmicas generan variaciones significativas en la resistencia, mejorando sustancialmente la sensibilidad del detector [31].

1.4.14. Parámetros ópticos en termografía

La representación dimensional del objeto bajo estudio en una imagen termográfica está determinada por tres parámetros fundamentales: la resolución espacial del sensor, el campo de visión FOV y la distancia entre la cámara y el objetivo. El FOV define el área angular máxima que el sensor es capaz de capturar, como se ilustra en la Figura 11.

Para aplicaciones que requieren una alta precisión en la distribución térmica pixelada, es necesario minimizar el FOV angular, un FOV amplio genera una dispersión pixelada mayor sobre la superficie objetivo, exigiendo sensores de mayor resolución para mantener la exactitud métrica. Relacionado directamente con el FOV, la distancia focal f representa la distancia entre el plano de la lente y el punto de convergencia de los rayos ópticos. Este parámetro mantiene una relación inversa con el FOV a mayor distancia focal, menor campo de visión [32].

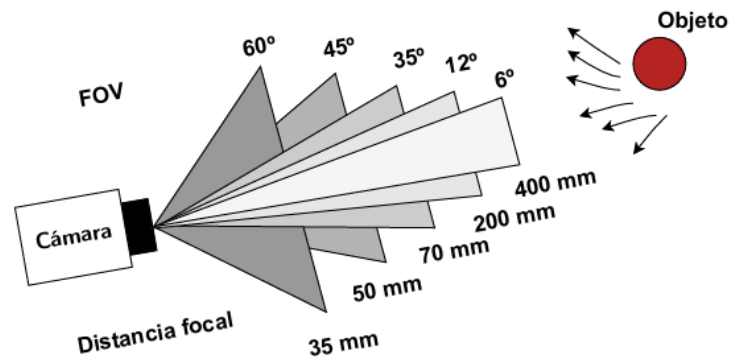


Figura 11: Representación de la correlación entre FOV y distancia focal. Fuente: [32]

1.4.15. Emisividad térmica

La emisividad térmica es una propiedad fundamental de los materiales que describe su capacidad para emitir energía en forma de radiación infrarroja en comparación con un cuerpo negro ideal. Este parámetro influye directamente en la

precisión de las mediciones termográficas, ya que determina cuánta energía térmica proviene realmente del objeto y cuánta es reflejada o transmitida desde el entorno. En la Figura 12 se representa de forma esquemática la interacción de la radiación con una superficie, donde la energía incidente puede dividirse en tres componentes principales: la energía reflejada, la energía transmitida y la energía emitida por el propio material [33]. La fracción correspondiente a la emisión está directamente relacionada con la emisividad, mientras que las otras dependen de la reflectividad y la transmitancia.

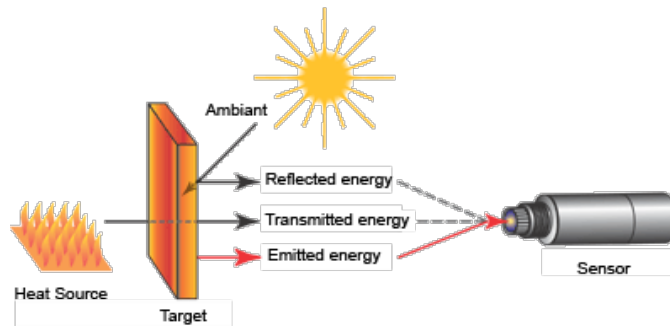


Figura 12: Representación esquemática de los componentes de la radiación térmica detectada por un sensor infrarrojo. Fuente: [33]

Para conocer los valores de emisividad térmica de diferentes tipos de plásticos utilizados en aplicaciones industriales y de análisis térmico, es necesario comparar parámetros como el espesor y el índice de refracción de cada material, ya que estos influyen directamente en su comportamiento frente a la radiación infrarroja. En la Tabla 2 se presentan los valores de emisividad (ϵ_{trans}), el espesor (d) y el índice de refracción (n) de varios polímeros, se puede observar que los materiales con menor índice de refracción, como el LDPE y el HDPE, presentan una emisividad más baja, lo que indica una menor capacidad para emitir radiación térmica.

En cambio, los polímeros con un mayor índice de refracción, como el Nylon 6 y el PET, muestran una emisividad superior, evidenciando una mayor interacción con la radiación infrarroja [34]. Este comportamiento está relacionado con la estructura molecular y el grado de cristalinidad de los materiales, factores que determinan su capacidad para absorber y emitir calor de manera efectiva.

Tabla 2: Propiedades ópticas y geométricas de muestras de polietileno

Muestra	Espesor (μm)	Índice refracción	Emisividad $\varepsilon_{\text{trans}}$
LDPE	110	1.471	0.23
HDPE	95	1.471	0.30
Nylon 6	100	1.542	0.85
PET	100	1.542	0.82
PI	50	1.642	0.74

1.4.16. Principio de funcionamiento de la termopila

La termopila es un sensor diseñado para convertir la energía térmica en energía eléctrica, y su principio de operación se basa en el *efecto Seebeck*, el cual describe la conversión directa de diferencias de temperatura en electricidad. Este dispositivo está compuesto por múltiples termopares conectados, generalmente en serie (aunque en algunos casos en paralelo), con el fin de aumentar la sensibilidad de la señal generada. En la Figura 13 se ilustra este principio: dos materiales distintos, A y B, se encuentran unidos en dos extremos denominados a (unión caliente) y b (unión fría), formando un circuito termoeléctrico. El punto c , correspondiente al absorbedor, es sometido a un flujo incidente de radiación Φ_0 (expresado en W/m^2), que provoca un incremento de temperatura en la unión caliente. Esta diferencia de temperatura entre las uniones genera una diferencia de potencial eléctrico V_{AB} , proporcional a la energía absorbida [35].

El fenómeno cumple con los principios de la Ley de Radiación del Cuerpo Negro mencionado anteriormente, ya que la radiación térmica absorbida por el punto c se convierte en una señal eléctrica que representa la temperatura del objeto observado. Así, la termopila actúa como un transductor termoeléctrico de alta sensibilidad, ideal para mediciones sin contacto en aplicaciones científicas, industriales y ambientales.

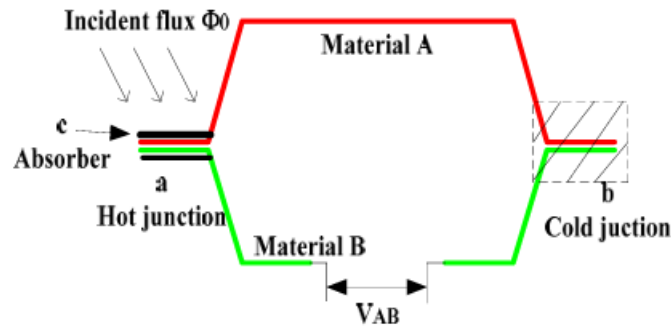


Figura 13: Funcionamiento de un sensor infrarrojo de termopila. Fuente: [35]

1.4.17. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es una disciplina que combina principios de la ingeniería, la informática y las matemáticas para analizar, mejorar e interpretar información visual proveniente de imágenes digitales, en si su propósito principal es transformar datos visuales en información cuantificable o cualitativa útil para aplicaciones prácticas, como la automatización, el control industrial, la visión artificial o el análisis térmico. El proceso de tratamiento de una imagen suele dividirse en varias etapas secuenciales que permiten obtener resultados más precisos y adaptados a un objetivo específico.

En la Figura [14], se presenta un diagrama de bloques del procesamiento digital de imágenes, donde se ilustran los pasos fundamentales de este proceso. La secuencia comienza con la adquisición de la imagen, que consiste en la captura mediante sensores o cámaras, seguida de la mejora (image enhancement), orientada a resaltar detalles relevantes mediante técnicas de filtrado o ajuste de contraste, además la restauración de imagen (image restoration) busca corregir imperfecciones causadas por ruido o distorsiones [36]. En niveles más avanzados, se incluyen operaciones de procesamiento morfológico, segmentación y extracción de características, que permiten identificar regiones o patrones de interés dentro de la imagen.

Estas etapas están interconectadas mediante una base de conocimiento (knowledge base) que guía la toma de decisiones y la selección de métodos según las condiciones del problema. Finalmente, procesos como el reconocimiento de objetos (object recognition) y la representación y descripción permiten traducir la información visual en datos útiles para análisis, clasificación o control automatizado.

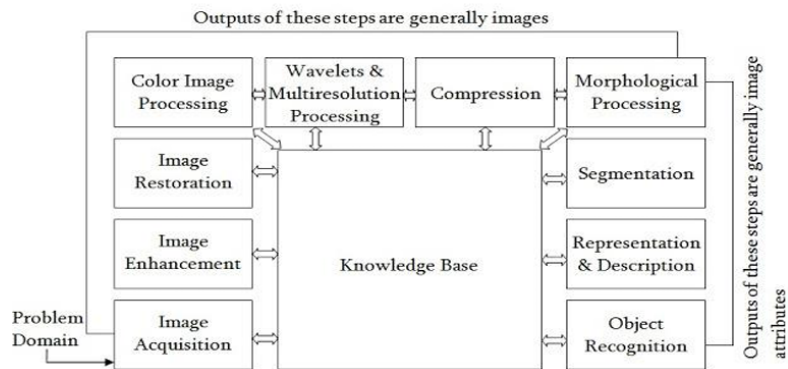


Figura 14: Flujo de procesamiento digital de imágenes. Fuente: [36]

1.4.18. Métodos de interpolación clásicos

La interpolación es una herramienta útil dentro del procesamiento digital de imágenes al facilitar el escalado y reajuste de las mismas con eficiencia, pero hay que considerar que al reducir una imagen por escalado hacia abajo la disminución en la cantidad de píxeles suele conllevar una pérdida de nitidez y el nivel de detalle. Por el contrario, al ampliarla por escalado hacia arriba, es necesario estimar valores intermedios proceso que puede introducir desenfocos o diversos artefactos visuales.

El proceso de interpolación es, en esencia, un método de estimación que utiliza datos conocidos para calcular valores desconocidos, lo cual implica cierta pérdida de calidad en cada operación realizada sobre la imagen. De esta manera, aunque resulta indispensable para adaptar una matriz de píxeles a nuevas dimensiones o corregir distorsiones ópticas, siempre conlleva un compromiso entre eficiencia computacional y fidelidad visual. Un ejemplo sencillo es la interpolación lineal, que constituye la base de otros métodos más complejos, utilizados en aplicaciones donde la preservación del detalle y la precisión son fundamentales, como en la rotación de imágenes o en la reconstrucción de formatos [37]. En términos generales, mientras mayor sea la cantidad de datos disponibles previamente, mayor será la precisión alcanzada por el algoritmo, tal como se aprecia en la Figura [15].

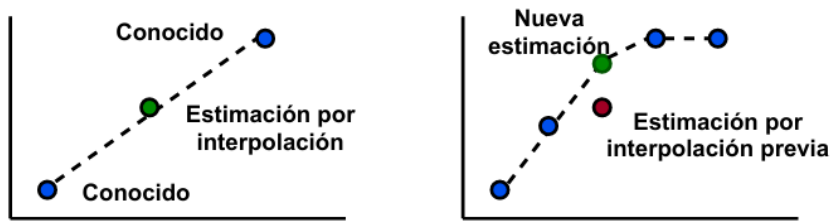


Figura 15: Estimaciones de una interpolación lineal según el número de muestras. Fuente: [37]

Cuando la interpolación lineal se extiende a dos dimensiones espaciales, da lugar a la interpolación bilineal, la cual puede entenderse como una combinación de dos interpolaciones lineales sucesivas. En el ámbito del procesamiento de imágenes, este método constituye una de las técnicas más simples para el remuestreo de matrices, ya que estima el valor de un píxel a partir de la información proporcionada por sus vecinos más cercanos. No obstante, es crucial reconocer que la interpolación, por su naturaleza, no puede generar información detallada que no esté presente en la imagen original.

Entre las técnicas clásicas de interpolación aplicadas en procesos de super-resolución destacan el método del vecino más cercano, la interpolación bilineal y la bicúbica. En términos generales, puede establecerse que a mayor número de píxeles considerados en el proceso de estimación, mayor será la precisión del resultado, si bien este incremento en calidad conlleva mayores demandas computacionales. A continuación, se presenta una descripción concisa de estos métodos [38].

- Vecino más cercano:** Dentro del espectro de técnicas para el escalado de imágenes, el método de interpolación por vecino más cercano se distingue por su notable simplicidad y enfoque directo, su principio de funcionamiento es intuitivo se identifica el píxel más próximo a la coordenada que requiere un valor y se le asigna directamente, prescindiendo de cualquier cálculo complejo. Esta ausencia de operaciones complejas propicia un rendimiento veloz y un bajo costo computacional, características que lo vuelven idóneo para aplicaciones con restricciones de tiempo o de potencia de procesamiento.

- **Interpolación bilineal:** La interpolación bilineal ofrece un nivel intermedio de calidad en comparación con el vecino más cercano. Para estimar un nuevo píxel, toma como referencia los cuatro píxeles más cercanos en torno al punto de interés. Posteriormente, aplica un promedio ponderado entre ellos, lo que permite generar un valor suavizado y más coherente con la continuidad de la imagen. Este procedimiento reduce los bordes irregulares y mejora la transición entre colores, aunque puede introducir cierto desenfoque en la imagen final.
- **Interpolación bicúbica:** La interpolación bicúbica es una técnica más avanzada que busca mejorar aún más la calidad visual frente a los métodos anteriores. En este caso, el algoritmo no solo toma en cuenta cuatro píxeles adyacentes, sino un conjunto de dieciséis vecinos alrededor del punto a interpolar. Posteriormente, calcula un promedio ponderado que considera tanto la distancia como las variaciones de intensidad entre dichos píxeles, logrando así un resultado más detallado.

1.4.19. Microordenador raspberry pi

El Raspberry Pi es un microordenador de placa reducida que integra en un mismo módulo componentes como la CPU, la memoria RAM, interfaces de entrada/salida (USB, HDMI), conectividad de red y pines de propósito general (GPIO), junto con almacenamiento basado en tarjeta SD. Esta integración le permite ejecutar sistemas operativos completos y gestionar periféricos directamente, a diferencia de los microcontroladores, que se limitan principalmente a tareas de cálculo específicas.

Debido a su diseño compacto, consumo energético moderado y versatilidad funcional, resulta ideal para sistemas embebidos, control industrial, prototipado de IoT y aplicaciones educativas [39]. En la Figura 16 se ilustra la disposición de pines del modelo Raspberry Pi 3B, donde se identifican las distintas funciones asignables a cada conexión, lo cual facilita el diseño de sistemas de adquisición de datos y control.

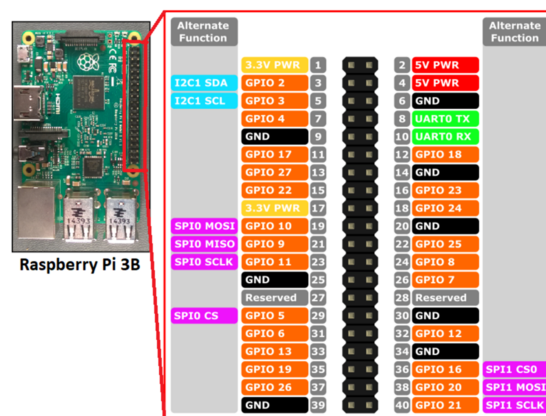


Figura 16: Distribución de pines GPIO y funciones alternativas del microordenador Raspberry Pi 3B. Fuente: [39](#)

1.4.20. Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicación se define como un conjunto de especificaciones y estándares que regulan la interacción entre dispositivos y sistemas durante el intercambio de información. Dicha comunicación resulta fundamental en entornos electrónicos, informáticos e industriales, ya que garantiza que los datos se transmitan de manera ordenada, confiable y sin ambigüedades. Para ello, los protocolos establecen reglas precisas sobre formatos de mensajes, secuencias de intercambio, métodos de codificación y decodificación, así como mecanismos de detección y corrección de errores durante la transmisión [40](#). A continuación, se describen algunos ejemplos representativos de protocolos de comunicación:

- Protocolo I2C:** El protocolo I2C se posiciona como uno de los sistemas de comunicación más empleados en entornos embebidos, destacando por su simplicidad y eficiencia en la transferencia de datos entre múltiples dispositivos. Este esquema de comunicación utiliza dos líneas fundamentales SDA (Serial Data Line) para la transmisión de datos y SCL (Serial Clock Line) para la sincronización, en una configuración típica un dispositivo asume el rol de maestro, generando las señales de reloj y coordinando la comunicación, mientras los demás dispositivos funcionan como esclavos, respondiendo exclusivamente a las instrucciones del maestro.

Esta arquitectura permite conectar simultáneamente múltiples sensores, memorias y periféricos, reduciendo significativamente la cantidad de pines requeridos y simplificando el diseño hardware. En la Figura [17](#) se ilustra el

esquema general de funcionamiento maestro-esclavo del protocolo I²C, donde puede observarse la interacción entre las líneas SDA y SCL durante el intercambio de información [41].

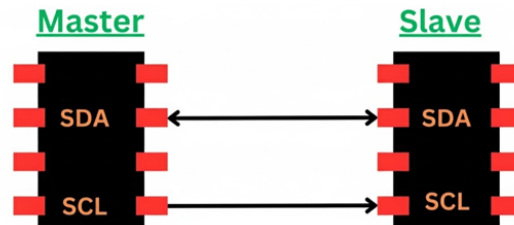


Figura 17: Esquema de conexión del protocolo I2C. Fuente: [41]

- MQTT:** Es un protocolo de mensajería ligero diseñado para el intercambio eficiente de datos entre dispositivos conectados. Su arquitectura se basa en un esquema cliente-servidor donde el servidor, denominado broker, centraliza la gestión y distribución de mensajes hacia todos los clientes suscritos a temas o categorías específicas de información.

Esta organización no solo optimiza el uso del ancho de banda y reduce el consumo energético, sino que lo ha posicionado como estándar ampliamente adoptado en entornos IoT, tal como se ilustra en la Figura 18. Además, soporta diferentes niveles de calidad de servicio (QoS) para asegurar que los datos se entreguen correctamente incluso en redes inestables. Gracias a su simplicidad y escalabilidad, es una herramienta clave para implementar comunicaciones en tiempo real y garantizar la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos [42].

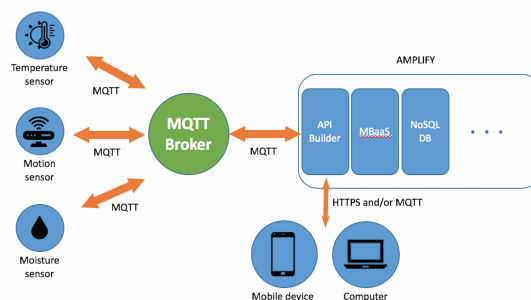


Figura 18: Protocolo de Comunicación MQTT. Fuente: [42]

1.4.21. Bases de datos

Una base de datos es un sistema estructurado que permite almacenar, organizar, administrar y recuperar información de manera eficiente su propósito principal es garantizar la integridad, consistencia y disponibilidad de los datos, lo que resulta útil en aplicaciones que manejan grandes volúmenes de información o requieren consultas en tiempo real. A lo largo del tiempo, los sistemas de gestión de bases de datos han evolucionado para adaptarse a las crecientes necesidades de procesamiento y seguridad, optimizando la manera en que la información es almacenada y accedida.

En cuanto a su clasificación, las bases de datos se organizan en diversos modelos, entre los que destacan los jerárquicos, en red, orientados a objetos y relacionales. En la Figura 19 se representa la estructura característica de una base de datos relacional, donde la información se organiza en tablas interconectadas mediante relaciones definidas por claves primarias y foráneas. Este esquema facilita la gestión de datos complejos, favoreciendo tanto la eficiencia operativa como la consistencia en el manejo de la información. Para interactuar con estos sistemas se emplea el lenguaje SQL, una herramienta estandarizada que permite ejecutar consultas, inserciones, actualizaciones y eliminaciones de registros de manera estructurada y segura 43.

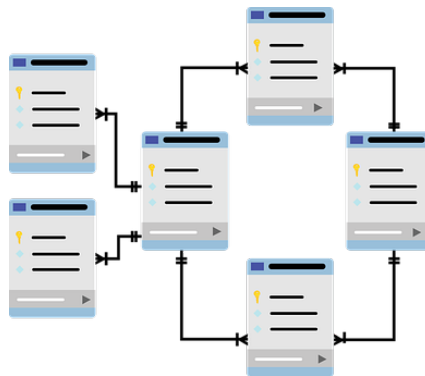


Figura 19: Esquema general de la estructura de una Base de Datos. Fuente: 43

1.4.22. Modelo predictivo de Weibull

El modelo predictivo de Weibull es una herramienta estadística ampliamente utilizada para describir y predecir el comportamiento de materiales sometidos a procesos de degradación o fallo a lo largo del tiempo. Este modelo se basa en la distribución de probabilidad de Weibull, propuesto por Waloddi Weibull en 1951,

la cual permite caracterizar fenómenos donde la tasa de fallo no es constante, sino que varía en función del tiempo o de las condiciones ambientales. Su flexibilidad radica en la presencia de dos parámetros fundamentales: el parámetro de forma (β), que define el tipo de fallo o etapa de degradación, y el parámetro de escala (η), que indica la vida característica del material [44]. De acuerdo con la ecuación general [5] de la función de distribución acumulativa de Weibull se denomina de la siguiente forma:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

El parámetro de forma β del modelo de Weibull es un indicador para identificar el tipo de fallo o patrón de degradación que experimenta un material a lo largo del tiempo, este valor permite determinar si el material tiende a fallar de manera temprana, aleatoria o progresiva dependiendo de las condiciones de operación o exposición. En el caso de las películas agrícolas de polietileno, el análisis de β resulta esencial para comprender cómo el material responde al envejecimiento térmico y a la influencia de factores como la humedad o la radiación solar. A continuación en la Tabla [3], se muestra la clasificación general de los tipos de fallo en función del valor de β .

Tabla 3: Comportamiento del modelo de Weibull en función del parámetro β .

Rango del parámetro β	Caracterización del modo de fallo	Dinámica e Interpretación de la Tasa de Fallos
$\beta < 1$	Fase de Mortalidad Infantil	La función de tasa de fallos es decreciente. Esto es característico de fallos que ocurren en la fase inicial de la vida útil, a menudo asociados a defectos de fabricación, materiales defectuosos o errores de instalación.
$\beta = 1$	Fallos aleatorios	Representa una tasa de fallo constante; el material presenta los fallos de forma aleatoria sin relación directa con el tiempo.
$\beta > 1$	Fase de Desgaste o Envejecimiento	La tasa de fallos exhibe un comportamiento creciente. Esto indica que la probabilidad de fallo se incrementa con el tiempo debido a procesos de degradación acumulativa como fatiga, corrosión, desgaste mecánico o envejecimiento químico.

En el estudio de la distribución de Weibull, es fundamental reconocer que existen diferentes convenciones de notación en la literatura, los parámetros fundamentales de esta distribución son universalmente reconocidos como el parámetro de forma y el parámetro de escala. En este documento, estos se denotan como β (beta) y η (eta), respectivamente. Es importante destacar que estas variables son equivalentes a los parámetros k y λ que se muestran en las gráficas de referencia de la Figura 20, donde el parámetro k equivale a β (parámetro de forma) y λ equivale a η (parámetro de escala). Esta correspondencia entre notaciones asegura la correcta interpretación de las funciones y gráficos presentados a continuación.

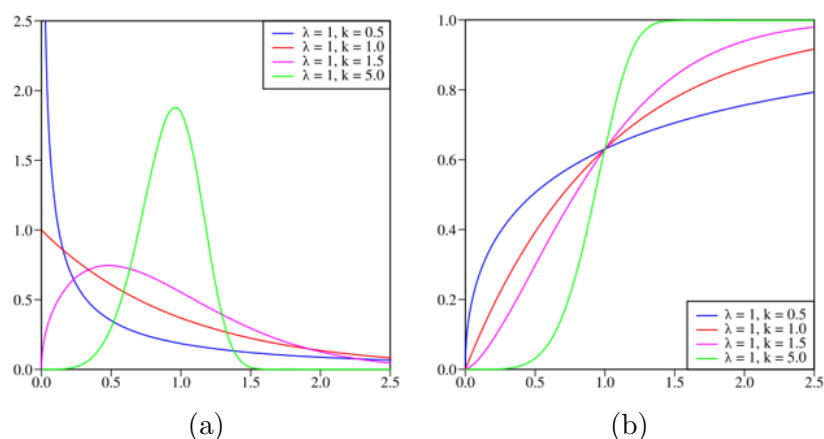


Figura 20: Funciones de probabilidad para diferentes valores de k con $\lambda = 1$: (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de distribución acumulada. Fuente: [45]

Los gráficos asociados a la distribución de Weibull permiten visualizar el comportamiento estadístico de la durabilidad o la probabilidad de fallo de un material. En particular, la función de densidad de probabilidad (PDF) describe la probabilidad relativa de que un evento de fallo ocurra en un intervalo específico, mostrando una forma característica determinada por el parámetro de forma k .

Complementariamente, la función de distribución acumulativa (CDF) la cual cuantifica la probabilidad de que se produzca un fallo en o antes de un tiempo específico se erige como una herramienta fundamental para evaluar la confiabilidad del material a lo largo de su vida útil. Como se puede apreciar en la Figura 20, la variación del parámetro k no solo altera la pendiente, sino también la curvatura de estas funciones, lo que da lugar a distintos patrones de comportamiento dependiendo de su valor.

1.4.23. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario (GUI) constituye el medio visual que permite la interacción entre el usuario y un sistema informático mediante elementos como botones, menús, cuadros de texto y gráficos dinámicos, su propósito principal radica en simplificar la comunicación con el sistema, permitiendo ejecutar operaciones complejas a través de representaciones visuales intuitivas. En el ámbito de los sistemas de medición y adquisición de datos, las interfaces gráficas adquieren especial relevancia, ya que facilitan la visualización en tiempo real de los parámetros registrados por los sensores, el control de procesos experimentales y la gestión de los datos recolectados. De este modo, el usuario puede supervisar el comportamiento térmico del material, ajustar las condiciones de prueba y almacenar los resultados sin necesidad de intervenir directamente en el código del sistema.

Por su parte, el lenguaje de programación Python se ha consolidado como una opción predominante para el desarrollo de interfaces gráficas, gracias a su versatilidad, sintaxis clara y compatibilidad con numerosas bibliotecas especializadas. Mediante librerías como Tkinter o PyQt, es posible construir entornos visuales que permiten observar, registrar y gestionar mediciones experimentales de manera eficiente. Estas interfaces pueden funcionar además como punto de enlace entre los sistemas de adquisición y las bases de datos remotas, garantizando un flujo continuo y confiable de información [46]. En la Figura 21 se esquematiza la arquitectura general de la interfaz gráfica y su integración con los demás componentes del sistema, donde se aprecia la relación entre el software de desarrollo y las librerías empleadas en la implementación.

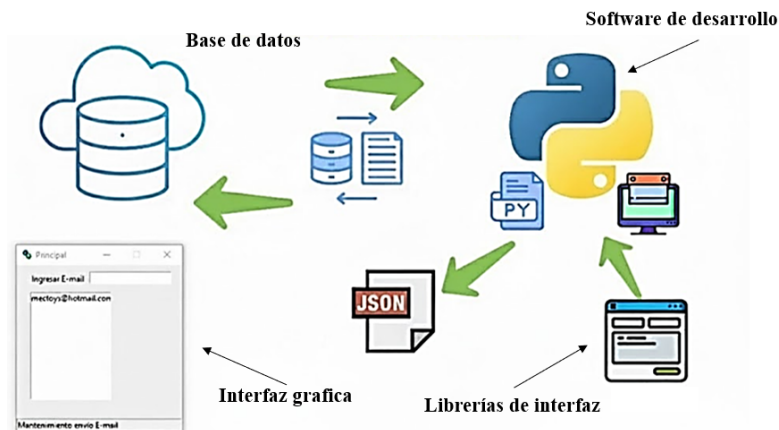


Figura 21: Esquema general de comunicación de una interfaz gráfica. Fuente: [46]

1.5. Marco contextual

El proyecto tiene como propósito desarrollar e implementar un sistema de análisis térmico aplicado a películas agrícolas de polietileno, utilizando como espacio de trabajo las instalaciones del Laboratorio de Automatización y Electrónica de la Universidad Estatal Península de Santa Elena. En este entorno se llevarán a cabo las experimentaciones del polietileno sometido a una fuente de calor, con el fin de evaluar su comportamiento térmico superficial y analizar las variaciones de temperatura que se presentan durante los ensayos controlados. Asimismo, se ejecutarán las etapas de ensamblaje, calibración y validación de los sensores térmicos y de los sistemas de adquisición y transmisión de datos, garantizando su precisión y confiabilidad antes de su aplicación en condiciones reales de campo. El enfoque del estudio permitirá caracterizar detalladamente el comportamiento térmico de las películas agrícolas comerciales, considerando dos condiciones experimentales: la exposición directa a una fuente de calor controlada y el contacto con agua. Este análisis generará información técnica relevante que contribuirá a optimizar el uso de estos materiales, reducir los costos asociados al deterioro prematuro y fomentar prácticas agrícolas más sostenibles en el Ecuador.

La implementación seguirá un enfoque metodológico escalonado que permitirá desarrollar el proyecto de manera estructurada y progresiva. En una primera etapa, se realizarán pruebas en ambientes controlados empleando muestras representativas de películas agrícolas de polietileno comúnmente utilizadas en la región. Este enfoque permitirá establecer parámetros base de comportamiento térmico y validar la precisión del sistema de medición bajo condiciones reproducibles de laboratorio. Posteriormente, y como una proyección a futuro, se contempla ampliar el estudio hacia evaluaciones en entornos agrícolas reales, especialmente en zonas del litoral ecuatoriano caracterizadas por alta radiación solar y elevados niveles de humedad ambiental.

Durante el desarrollo experimental, las películas agrícolas de polietileno son expuestas a una fuente de calor controlada con el propósito de analizar su comportamiento térmico ante condiciones de aumento progresivo de temperatura. Este proceso permite evaluar la respuesta del material frente a la transferencia de energía sobre su superficie, observando cómo varía la distribución del calor, la capacidad de disipación y la estabilidad estructural del plástico cuando se encuentra sometido a un entorno térmicamente exigente. Para la obtención y análisis de los datos térmicos en las películas agrícolas de polietileno se incorporan tecnologías de medición especializadas en el área. En primer lugar, se emplean sensores infrarrojos, encargados de registrar mediciones puntuales de temperatura en tiempo real, lo que proporciona información directa sobre zonas específicas de la superficie del

material durante los ensayos controlados. Adicionalmente, se utiliza una cámara termográfica para capturar imágenes bidimensionales que reflejan la distribución térmica a lo largo de la superficie del polietileno.

Estas imágenes son almacenadas temporalmente en la memoria interna del dispositivo para después ser transferidas al sistema de análisis para su procesamiento, lo que permite examinar con mayor precisión las variaciones térmicas superficiales y comprender el comportamiento del material bajo condiciones de calentamiento controlado. Ambos dispositivos se integran en una plataforma central basada en Raspberry Pi, encargada de gestionar la adquisición, el procesamiento primario y la transmisión de los datos térmicos. Para la comunicación con la infraestructura en la nube, se optó por la implementación del protocolo MQTT, seleccionado por su eficiencia y bajo consumo de recursos, asegurando así la llegada de la información a la base de datos remota, esta configuración garantiza no solo la sincronización continua de las mediciones, sino también la creación de un respaldo seguro de los registros térmicos generados en los experimentos. Como parte final la capa de análisis y visualización se sustenta en Grafana, una interfaz que facilita la representación gráfica de los datos y permite un monitoreo en tiempo real, así como una interpretación profunda del comportamiento térmico en las películas agrícolas de polietileno.

A partir de los datos recolectados, se realiza una comparativa entre dos condiciones experimentales específicas: cuando la película de polietileno se encuentra en un entorno seco y cuando está en contacto con agua. Esta evaluación permite identificar diferencias térmicas significativas entre ambos escenarios, aportando información técnica relevante sobre el comportamiento del material frente a la humedad y los procesos de transferencia de calor. El análisis obtenido facilita la comprensión de cómo las condiciones ambientales inciden en la estabilidad térmica del polietileno agrícola y en su desempeño a lo largo del tiempo. Asimismo, los datos generados alimentan un modelo predictivo basado en la distribución de Weibull, empleado para estimar la vida útil del material plástico y comparar su resistencia ante el estrés térmico en distintos entornos. Este enfoque posibilita determinar cuál de las condiciones seca o en contacto con agua ofrece una mayor estabilidad térmica, brindando una herramienta cuantitativa para evaluar la durabilidad del polietileno agrícola.

2. Métodos y diseño experimental

2.1. Métodos

Este proyecto se sustenta en una estrategia metodológica que integra tres componentes principales, la experimentación práctica, la revisión bibliográfica y el análisis cuantitativo. Dicha integración tiene como propósito validar los hallazgos empíricos con el conocimiento establecido y dotarlos de solidez estadística. De manera específica, la experimentación genera datos directos sobre la respuesta térmica de las películas de polietileno, por su parte la revisión bibliográfica proporciona el fundamento teórico y el contexto científico de la investigación, y como última instancia el análisis cuantitativo procesa la información para extraer patrones y relaciones significativas.

La base experimental del proyecto consiste en la realización de pruebas controladas para caracterizar el comportamiento térmico de películas agrícolas de polietileno bajo exposición térmica en condiciones secas y en contacto con agua. Para ello, se implementarán dos técnicas de medición complementarias: una cámara termográfica para mediciones sin contacto y un sensor infrarrojo, ambos integrados en un sistema de adquisición de datos portátil basado en Raspberry Pi 3. El protocolo experimental se estructura en ciclos térmicos controlados que simulan condiciones de estrés térmico representativas de entornos agrícolas reales. Cada ciclo comprende tres fases definidas: fase de línea base para estabilización inicial, fase de calentamiento con exposición controlada a fuente térmica, y fase de enfriamiento para el retorno a condiciones ambientales. Este diseño cíclico permitirá evaluar el comportamiento térmico del material bajo condiciones repetitivas de estrés, replicando los ciclos térmicos naturales a los que se expone el polietileno en aplicaciones reales.

Por lo tanto, se desarrollará una investigación bibliográfica sistemática mediante la revisión exhaustiva de literatura científica, informes técnicos y estudios previos relacionados con el análisis térmico de materiales plásticos y las propiedades específicas de las películas agrícolas de polietileno. Esta revisión no solo proporcionará el fundamento teórico del proyecto, sino que también permitirá contextualizar metodológicamente la selección de dispositivos y técnicas empleadas, estableciendo un marco de referencia sobre abordajes anteriores en el análisis de materiales sometidos a radiación térmica.

Además, se implementará una investigación cuantitativa basada en el procesamiento estadístico de los datos experimentales obtenidos. Mediante métodos cuantitativos se analizará el comportamiento térmico comparativo de las películas en condiciones secas y húmedas, lo que facilitará la identificación objetiva de patrones térmicos y tendencias de degradación. Asimismo, se aplicarán modelos estadísticos y probabilísticos, con especial énfasis en la distribución de Weibull, para realizar predicciones fundamentadas sobre la durabilidad y deterioro del polietileno bajo exposición térmica prolongada. La cuantificación sistemática de estos parámetros será crucial para validar los resultados obtenidos y formular conclusiones con aplicabilidad directa en el sector agrícola.

2.1.1. Descripción del proyecto

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de análisis térmico para evaluar el comportamiento de películas agrícolas de polietileno bajo distintas condiciones ambientales. La propuesta se centra en un diseño que integra tecnologías de medición y procesamiento de datos con la finalidad de registrar y analizar la respuesta térmica del material, lo que a su vez permite caracterizar con precisión su estabilidad y predecir su durabilidad. Para garantizar la repetibilidad del experimento, se utilizó una lámpara halógena de 110 W de potencia, operando a 120 V, posicionada a una distancia de 8 cm de la muestra durante los ciclos de calentamiento.

El sistema fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación Python, debido a su versatilidad, amplia compatibilidad con bibliotecas científicas y capacidad para manejar tareas de adquisición, procesamiento y visualización de datos. A través de este entorno se gestionan tanto la comunicación entre los dispositivos de medición como la transmisión de la información hacia la base de datos en la nube, donde posteriormente se realiza el análisis gráfico y comparativo de los resultados. La Figura 22 muestra el esquema general del sistema propuesto, en el que se ilustra el flujo de información desde la medición térmica hasta el análisis de Weibull y la representación gráfica de los resultados.

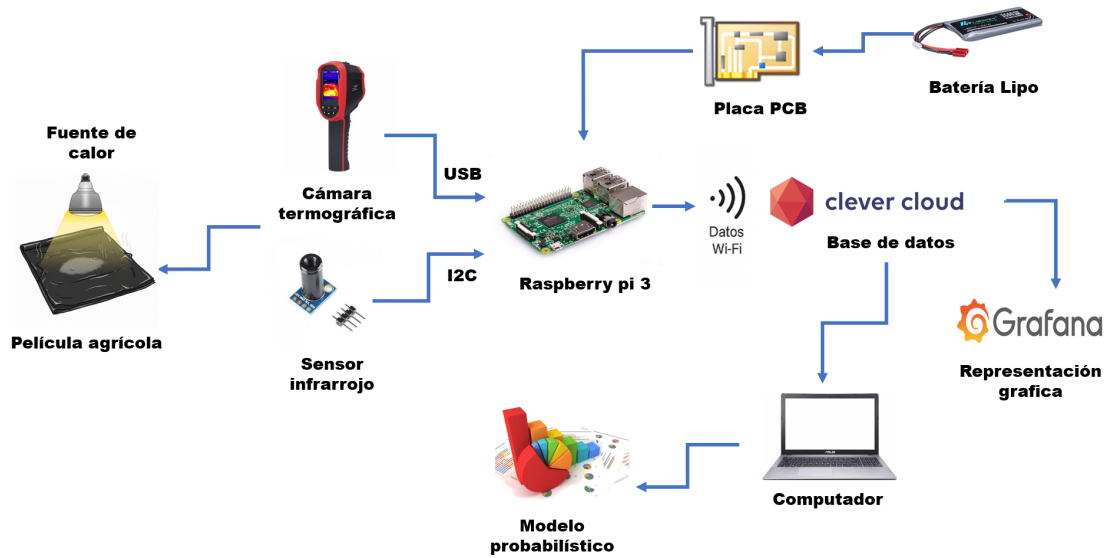


Figura 22: Esquema del sistema de análisis térmico. Fuente: Autoría Propia

2.2. Componentes de la propuesta

En este apartado se presenta una descripción detallada de los componentes físicos y lógicos que conforman el desarrollo del proyecto. Se exponen sus principales características técnicas, acompañadas de una breve explicación de su función y propósito dentro del sistema, resaltando la importancia que cada elemento tiene en el diseño, integración e implementación del prototipo.

2.2.1. Componentes físicos

En el presente proyecto, el hardware está constituido por una serie de componentes físicos que permiten la interacción entre el sistema computacional y el entorno real de medición térmica. Estos elementos cumplen funciones específicas dentro del proceso de adquisición y transmisión de datos, posibilitando la detección, registro y envío de información proveniente de los sensores. Entre ellos se incluyen dispositivos de medición y comunicación que aseguran el correcto funcionamiento del sistema térmico propuesto. A continuación, se describen los principales componentes físicos empleados en el desarrollo de la investigación.

2.2.1.1 Polietileno negro calibre 600

El polietileno negro calibre 600 es una película plástica de alta resistencia ampliamente utilizada en aplicaciones agrícolas, de construcción y protección de superficies debido a su notable durabilidad y flexibilidad. Su pigmentación negra actúa como una barrera efectiva contra la radiación solar, reduciendo significativamente la transmisión de luz y calor, lo que contribuye a prolongar su vida útil en condiciones de intemperie. Este material presenta un espesor nominal de 600 micras, proporcionando una excelente impermeabilidad junto con una resistencia mecánica adecuada frente al desgarro y la tracción. Adicionalmente, su composición basada en polietileno de baja densidad le confiere una estructura flexible que se adapta a diversas condiciones de uso [47]. En la Figura 23 se ilustra el material empleado, mientras que en la Tabla 4 se detallan sus especificaciones técnicas completas.



Figura 23: Polietileno negro calibre 600. Fuente: [47]

Tabla 4: Especificaciones técnicas del material

Parámetro	Especificación típica
Calibre	600 micras
Ancho del rollo	Entre 1,5 m y 6 m
Longitud del rollo	Entre 50 y 110 metros lineales
Peso aproximado	50-70 kg dependiendo de ancho y largo
Color	Negro
Material base	Polietileno de baja densidad

2.2.1.2 Cámara térmica UWEI

La cámara térmica infrarroja portátil UWEI es un dispositivo compacto diseñado para capturar imágenes térmicas en tiempo real, permitiendo visualizar distribuciones de temperatura en superficies sin necesidad de contacto físico. Su formato ergonómico de pistola facilita su manipulación en entornos agrícolas y de campo, mientras que su sistema de sensores térmicos de 32x32 píxeles con capacidad para más de 1000 puntos de lectura convierte la radiación infrarroja en representaciones visuales detalladas. El equipo incorpora una pantalla a color integrada y un almacenamiento interno de 8 GB, lo que resulta ideal para registrar datos e imágenes sin requerir conexión externa constante [48]. Adicionalmente, su interfaz USB permite la transferencia eficiente de datos hacia sistemas como Raspberry Pi o computadores personales para su posterior análisis, como se ilustra en la Figura 24. Las especificaciones técnicas completas de la cámara se detallan en la Tabla 5.



Figura 24: Cámara térmica UWEI. Fuente: [48]

Tabla 5: Características técnicas de la cámara termográfica

Parámetro	Especificación
Resolución infrarroja	32 × 32 píxeles
Rango de temperatura	-20 °C a 300 °C
Precisión	±2 °C o ±2 % de la lectura
Tipo de sensor	Sensor de matriz térmica
Tipo de imagen	Imagen térmica a color
Pantalla integrada	LCD digital color
Almacenamiento interno	8 GB
Formato de imagen	JPG, BMP o formato térmico propietario
Interfaz de datos	USB para carga/transferencia de archivos

2.2.1.3 Sensor infrarrojo MLX90614

El MLX90614 es un sensor de temperatura infrarrojo IR sin contacto, fabricado por Melexis. Este dispositivo mide la temperatura de objetos a distancia, detectando la radiación infrarroja emitida por la superficie del cuerpo analizado. Integra un sistema óptico, un convertidor analógico-digital y una interfaz digital para la transmisión de datos. Su comunicación se realiza mediante el protocolo I2C aunque también puede configurarse con PWM y su diseño encapsulado lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere medir temperatura de materiales expuestos al medio ambiente. En la Figura 25 y en la Tabla 6 se muestran sus especificaciones técnicas [49].



Figura 25: Sensor infrarrojo MLX90614. Fuente: [49]

Tabla 6: Características técnicas del sensor MLX90614

Parámetro	Especificación
Rango de temperatura de objeto	-70 °C a +380 °C
Rango de temperatura del sensor	-40 °C a +125 °C
Precisión	± 0.5 °C en el rango de 0 °C a +50 °C
Resolución	0.02 °C
Tipo de salida	Digital I2C o PWM configurable
Voltaje de operación	3.3 V a 5 V
Corriente típica	1.5 mA
Tiempo de respuesta	0.1 s

2.2.1.4 Raspberry pi 3

La Raspberry Pi 3 es una computadora monoplaca de bajo costo y tamaño compacto, desarrollada por la Raspberry Pi Foundation, está equipada con un procesador de cuatro núcleos ARM Cortex-A53 y es capaz de ejecutar sistemas operativos basados en Linux, como Raspberry Pi OS. La Raspberry Pi 3 ofrece conectividad WiFi y Bluetooth integradas, lo que facilita la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica, esta es compatible con múltiples lenguajes de programación, incluyendo Python y C++, así como con una amplia variedad de bibliotecas para la adquisición de datos, procesamiento de imágenes y envío de información mediante protocolos como MQTT. Gracias a estas características, se convierte en un elemento central en el procesamiento de datos y control del sistema, tal como se observa la Figura 26. En la Tabla 7 se detallan sus principales especificaciones técnicas [50].

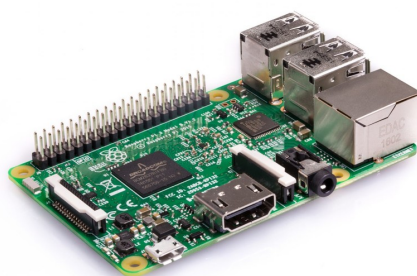


Figura 26: Controlador raspberry pi 3 modelo B. Fuente: [50]

Tabla 7: Características técnicas de la raspberry pi 3 model B

Parámetro	Especificación
Modelo	Raspberry Pi 3 Model B
Procesador	Broadcom BCM2837 – 64-bit
Memoria RAM	1 GB LPDDR2
Conectividad	Wi-Fi 802.11n, Bluetooth 4.1, Ethernet 10/100 Mbps
Puertos USB	4 puertos USB 2.0
Salidas de video	HDMI completo, salida compuesta (jack 3.5 mm)
Almacenamiento	Ranura microSD
GPIO	40 pines GPIO

2.2.1.5 Relay JQC-21FF SPDT

Los relés de 12 V DC, como el modelo JQC-21FF SPDT, constituyen componentes electromecánicos esenciales en sistemas de control electrónico, al permitir la conmutación de cargas de alto voltaje mediante señales de baja tensión. Su principio de operación se basa en la activación de una bobina de 12 V que genera un campo electromagnético, el cual desplaza un brazo móvil para abrir o cerrar los contactos eléctricos. Este mecanismo proporciona un aislamiento galvánico efectivo entre el circuito de control y el circuito de potencia, protegiendo así componentes sensibles como microcontroladores o microordenadores de posibles fluctuaciones de voltaje [51]. En la Figura 27 se muestra la configuración física del dispositivo, mientras que la Tabla 8 recoge sus especificaciones técnicas detalladas.



Figura 27: Rele JQC-21FF SPDT. Fuente: [51]

Tabla 8: Especificaciones técnicas del relé

Parámetro	Especificación
Tensión nominal de bobina	12 V DC
Corriente de conmutación	10 A / 120 V AC / 24 V DC
Tiempo de activación	≤ 10 ms
Tiempo de liberación	≤ 5 ms
Aislamiento eléctrico	Entre la bobina y los contactos
Durabilidad mecánica	Hasta 10 millones de ciclos

2.2.1.6 Diodo 1N4007

El diodo 1N4007 es un rectificador de silicio de uso general diseñado en un encapsulado axial DO-41, ampliamente adoptado por su confiabilidad en aplicaciones de potencia. Esta serie de diodos (1N4001–1N4007) se caracteriza por soportar corrientes promedio de hasta 1 A, con una capacidad de aguante de sobretensiones de hasta 30 A en ráfagas cortas, aunque sus transiciones lentas lo hacen poco adecuado para altas frecuencias. En particular, el 1N4007 destaca por su elevado voltaje inverso repetitivo máximo (VRRM) de 1000 V, lo que lo convierte en una opción óptima en circuitos de rectificación de alto voltaje [52]. Tal y como se muestra en la Figura 28 y en la Tabla 9 se detallan sus principales especificaciones técnicas.



Figura 28: Diodo 1N4007. Fuente: [52]

Tabla 9: Especificaciones técnicas del diodo

Parámetro	Especificación
Voltaje inverso repetitivo	1000 V
Corriente directa promedio	1.0 A
Corriente pico de sobretensión	30 A
Caída de tensión directa	1.1 V / 1 A
Corriente inversa de fuga	5 μ A / 1000 V
Rango de temperatura de operación	-55 °C a +150 °C

2.2.1.7 Convertidor DC-DC LM2596

El LM2596 es un regulador reductor de tipo conmutado (buck converter) diseñado para entregar una salida estable y eficiente con mínima disipación de energía. Puede suministrar hasta 3 A de corriente continua y trabaja a una frecuencia fija de 150 kHz, lo que permite el uso de componentes de filtrado de menor tamaño en comparación con reguladores lineales tradicionales, el LM2596 resulta especialmente útil porque permite reducir voltajes de entrada (por ejemplo, 12 V de una batería o adaptador) hasta niveles adecuados para alimentar microcontroladores, microordenadores o módulos auxiliares (5 V o 3.3 V), asegurando un suministro estable y eficiente sin riesgo de dañar los componentes sensibles [53]. En la Figura 29 y en la Tabla 10 se detallan sus principales especificaciones técnicas.



Figura 29: Modulo LM2596. Fuente: [53]

Tabla 10: Especificaciones técnicas del regulador de voltaje

Parámetro	Especificación
Corriente de salida continua	3 A
Frecuencia de conmutación	150 kHz
Rango de tensión de entrada	Hasta 40 V DC
Voltaje de salida ajustable	1.2 a 37 V
Corriente de <i>standby</i>	80 μ A
Funciones de protección	Limitación de corriente, <i>shutdown</i> térmico

2.2.1.8 Batería lipo – tattu

Las baterías LiPo (litio-polímero) tipo Tattu 450 mAh 11.1 V 3S1P son ampliamente utilizadas en sistemas de energía portátiles debido a su alta densidad energética, capacidad de entrega de corriente sostenida elevada y bajo peso. Su configuración 3S1P implica tres celdas conectadas en serie y una en paralelo, lo que proporciona un voltaje nominal de 11.1 V. Estas baterías están diseñadas con tecnología de apilamiento avanzado, utilizando materias primas de polímero de litio de calidad japonesa y coreana, lo que asegura estabilidad, consistencia y durabilidad en aplicaciones exigentes como drones FPV o prototipos de robótica ligera [54]. En la Figura 30 y en la Tabla 11 se detallan sus principales especificaciones técnicas.



Figura 30: Batería lipo – tattu. Fuente: [54]

Tabla 11: Especificaciones técnicas de la batería lipo

Parámetro	Especificación
Capacidad nominal	450 mAh
Voltaje	11.1 V (3S1P)
Tasa continua de descarga	75 C
Tasa máxima de ráfaga	150 C
Peso	Aproximadamente 42 g
Dimensiones	45 mm × 24 mm × 21 mm

2.2.2. Componentes lógicos

En esta sección se describen los componentes lógicos que intervienen en la programación y funcionamiento del sistema de adquisición y análisis térmico, los cuales permiten ejecutar de forma correcta las tareas establecidas durante el proceso experimental. Estos componentes son esenciales para garantizar la adecuada comunicación entre los dispositivos de medición, la transferencia eficiente de los datos hacia la base de datos en la nube y el procesamiento estadístico y predictivo de la información.

2.2.2.1 Entorno de desarrollo en raspberry Pi

Thonny es un entorno de desarrollo integrado (IDE) diseñado específicamente para el lenguaje de programación Python, ampliamente empleado en contextos educativos, de investigación y en el desarrollo de sistemas embebidos como la Raspberry Pi. Su diseño intuitivo y su interfaz organizada permiten escribir, ejecutar y depurar programas de manera sencilla, proporcionando un entorno de trabajo limpio, accesible y adaptable a distintos niveles de experiencia en programación. Entre sus principales ventajas se destacan las funciones de ejecución paso a paso, la inspección de variables en tiempo real y la visualización del flujo lógico del programa, herramientas que resultan esenciales para la depuración y optimización del software. Además, Thonny integra de forma nativa el intérprete de Python, lo que facilita la ejecución inmediata de los scripts sin requerir configuraciones adicionales o entornos externos. Por último, este IDE admite bibliotecas científicas de Python, como Tkinter, utilizada para el diseño de interfaces gráficas; paho-mqtt, que permite la comunicación mediante el protocolo MQTT, pymysql, destinada a la conexión y gestión de bases de datos MySQL y matplotlib o numpy, empleadas para el procesamiento, análisis y visualización de datos. La compatibilidad con estas bibliotecas amplía significativamente las capacidades del entorno, permitiendo desarrollar aplicaciones robustas que integran adquisición, procesamiento y pre-

sentación de información de manera eficiente dentro de la plataforma Raspberry Pi [55]. En la Figura 31 se muestran las principales áreas de trabajo del entorno de desarrollo, donde se identifican el editor de código, la consola de ejecución y el explorador de archivos, elementos que permiten mantener una estructura ordenada y eficiente durante el proceso de programación.

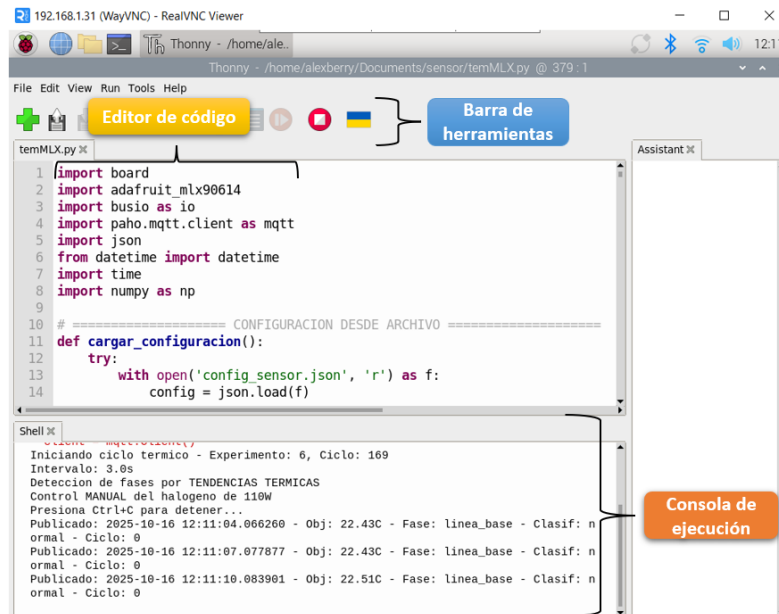


Figura 31: Distribución de los componentes principales del IDE Thonny. Fuente: Autoría Propia

El entorno de desarrollo integrado IDE de Thonny se estructura en torno a componentes claves diseñados para optimizar la experiencia en Python, particularmente para desarrolladores en fase de aprendizaje. A continuación, se desglosan sus módulos principales en primer lugar el editor de código es la parte central del entorno dado que no solo permite la escritura y edición del código fuente, sino que lo dota de legibilidad mediante funciones avanzadas como el resaltado de sintaxis, autocompletado contextual y sangría automática.

Esta capa de asistencia agiliza la escritura y reduce errores sintácticos, mientras que la posibilidad de trabajar con múltiples archivos en pestañas favorece una organización modular del proyecto. Complementando lo anterior en la parte superior se encuentra la barra de herramientas que ofrece un acceso inmediato a las operaciones esenciales como ejecutar, depurar, guardar a través de un diseño minimalista que elimina la necesidad de recorrer menús, contribuyendo significativamente a un flujo de trabajo ágil. Por último, la consola de ejecución actúa como

un puente dinámico entre el desarrollador y el intérprete de Python en este espacio no solo se visualizan los resultados y mensajes de error, sino que también permite la interacción directa con el código en tiempo real, una funcionalidad crucial para la verificación inmediata de comportamientos, el diagnóstico de fallos y la depuración interactiva. La implementación del sistema de adquisición en la Raspberry Pi utilizó un conjunto definido de programas y librerías, detallados en la Tabla 12 junto a sus respectivas versiones. Estos componentes fueron de total prioridad para gestionar la comunicación con los sensores, el procesamiento interno de los datos y su posterior envío a través del protocolo MQTT.

Tabla 12: Listado de software y librerías para la raspberry pi

Categoría	Nombre	Versión
Sistema Operativo	Raspberry Pi OS	12 (bookworm)
Lenguaje de Programación	Python	3.9
Interfaz/Gráficos	PyQt5	5.15.7
Comunicación IoT	Paho-MQTT	2.1.0
Driver de Sensor	Adafruit-Blinka	8.22.0
Driver de Sensor	Adafruit-CircuitPython-MLX90614	3.1.5
Cálculo Científico	NumPy	1.24.3
Conector de Base de Datos	MySQL Connector/Python	8.2.0
Servicio/Broker MQTT	Mosquitto	2.0.15
Visualización	Grafana	10.2.2

2.2.2.2 Librería adafruit MLX90614

La librería Adafruit MLX90614 constituye un componente lógico fundamental para establecer la comunicación y el control del sensor MLX90614, un dispositivo de medición de temperatura infrarroja sin contacto ampliamente empleado en aplicaciones de monitoreo térmico. Desarrollada por Adafruit Industries, esta librería ofrece un conjunto de funciones que facilitan la lectura precisa de las temperaturas tanto del objeto como del entorno, utilizando el protocolo de comunicación I2C implementado en la Raspberry Pi. Su integración en el lenguaje Python permite acceder de forma directa y eficiente a los registros internos del sensor, optimizando el proceso de adquisición de datos y eliminando la necesidad de programar rutinas de bajo nivel, lo que contribuye a una mayor estabilidad y modularidad del sistema [56].

2.2.2.3 Librería `paho.mqtt.client`

La librería Paho MQTT Client implementa el protocolo MQTT, estándar ampliamente adoptado en entornos de Internet de las Cosas (IoT) por su eficiencia en transmisión de datos y mínimo consumo de recursos. Desarrollada por la Eclipse Foundation, esta herramienta proporciona los mecanismos necesarios para establecer una comunicación confiable entre publicadores como la Raspberry Pi- y suscriptores como una base de datos en la nube, facilitando el intercambio de mensajes de forma ligera y estable. Su integración con Python permite implementar clientes MQTT capaces de gestionar tópicos, manejar eventos de conexión y desconexión, así como garantizar la entrega confiable de datos térmicos procedentes de los sensores. Esta combinación de robustez y facilidad de integración convierte a Paho MQTT Client en un componente fundamental dentro de la arquitectura de comunicación del sistema de monitoreo térmico, asegurando la sincronización continua entre la infraestructura local y los sistemas remotos [57].

2.2.2.4 Librería Numpy

La librería NumPy constituye una de las herramientas esenciales para el desarrollo de aplicaciones científicas y de ingeniería en Python, debido a su capacidad para manejar eficientemente grandes volúmenes de datos numéricos. Su estructura central se basa en los arreglos multidimensionales (arrays), los cuales permiten realizar operaciones matemáticas y estadísticas de manera vectorizada, optimizando el uso de los recursos computacionales y reduciendo significativamente los tiempos de procesamiento [58].

Un arreglo en NumPy puede entenderse como una colección ordenada de datos del mismo tipo, organizados en una o más dimensiones, estos arreglos pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, según la naturaleza de la información y el tipo de análisis que se desee realizar. Por ejemplo, un arreglo unidimensional puede emplearse para almacenar una secuencia de lecturas térmicas; uno bidimensional, para representar una matriz de valores de temperatura; y uno tridimensional, para estructurar información de imágenes térmicas o mapas de calor, como se ilustra en la Figura [32].

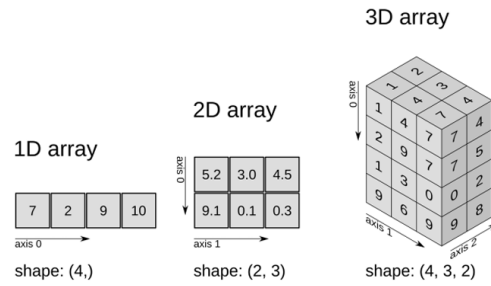


Figura 32: Tipos de arreglos en 1D, 2D y 3D: [58]

La creación de arreglos en NumPy se realiza mediante la función `numpy.array()`, la cual permite definir estructuras flexibles y manipulables de manera eficiente. Asimismo, la librería incluye una amplia variedad de funciones para el cálculo estadístico, la transformación de datos y la aplicación de operaciones algebraicas avanzadas, convirtiéndola en una herramienta indispensable para el análisis numérico, la simulación y el procesamiento de información en proyectos científicos y tecnológicos [58].

2.2.2.5 Librería PyQt5

PyQt5 es un conjunto de bindings de Python para el framework Qt, una de las herramientas de desarrollo de interfaces gráficas más completas y ampliamente utilizadas. Proporciona una extensa colección de componentes visuales y funcionales que permiten crear aplicaciones de escritorio modernas y multiplataforma [59]. En el ámbito de este proyecto, PyQt5 fue seleccionado para implementar la interfaz gráfica de usuario del sistema de adquisición térmica. Esta elección permitió desarrollar una aplicación desktop funcional e intuitiva que centraliza el control operativo del sistema embebido.

A través de esta interfaz, fue posible monitorear en tiempo real las lecturas de los sensores, gestionar los ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento, así como iniciar y detener la adquisición de datos, en el caso de la cámara termográfica PyQt5 sirvió para poder procesar y mostrar los datos adquiridos de cada imagen termográfica. La capacidad de PyQt5 para integrarse eficientemente con el hardware de la Raspberry Pi y con otras librerías científicas como NumPy resultó fundamental para la arquitectura del software. Asimismo, su sistema de señales y slots facilitó la programación de eventos asíncronos, garantizando una interfaz responsive durante las operaciones de medición.

2.2.3. Herramientas y protocolos del sistema

En este apartado se presentan las principales herramientas y protocolos que intervienen en el funcionamiento del sistema implementado. Estos elementos permiten gestionar los datos obtenidos, mantener la comunicación remota y asegurar una administración eficiente del entorno de desarrollo. Su integración garantiza la correcta interacción entre el hardware y el software, así como la integridad, accesibilidad y seguridad de la información procesada.

2.2.3.1 MySQL

MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) ampliamente utilizado en el ámbito científico, académico e industrial por su eficiencia, escalabilidad y compatibilidad multiplataforma. Su funcionamiento se basa en el lenguaje SQL (Structured Query Language), que permite realizar operaciones estructuradas para la creación, modificación y consulta de datos. Gracias a su arquitectura cliente-servidor, MySQL posibilita que distintos dispositivos o programas se conecten simultáneamente a un mismo servidor de base de datos, lo que resulta esencial en sistemas distribuidos o de adquisición remota de información [60]. MySQL estructura la información en bases de datos compuestas por tablas, las cuales representan entidades específicas interrelacionadas. Internamente cada tabla se compone de columnas que definen los atributos a almacenar, como temperatura, fecha, hora o condición del material y filas, que corresponden a registros individuales generados en cada medición o experimento. Este esquema relacional facilita la conexión estructurada entre distintas tablas a través de claves primarias y foráneas, lo que asegura la integridad referencial y la coherencia global de los datos.

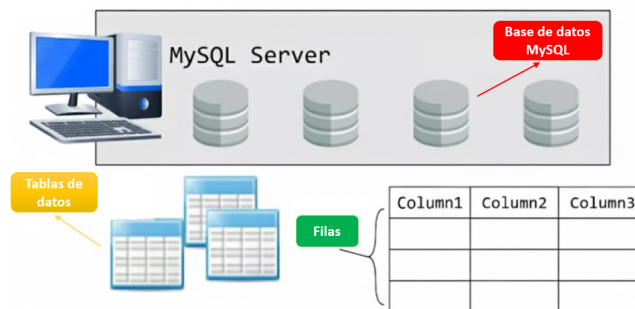


Figura 33: Estructura general del sistema de gestión de bases de datos MySQL. Fuente: [60]

La Figura 33 muestra de forma esquemática la estructura básica de MySQL, donde se observan los componentes principales que intervienen en su funcionamiento. En ella se aprecia cómo el servidor MySQL gestiona múltiples bases de datos, cada una conformada por diferentes tablas que contienen información organizada en filas y columnas. Esta organización jerárquica facilita el almacenamiento estructurado y la rápida recuperación de información, lo cual resulta indispensable para el análisis y procesamiento de datos experimentales.

Además, MySQL incorpora una amplia gama de comandos basados en el lenguaje SQL, los cuales permiten manipular y administrar la información almacenada en las bases de datos. Estos comandos se clasifican en distintas categorías según su propósito: definición de datos, manipulación de datos y control de datos. Entre los más utilizados se encuentran SELECT, INSERT, UPDATE y DELETE, que permiten consultar, agregar, modificar y eliminar registros, respectivamente. El uso de estas sentencias posibilita la realización de consultas complejas, la aplicación de filtros específicos y la generación de reportes automatizados a partir de los datos experimentales almacenados. En la Tabla 13 se resumen algunos de los comandos más representativos del lenguaje SQL utilizados en MySQL, junto con una breve descripción de su propósito y un ejemplo práctico de su aplicación.

Tabla 13: Comandos SQL básicos y sus funciones

Comando SQL	Descripción	Ejemplo de uso
SELECT	Permite consultar o extraer información específica de una tabla.	SELECT * FROM mediciones
INSERT	Inserta un nuevo registro o fila en una tabla.	INSERT INTO mediciones
UPDATE	Modifica uno o varios campos de registros existentes.	UPDATE mediciones SET
DELETE	Elimina registros de una tabla según una condición establecida.	DELETE FROM mediciones
CREATE TABLE	Crea una nueva tabla dentro de la base de datos.	CREATE TABLE mediciones
DROP TABLE	Elimina una tabla completa y todos sus datos.	DROP TABLE mediciones;

2.2.3.2 PhpMyAdmin

phpMyAdmin es una aplicación web de código abierto desarrollada en PHP que proporciona una interfaz gráfica intuitiva para la administración de bases de datos MySQL y MariaDB. Su principal ventaja reside en permitir la ejecución de operaciones complejas sin requerir el uso directo de la línea de comandos, simplificando así la gestión para usuarios con distintos niveles de experiencia técnica.

Entre sus capacidades phpMyAdmin ofrece una interfaz integral para la gestión de bases de datos permitiendo la creación y modificación de tablas, vistas y usuarios, la ejecución de consultas SQL, y operaciones de importación, exportación y respaldo. Para los fines de este proyecto, su rol principal es el de una plataforma de administración remota, donde se centraliza la organización y supervisión de los registros térmicos que la Raspberry Pi transmite a la infraestructura en la nube.

Esta herramienta permite verificar la estructura de las tablas, monitorizar el flujo de datos procedente del protocolo MQTT y validar la integridad de la información antes de su procesamiento en Grafana. La Figura 34 ilustra la interfaz de phpMyAdmin, destacando su capacidad para gestionar volúmenes significativos de datos sin demandar conocimientos avanzados de programación [61].

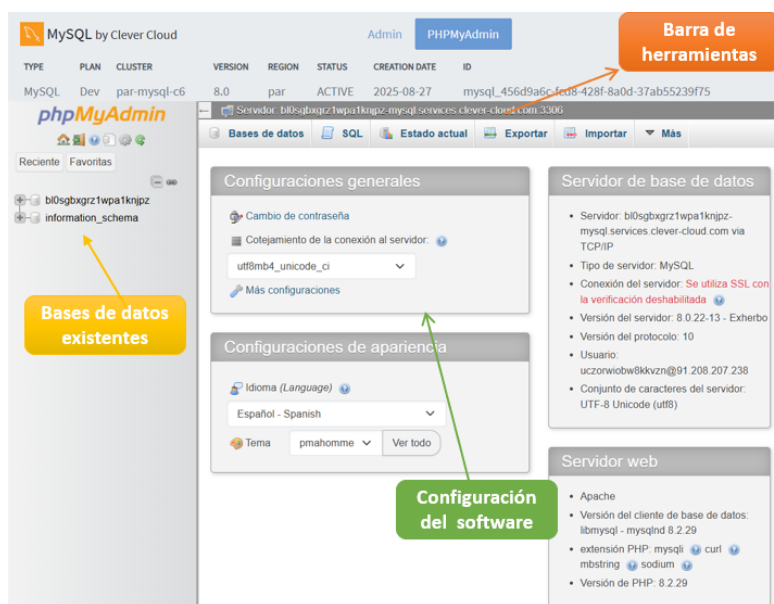


Figura 34: Interfaz PhpMyADMIN. Fuente: Autoría Propia [61]

2.2.3.3 Clever cloud

Clever Cloud es una plataforma de computación en la nube del tipo PaaS (Platform as a Service) que ofrece un entorno optimizado para desplegar, administrar y escalar aplicaciones o bases de datos sin necesidad de intervenir directamente en la infraestructura del servidor. Su diseño se orienta a la automatización y estabilidad del servicio, permitiendo que los desarrolladores se concentren en la funcionalidad del software mientras la plataforma gestiona tareas críticas como la asignación de recursos, la supervisión del rendimiento, las actualizaciones automáticas y las copias de seguridad.

Entre sus principales ventajas destacan la escalabilidad dinámica, que ajusta los recursos de forma automática según la demanda; la alta disponibilidad, que garantiza la continuidad operativa ante posibles fallos y la seguridad avanzada, que incluye autenticación de usuarios, encriptación de datos y gestión controlada de accesos [62]. Además, Clever Cloud es compatible con una amplia variedad de lenguajes y servicios, incluyendo MySQL, PostgreSQL, Redis y MongoDB, lo que la convierte en una solución flexible tanto para entornos de desarrollo como de producción. En la Figura 35 se muestra la aplicación de Clever Cloud



Figura 35: Software Clever Cloud. Fuente: [62]

2.2.3.4 VNC viewer

VNC es una herramienta de software que permite el acceso remoto y control total de otro dispositivo a través de una conexión de red, utilizando el protocolo VNC (Virtual Network Computing). Esta aplicación posibilita visualizar en tiempo real el escritorio de la Raspberry Pi desde otro equipo, ya sea una computadora o un dispositivo móvil, lo que facilita las labores de configuración, supervisión del sistema. VNC Viewer ofrece una interfaz intuitiva que permite interactuar con el sistema como si se estuviera físicamente frente a él, reduciendo la necesidad de desplazamientos y optimizando el tiempo de trabajo. Además, soporta conexiones seguras mediante cifrado, garantizando la privacidad y la integridad de los datos transmitidos durante la sesión. En la Figura 36 se muestra el entorno del software VNC Viewer, su compatibilidad multiplataforma lo convierte en una solución práctica para entornos de control y monitoreo remoto en proyectos basados en IoT y sistemas embebidos [63].

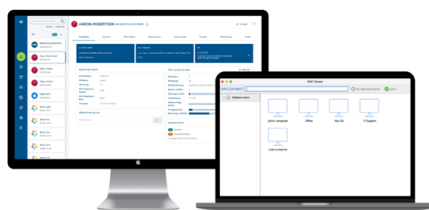


Figura 36: Interfaz VNC Viewer. Fuente: [63]

2.2.3.5 SSH

SSH es un protocolo de comunicación de red que permite el acceso remoto y seguro a dispositivos mediante el uso de cifrado avanzado, protegiendo así la transmisión de datos frente a posibles interceptaciones. En el contexto de sistemas basados en Raspberry Pi, SSH es ampliamente empleado para la administración y configuración del dispositivo sin necesidad de una conexión física directa, facilitando el trabajo en entornos distribuidos. En la Figura [37] se muestra la estructura del protocolo de comunicación [64].



Figura 37: Protocolo de comunicación SSH. Fuente: [65]

2.2.4. Plataforma de monitoreo

En el desarrollo de sistemas IoT orientado seguimiento de variables físicas, contar con una plataforma de monitoreo en tiempo real es esencial para centralizar la información y permitir su interpretación de manera visual y accesible. En el caso de nuestro sistema, la plataforma de monitoreo permite supervisar continuamente los datos obtenidos por los sensores y la cámara termográfica, presentándolos en un formato claro que facilita la toma de decisiones y la detección temprana de condiciones críticas. Esta plataforma permite visualizar gráficas, crear alertas, consultar historiales y filtrar información según parámetros definidos por el usuario (ver Figura [38]). Gracias a su interfaz intuitiva y su flexibilidad, Grafana se convierte en un recurso ideal para la supervisión continua de sistemas de adquisición y análisis de datos, garantizando que la información esté siempre disponible para su consulta y gestión en tiempo real [65].



Figura 38: Software Grafana. Fuente: [65]

Para este proyecto se propone el diseño e implementación de una plataforma de monitoreo desarrollada en Grafana, lo cual tiene como finalidad la recopilación, visualización y análisis de los datos obtenidos por los sensores y la cámara termográfica, como la temperatura superficial registrada por el sensor infrarrojo.

2.2.5. Diseño estructural del sistema experimental térmico

La plataforma técnica experimental para la realización de pruebas térmicas fue concebida con dimensiones de $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 1\text{ m}$, tal como se muestra en la Figura [39]. Su diseño estructural garantiza rigidez y estabilidad mecánica, además de facilitar la disposición ordenada de los componentes del sistema de adquisición y control térmico. En la sección superior de la plataforma se integró el sistema de medición, responsable de la captura y procesamiento de los datos térmicos obtenidos durante las pruebas. En esta zona se instalaron el sensor infrarrojo MLX90614 y la cámara termográfica, orientados hacia la parte inferior con el fin de registrar la radiación infrarroja emitida por la superficie del polietileno expuesto al proceso de calentamiento controlado.

El montaje experimental consta de tres elementos principales dispuestos verticalmente, en la zona central se ubicó una superficie de soporte, diseñada para alojar la lámina de polietileno agrícola y garantizar una base estable que permitiera una observación termográfica y una distribución homogénea del calor. Justo debajo en la parte inferior de la estructura, se posicionó la fuente de calor controlada, responsable de inducir las variaciones térmicas en la muestra.

La distancia entre esta fuente y la película de polietileno es aproximadamente 8 cm esta distancia se calibró experimentalmente para mantener una transferencia de calor uniforme y prevenir puntos críticos de sobrecalentamiento. Finalmente, durante las pruebas, el sensor MLX90614 y la cámara termográfica registraron de forma continua la respuesta térmica del material, lo que facilitó el análisis de su comportamiento frente al incremento de temperatura y la evaluación de la evolución de sus propiedades bajo distintas condiciones de calentamiento.

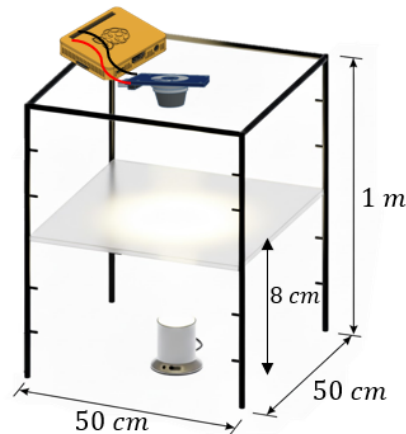


Figura 39: Diseño estructural del sistema de medición térmica de películas de polietileno. Fuente: Autoría Propia

Las muestras de película agrícola empleadas en el estudio corresponden a láminas de polietileno de baja densidad (PEBD) con dimensiones de 26 cm de ancho por 38 cm de largo, como se observa en la Figura 40. En el centro geométrico de la lámina se definió un punto caliente o centro de calentamiento, localizado en las coordenadas (19,13), donde incide directamente la radiación de la lámpara. Esta disposición permite obtener un mapa térmico representativo del comportamiento del material ante una fuente puntual de calor, observando la propagación de temperatura desde el foco central hacia los bordes.

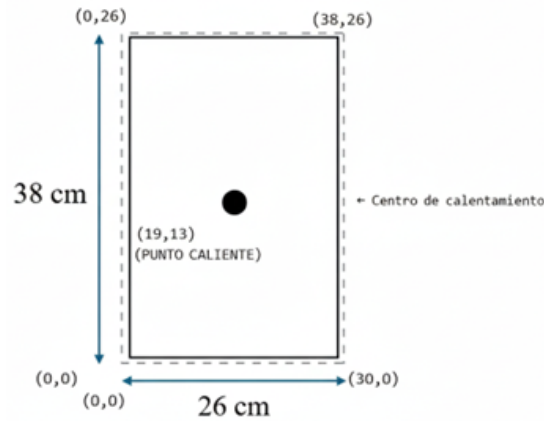


Figura 40: Configuración geométrica estandarizada de las muestras de polietileno. Fuente: Autoría Propia

2.2.6. Diseño del sistema portátil de monitoreo térmico

Se desarrolló un sistema portátil de monitoreo térmico como una unidad compacta e integrada, cuyas dimensiones son de 17.6 cm \times 16.4 cm como se especifican en la Figura 41. El diseño prioriza la portabilidad, la eficiencia energética y la fiabilidad operativa, características que lo hacen apto para la captura de mediciones térmicas precisas en entornos tanto controlados como en exteriores de este modo, el sistema garantiza la integridad de los datos y facilita su transporte y despliegue.

En su interior, el sistema organiza los diferentes módulos electrónicos de forma estructurada para optimizar el flujo de señal y minimizar interferencias. En el centro se encuentra una Raspberry Pi 3, que actúa como núcleo de control y procesamiento, encargada de gestionar la lectura de los sensores, el almacenamiento temporal de datos y la comunicación con la base de datos remota. A su lado se integra un circuito de protección y regulación, cuya función es mantener la estabilidad eléctrica del sistema, proteger los componentes ante posibles variaciones de voltaje y distribuir la energía proveniente de la batería recargable de litio de 11.1 V, garantizando un funcionamiento continuo y seguro.

En la parte frontal del sistema se ubican los dispositivos de medición térmica: el sensor infrarrojo MLX90614 y la cámara termográfica, orientados hacia el exterior para registrar la radiación emitida por la superficie del polietileno agrícola durante las pruebas experimentales. Esta disposición permitirá obtener tanto mediciones puntuales de temperatura como imágenes térmicas de alta resolución, posibilitando un análisis integral del comportamiento térmico del material bajo diferentes condiciones.

Todos los módulos electrónicos y ópticos se integran dentro de una carcasa ligera y resistente, cuyo diseño ofrece protección mecánica, facilita el transporte y asegura una ventilación interna adecuada. Esta configuración no solo garantiza la estabilidad del sistema durante las pruebas, sino que también promueve un desempeño confiable bajo distintas condiciones operativas. Por otro lado, la arquitectura modular del conjunto facilita futuras ampliaciones, tales como la incorporación de sensores adicionales o nuevas interfaces de comunicación, lo que amplía significativamente su versatilidad y proyección para aplicaciones experimentales más complejas.

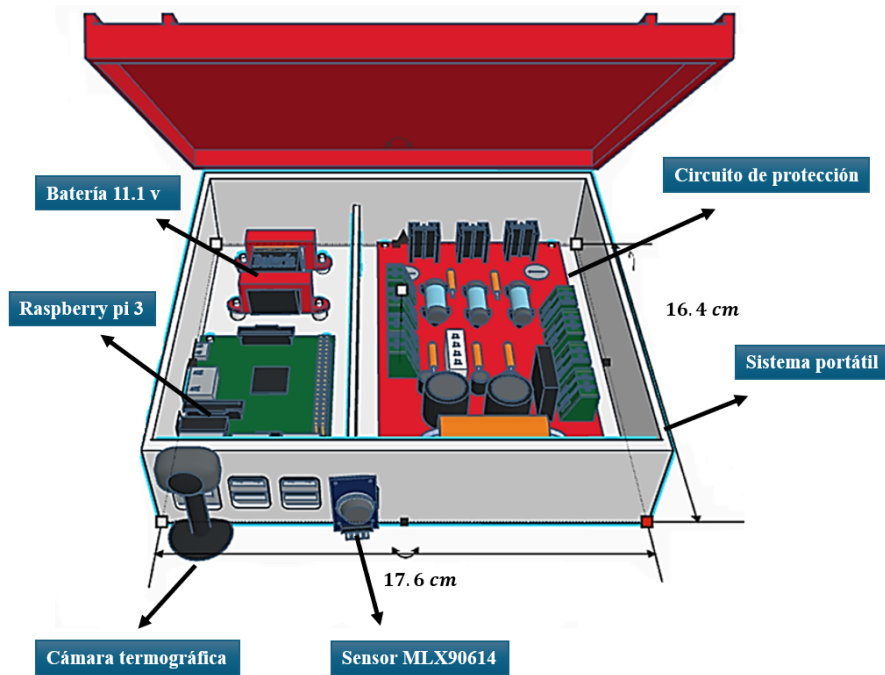


Figura 41: Modelo 3D del prototipo portátil. Fuente: Autoría Propia

2.2.7. Diseño electrónico del sistema de medición

El diseño electrónico del sistema de medición se desarrolló a partir de la selección de componentes que ofrecen la precisión y estabilidad requeridas para el registro térmico de las películas de polietileno. Este diseño se orienta a garantizar una operación confiable, continua y eficiente durante las pruebas experimentales. En la Figura 42 se presenta el esquema general del circuito, donde la Raspberry Pi 3 se configura como el núcleo central de control y procesamiento, encargada de coordinar la adquisición de datos y establecer la comunicación directa con los dispositivos de medición térmica. Para la adquisición puntual de temperatura se utilizó el sensor infrarrojo MLX90614, el cual dispone de cuatro terminales principales: VIN, que recibe la alimentación de 3.3 V proveniente de la placa; GND, que establece la referencia de tierra común con el sistema; y las líneas de datos SCL y SDA, correspondientes al bus de comunicación I2C, a través del cual se transmiten digitalmente las lecturas hacia la Raspberry Pi.

Por otra parte, la cámara termográfica UWEI se conecta físicamente a la Raspberry Pi mediante un puerto USB, permitiendo el acceso directo a las imágenes térmicas capturadas sin requerir circuitos adicionales de adaptación o conversión, esta configuración posibilita el funcionamiento simultáneo de ambos sensores, de modo que las lecturas puntuales de temperatura y los mapas térmicos se obtienen bajo un mismo marco de sincronización y referencia energética. El sistema se alimenta mediante una batería recargable de 11.4 V, cuya energía se distribuye hacia los distintos módulos a través de una placa PCB de interconexión, asegurando una distribución eléctrica estable y segura durante el proceso de medición.

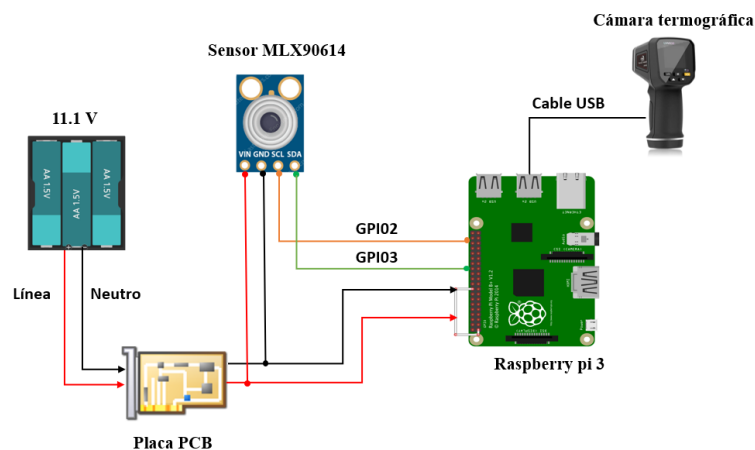


Figura 42: Esquema electrónico del sistema. Fuente: Autoría Propia

El circuito PCB, mostrado en la Figura 43, es parte del sistema electrónico, al integrar en una sola placa las etapas de alimentación, protección, conmutación y regulación, necesarias para garantizar un funcionamiento estable y seguro del conjunto. La topología parte de una fuente primaria compuesta por una batería Li-ion en configuración 3S, con un voltaje nominal de 11,1 V, que suministra energía a todos los módulos del sistema.

Desde el bus principal, la energía se distribuye a los distintos bloques funcionales, el primer eslabón es el módulo de conmutación, que emplea un relé para controlar el flujo de corriente hacia la etapa de regulación. Este componente tiene una doble función habilita o interrumpe la alimentación según el estado operativo y, al mismo tiempo, protege al sistema de una conexión inversa de la batería, previniendo así daños en los circuitos sensibles.

Complementariamente, se incorporan diodos rectificadores que actúan como elementos de protección y aislamiento, bloqueando el flujo inverso de corriente y amortiguando transitorios eléctricos. A continuación, la energía regulada ingresa a la etapa de conversión a 5 V, cuyo propósito es adaptar el voltaje de entrada a los niveles que exigen la Raspberry Pi y los sensores térmicos. Dicha etapa se complementa con capacitores de filtrado y desacoplo, encargados de estabilizar la tensión ante variaciones bruscas de carga y suprimir el ruido eléctrico proveniente de la fuente. En conjunto, este diseño de potencia garantiza una alimentación limpia, estable y protegida, lo cual es un requisito fundamental para el correcto funcionamiento del sistema de medición y la confiabilidad de los datos adquiridos.

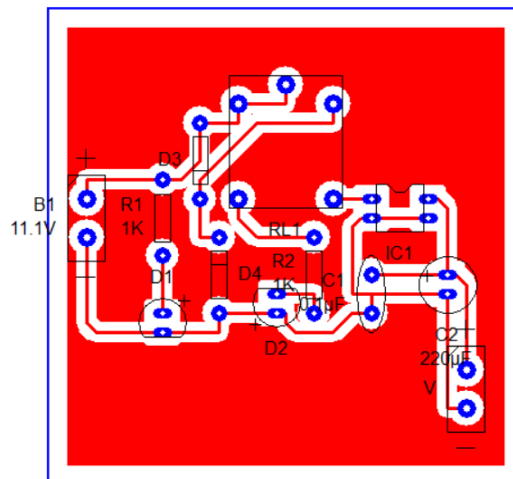


Figura 43: Diseño electrónico de la placa PCB. Fuente: Autoría Propia

Para comprender el funcionamiento del circuito PCB, en la Figura 44 se muestra el esquema electrónico que integra las etapas de alimentación, protección y regulación. La fuente principal es una batería Li-ion en configuración 3S (B1) con voltaje nominal de 11,1 V. En la etapa inicial, el diodo D1 y la resistencia R1 conforman un indicador luminoso que confirma el encendido del sistema. Posteriormente, la corriente pasa por el relé RL1, encargado de controlar el flujo de energía y cortar la alimentación ante una conexión de polaridad inversa.

El circuito incorpora además los diodos D3 y D4 como medida de seguridad reforzada, el diodo D3, configurado en paralelo con la bobina del relé, funciona como un diodo de retorno (flyback), suprimiendo los picos de tensión transitorios que produce la desactivación del relé. Por otro lado, D4 se encarga de bloquear el paso de corriente ante una conexión inversa de la batería, evitando así daños por polaridad incorrecta. Frente a un error de conexión, el relé RL1 se activa para interrumpir inmediatamente la corriente hacia la etapa de regulación; al mismo tiempo, el conjunto R2-D2 se ilumina para señalar visualmente la falla, lo que permite una identificación rápida del problema. Posteriormente, en la etapa de regulación el circuito integrado IC1 convierte los 11,1 V de entrada en una salida estable de 5 V. Para garantizar la calidad de esta señal, los condensadores C1 (0,1 μF) y C2 (220 μF) se encargan de filtrar el ruido eléctrico y estabilizar el voltaje, proporcionando así una alimentación limpia y confiable para los componentes sensibles del sistema.

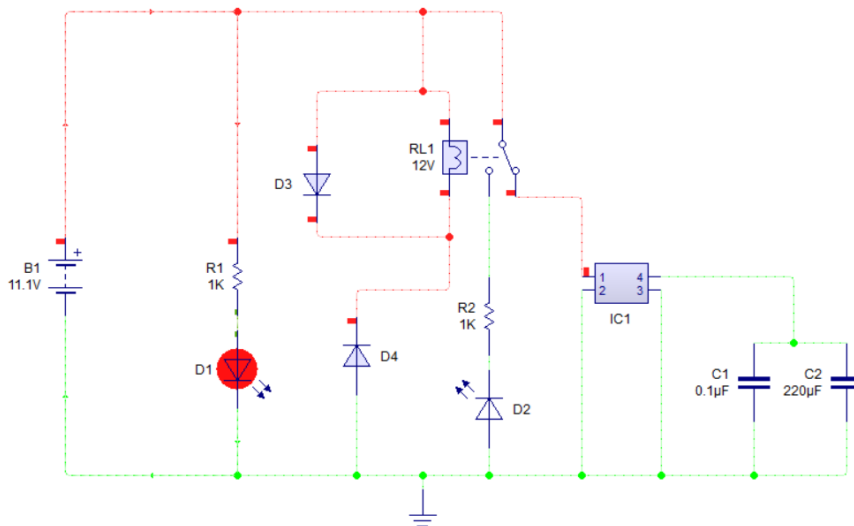


Figura 44: Esquema electrónico del circuito PCB que integra las etapas de alimentación, protección y regulación del sistema. Fuente: Autoría Propia

2.2.8. Diseño del sistema de comunicación

El sistema de comunicación se basa en el protocolo MQTT, una arquitectura de mensajería ligera ampliamente utilizada en entornos de Internet de las Cosas (IoT) por su eficiencia y bajo consumo de recursos en la transmisión de datos entre dispositivos. En la Figura 45 se presenta el diseño general del sistema de comunicación implementado, donde se integran los componentes encargados de la adquisición, envío, recepción y visualización de los datos térmicos obtenidos.

El flujo de información comienza con los dispositivos de medición un sensor infrarrojo y una cámara termográfica cuyas lecturas son procesadas por una Raspberry Pi, este dispositivo funciona como un cliente MQTT publisher, encargado de recopilar y publicar los datos hacia un broker central. A continuación, el broker MQTT actúa como un nodo de distribución, recibiendo los mensajes y encargándose de su enrutamiento a todos los clientes suscritos denominado subscribers en el sistema.

Entre estos clientes se encuentran la base de datos MySQL, la plataforma de visualización Grafana y una computadora local, los cuales reciben los datos de forma simultánea para llevar a cabo su almacenamiento, análisis y representación gráfica respectivamente. Para garantizar una comunicación robusta, se integra un router local que asegura la transmisión de datos dentro de una red interna. Esta configuración no solo reduce la latencia, sino que también elimina la dependencia de conexiones externas, contribuyendo directamente a una mayor confiabilidad del sistema de monitoreo térmico.

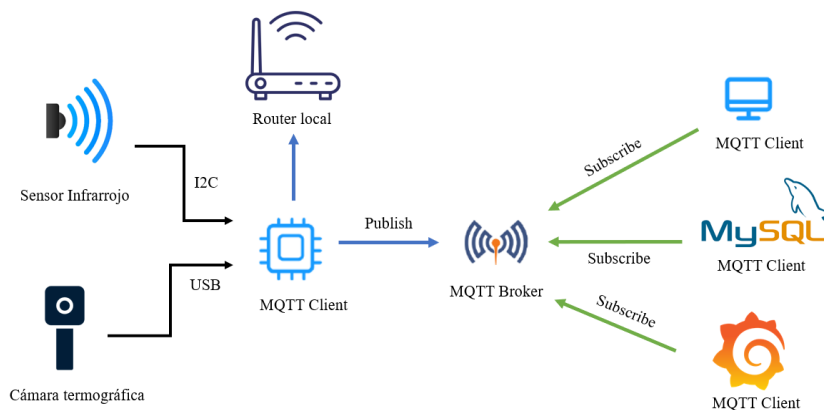


Figura 45: Diseño del sistema de comunicación para el envío y almacenamiento de datos. Fuente: Autoría Propia

El diseño del sistema para la recopilación de datos incorpora un sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 y una cámara termográfica UWEI, ambos integrados en una unidad central de procesamiento basada en Raspberry Pi, tal como se muestra en la Figura 46. El MLX90614 se comunica con la Raspberry Pi mediante el protocolo I2C, lo que permite la captura periódica de la temperatura del objeto y de la temperatura ambiente. Posteriormente, la Raspberry Pi procesa estas lecturas, les añade un sello de tiempo y las publica en el broker MQTT bajo el tópico sensor/IR/temperatura para su almacenamiento y análisis posterior.

La cámara termográfica UWEI se conecta a la Raspberry Pi vía USB para la adquisición de imágenes térmicas, una vez capturadas, la Raspberry Pi procesa estas imágenes localmente, extrayendo parámetros clave como temperaturas máxima, mínima y media tal y como se ilustra en la Figura 46. Posteriormente, los resultados se publican en el broker MQTT bajo el tópico sensor/camara/termografía, lo que permite un flujo de información optimizado para su visualización y análisis en tiempo real.

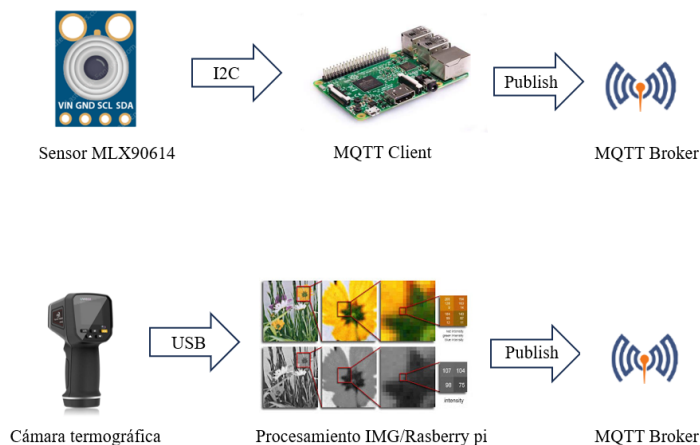


Figura 46: Diseño del sistema de adquisición de datos. Fuente: Autoría propia

2.2.8.1 Algoritmo de programación del publicador del sensor

El algoritmo de programación del publicador del sensor inicia con la configuración del dispositivo de medición y la preparación del cliente MQTT, donde se definen los parámetros necesarios para establecer la comunicación con el broker. En la Figura 47 se muestra el diagrama de flujo que representa de forma estructurada las etapas que sigue el publicador del sensor de temperatura. Una vez establecida la conexión, el sistema realiza lecturas periódicas del sensor infrarrojo MLX90614,

procesando los datos obtenidos para generar valores precisos y estables de temperatura. Posteriormente, esta información se organiza en un mensaje con formato JSON que incluye los campos esenciales para su correcta identificación y posterior análisis. Finalmente, el mensaje es transmitido al broker MQTT, asegurando la entrega confiable de los datos hacia los suscriptores responsables del almacenamiento y procesamiento térmico dentro de la red del sistema.

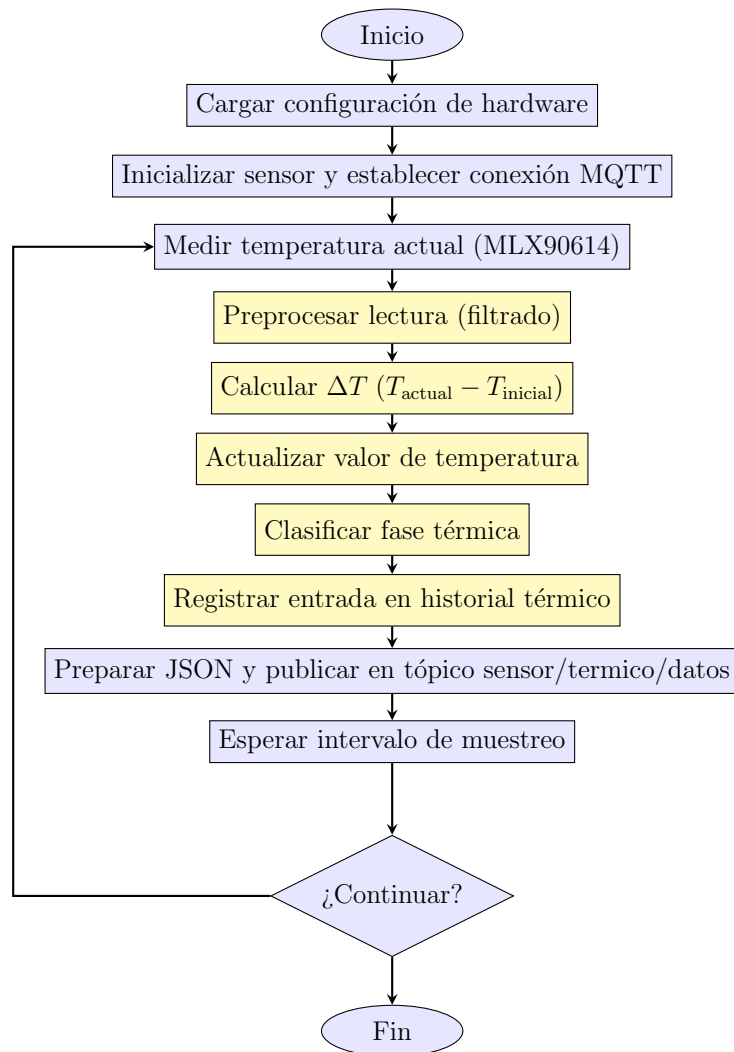


Figura 47: Diagrama de flujo del publicador de datos del sensor. [Autoría propia]

2.2.8.2 Algoritmo del publicador cámara termográfica

El presente diagrama de flujo describe el funcionamiento del publicador encargado de la adquisición y procesamiento de los datos obtenidos por la cámara termográfica UWEI. En la Figura 48 se muestra esta estructura, la cual inicia con la inicialización de los módulos esenciales, incluyendo la configuración de la comunicación con la cámara y la preparación del cliente MQTT, garantizando que los dispositivos estén listos para la recolección y transmisión de la información.

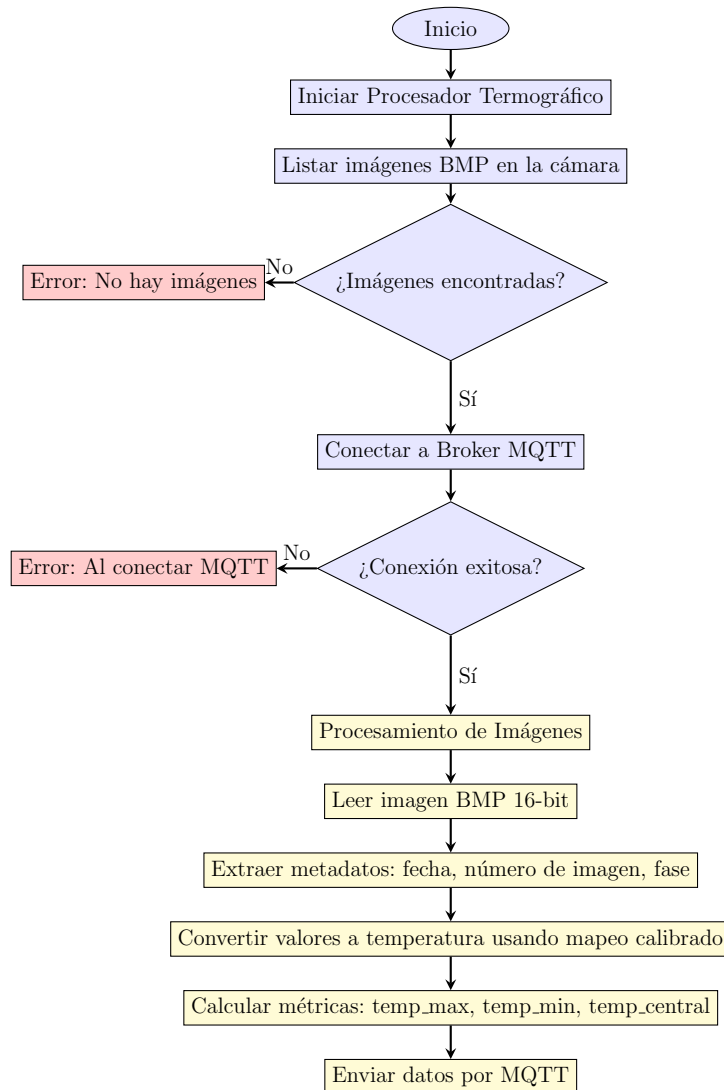


Figura 48: Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes. [Autoría propia]

2.2.8.3 Algoritmo de programación del suscriptor MQTT del sistema

El algoritmo del suscriptor MQTT fue diseñado para gestionar la recepción, clasificación y almacenamiento de los datos térmicos obtenidos por el sensor infrarrojo MLX90614 y la cámara termográfica. Como se observa en la Figura 49, el proceso inicia con la configuración de las conexiones al broker MQTT y al servidor MySQL, asegurando la comunicación entre los dispositivos de adquisición y la base de datos.

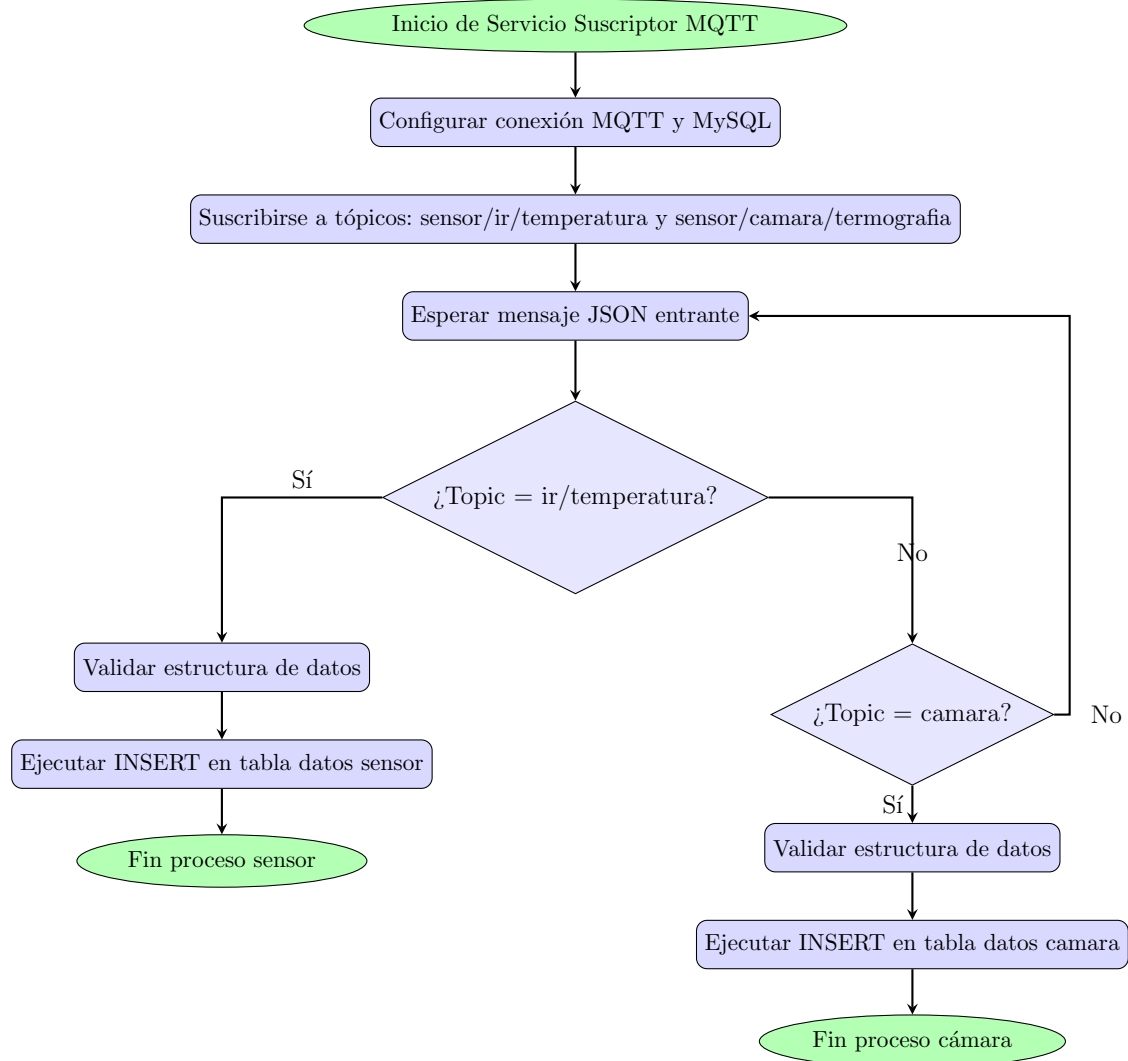


Figura 49: Diagrama de flujo del suscriptor MQTT para almacenamiento de datos del sensor IR y cámara térmica. [Autoría propia]

Una vez establecida la conexión, el sistema se suscribe a los tópicos correspondientes y permanece en espera de mensajes en formato JSON. Al recibir un mensaje, el algoritmo evalúa el topic para identificar el origen de los datos. Si el tópico corresponde a temperatura, se validan los campos del sensor IR y la información se registra en su tabla respectiva; mientras que, si pertenece a cámara, los datos térmicos son verificados y almacenados en la tabla destinada a las imágenes procesadas.

2.2.9. Diseño de la interfaz gráfica del sistema

La plataforma de monitoreo térmico se concibió como un sistema unificado para la adquisición, el procesamiento en tiempo real y el análisis de datos térmicos. Su núcleo lo compone una interfaz gráfica que, de manera simultánea captura los datos del sensor infrarrojo MLX90614 y procesa las imágenes de la cámara termográfica con el fin de extraer valores representativos de temperatura, como máximos, mínimos y promedios. Una vez consolidada esta información, los resultados se transmiten mediante el protocolo MQTT hacia el servidor, donde quedan disponibles para su almacenamiento persistente y análisis posterior.

En cuanto a la infraestructura de gestión, se desplegó una base de datos MySQL en Clever Cloud, la cual funciona como repositorio central de la información recopilada. Esta arquitectura garantiza tanto la persistencia de los registros como su integración con herramientas de visualización, siendo Grafana la plataforma seleccionada como interfaz principal de monitoreo. Gracias a sus capacidades para crear paneles dinámicos e interactivos, el sistema presenta de manera clara y en tiempo real tanto las temperaturas puntuales del sensor como los valores mínimo, máximo y promedio derivados del procesamiento de imágenes térmicas.

2.2.9.1 Acceso a Clever Cloud console

En una primera fase, se accedió a la cuenta de Clever Cloud para gestionar los recursos destinados al proyecto mediante la Clever Cloud Console. Esta plataforma proporcionó un entorno intuitivo y flexible para la administración de la base de datos MySQL en la nube, permitiendo ajustar parámetros esenciales de almacenamiento, rendimiento y escalabilidad de acuerdo con los requerimientos experimentales. La utilización de Clever Cloud aseguró que la infraestructura pudiera adaptarse dinámicamente a variaciones en el volumen de datos generados por los sensores.

2.2.9.2 Creación del servicio de base de datos MySQL en Clever Cloud

La configuración del servicio de base de datos en la nube se inició a través del panel principal de Clever Cloud, como se observa en la Figura 50. En esta interfaz se distinguen dos barras de herramientas que facilitan la creación y administración del servicio. La primera, resaltada en color rojo, corresponde al apartado de tipos de aplicaciones, donde el usuario puede seleccionar el tipo de servicio que desea implementar. En este caso, se eligió la opción “Complemento”, que permite crear una base dentro del entorno en la nube. La segunda barra, señalada en color amarillo, corresponde a la barra de configuración, desde la cual se gestionan los parámetros generales del servicio, como la información del despliegue, las métricas, la facturación y las notificaciones. Esta estructura visual proporciona una interfaz clara y funcional, optimizando el proceso de configuración y administración del sistema de base de datos.

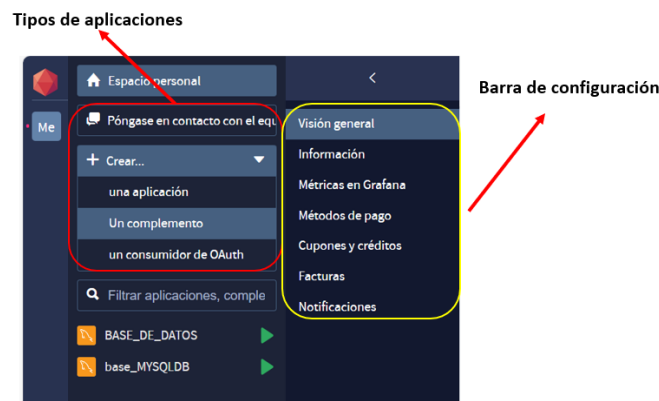


Figura 50: Selección del tipo de aplicación en la nube. [Autoría propia]

Una vez seleccionado el complemento desde el panel principal, el sistema despliega un conjunto de opciones correspondientes a los diferentes servicios de bases de datos disponibles, como se muestra en la Figura 51. Entre las alternativas ofrecidas se encuentran gestores como PostgreSQL, Redis, MongoDB y MySQL, cada uno diseñado para cubrir distintas necesidades de procesamiento y almacenamiento de información. En este proyecto se optó por el servicio de MySQL, debido a su alta compatibilidad con el sistema de adquisición de datos, su velocidad en el manejo de registros y su sencilla integración con las herramientas de análisis y visualización implementadas.



Figura 51: Selección del servicio de base de datos MySQL en la plataforma Clever Cloud. [Autoría propia]

Durante la etapa de configuración del gestor de base de datos, se despliega una ventana como la mostrada en la Figura 52, donde se establecen los parámetros iniciales del servicio. En esta interfaz se asigna un nombre distintivo a la base de datos y se define la ubicación geográfica del servidor en el que será alojada. Esta configuración resulta esencial, ya que influye directamente en la organización interna del proyecto dentro de la plataforma y en el desempeño de la comunicación entre los módulos del sistema. Una correcta elección de estos parámetros contribuye a reducir la latencia y a mantener una conexión estable y eficiente entre la base de datos en la nube y el sistema de adquisición de datos.

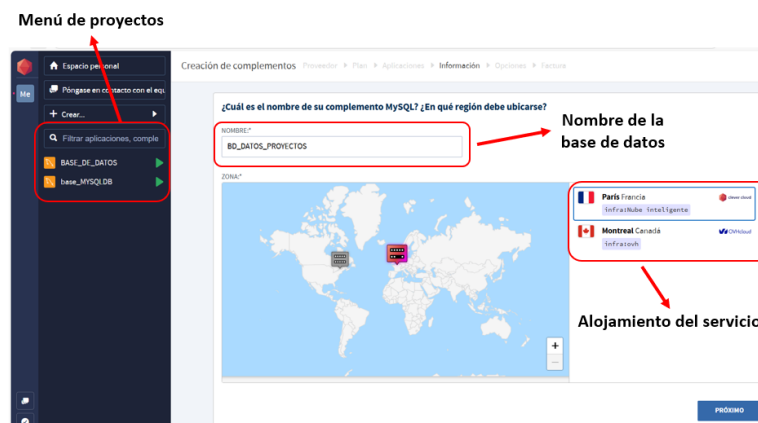


Figura 52: Asignación y alojamiento del servicio en la nube en Clever Cloud. [Autoría propia]

Una vez creada la instancia de la base de datos, Clever Cloud generó de forma automática las credenciales necesarias para establecer la conexión con el sistema. Dichos parámetros incluyen el host, el nombre de la base de datos, el usuario, la contraseña y el puerto estándar 3306, además de la URI de conexión, la cual permite enlazar la Raspberry Pi y Grafana directamente con el servicio alojado en la nube. En la Figura 53 se muestran las credenciales dentro del panel de administración de Clever Cloud, las cuales representan la información esencial para habilitar la comunicación entre la base de datos y los módulos de adquisición y visualización de los datos.

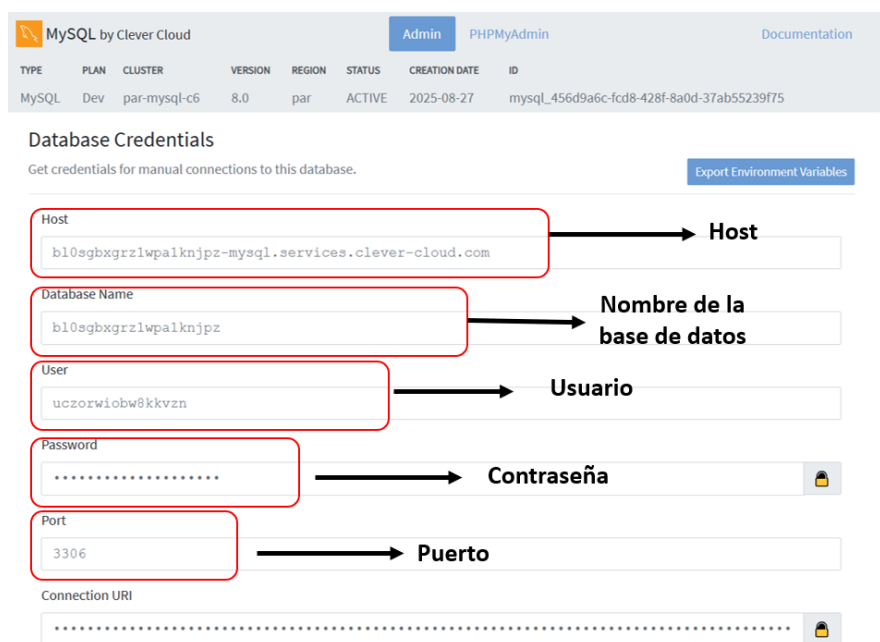


Figura 53: Parámetros de conexión de la base de datos. [Autoría propia]

2.2.9.3 Definición de campos y relaciones en las tablas de datos

Para el diseño de las tablas en Clever Cloud mediante MySQL, se estableció una estructura orientada a garantizar el orden, de los datos adquiridos por los sensores. La modelación incluyó la creación de tablas de registros crudos con campos tales como id, fase_ciclo, temp_objeto, temp_ambiente y timestamp, acompañados de índices sobre sensor_id y timestamp etc. Esta estructura asegura que la interfaz pueda acceder a la información de manera fácil, permitiendo transformar los registros almacenados en visualizaciones útiles para el análisis térmico del polietileno. En la Figura 54 se muestra la estructura de la base de datos diseñada para el sensor, donde se detalla la disposición de las tablas y los campos definidos.

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Atributos	Nulo	Predeterminado	Comentarios	Extra	Acción
<input type="checkbox"/>	1 id	int			No	Ninguna		AUTO_INCREMENT	Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	2 ciclo_id	int			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	3 timestamp	datetime			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	4 fase_ciclo	varchar(20)	utf8_general_ci		No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	5 temp_objeto	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	6 temp_ambiente	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	7 delta_t	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	8 tendencia_obj	decimal(5,3)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	9 tendencia_delta	decimal(5,3)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	10 cambio_porcentual	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	11 clasificacion	varchar(30)	utf8_general_ci		No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	12 experimento_id	int			Sí	NULL			Cambiar Eliminar Más

Figura 54: Estructura de la tabla de datos del sensor. [Autoría propia]

En el caso de la cámara termográfica, se diseñó una tabla específica en MySQL para guardar los datos capturados durante cada experimento. Esta tabla incluye campos como id que es la clave primaria del registro, nombre_archivo para identificar el registro asociado, fecha_hora de la captura y las variables de interés temperatura_maxima, temperatura_minima y temperatura_central, que representan los valores térmicos críticos detectados en la superficie de la película de polietileno. En la Figura 55 se muestra la estructura de esta tabla, diseñada para garantizar la trazabilidad de los registros.

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Atributos	Nulo	Predeterminado	Comentarios	Extra	Acción
<input type="checkbox"/>	1 id	int			No	Ninguna		AUTO_INCREMENT	Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	2 nombre_archivo	varchar(255)	utf8_general_ci		No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	3 fecha_hora	datetime			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	4 temperatura_maxima	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	5 temperatura_minima	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	6 temperatura_central	decimal(5,2)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	7 fase_experimento	varchar(50)	utf8_general_ci		No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	8 fecha_registro	timestamp			Sí	CURRENT_TIMESTAMP		DEFAULT_GENERATED	Cambiar Eliminar Más
<input type="checkbox"/>	9 experimento_id	int			Sí	NULL			Cambiar Eliminar Más

Figura 55: Estructura de la tabla de datos de la cámara. [Autoría propia]

2.2.10. Diseño de la interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos térmicos

Durante el desarrollo del sistema, se diseñó una interfaz gráfica orientada a la recolección y el envío de datos térmicos obtenidos en las pruebas experimentales con películas agrícolas de polietileno. Esta interfaz actúa como un puente entre el usuario y los distintos módulos del sistema, permitiendo visualizar, procesar y enviar la información. La estructura general del sistema, representada en la Figura 56, se organizó en módulos interconectados que facilitan la navegación, permitiendo una interacción entre el usuario y los diferentes componentes del software. La pantalla de adquisición del sensor permite la lectura en tiempo real de las mediciones captadas por el sensor infrarrojo MLX90614, utilizado para registrar las variaciones térmicas sobre las películas agrícolas de polietileno tanto en condiciones secas como en contacto con agua. La interfaz presenta opciones para iniciar, detener y almacenar los registros, garantizando un control directo sobre la adquisición de los datos.

En la pantalla de procesamiento de imágenes térmicas se realiza el análisis de las imágenes capturadas por la cámara termográfica, permitiendo identificar y estudiar las zonas de interés dentro de la superficie de las películas. A través de este procesamiento se extraen los valores de temperatura relevantes de cada imagen, optimizando la interpretación térmica del material analizado. Como último se encuentra la pantalla de envío de datos por MQTT que gestiona la transmisión de la información recolectada hacia la base de datos situada en la nube mediante el protocolo MQTT.

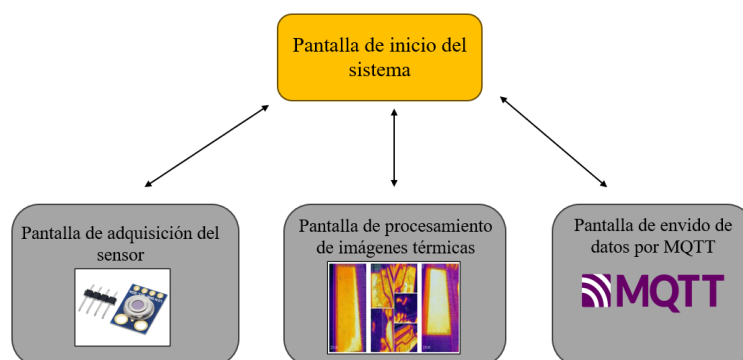


Figura 56: Diagrama general del diseño de la interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos térmicos. [Autoría propia]

2.3. Desarrollo experimental

En la siguiente sección se presenta la implementación del sistema, donde se desarrollan los diseños propuestos a lo largo del proyecto. Esta etapa constituye la fase práctica del trabajo, en la cual se integran los componentes de hardware y software previamente analizados, permitiendo validar la funcionalidad del sistema. Además, se describen los procedimientos experimentales realizados, las configuraciones empleadas durante el proceso de desarrollo.

2.3.1. Implementación del sistema de análisis térmico

La implementación del sistema se realizó en base al diseño estructural propuesto, el cual presenta dimensiones de 50 cm × 50 cm × 1 m, sobre esta base, se procedió con el montaje del sistema de análisis térmico destinado a evaluar el comportamiento de láminas de polietileno agrícola bajo condiciones controladas de calentamiento. El sistema implementado, mostrado en la Figura 57, se compone de tres secciones principales: el sistema de medición, la base estructural y la fuente de calor.

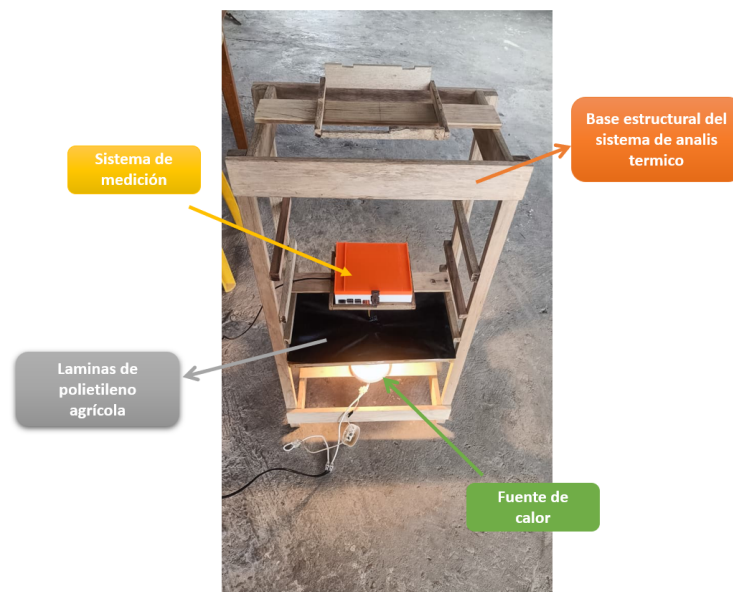


Figura 57: Estructura implementada para el sistema de análisis térmico. [Autoría propia]

En la parte superior se ubicó el sistema de medición, conformado por el sensor infrarrojo MLX90614, el módulo de procesamiento y control basado en una Raspberry Pi, y el sistema de alimentación eléctrica que suministra energía a los componentes del sistema. Este conjunto permitió la adquisición, procesamiento y almacenamiento de los datos térmicos en una base de datos externa asegurando la continuidad de la información recolectada. Además, se utilizó una cámara termográfica portátil, la cual no forma parte fija de la estructura, sino que fue empleada de manera externa para capturar imágenes térmicas en diferentes etapas del proceso experimental. La cámara complementó al sensor MLX90614, permitiendo analizar tanto la distribución espacial de la temperatura sobre la lámina de polietileno como su variación temporal frente al incremento de calor.

La base estructural, construida en madera, sirvió como soporte principal del sistema y permitió la correcta alineación de los componentes en la parte intermedia de la base se colocó la lámina de polietileno agrícola, que actúa como muestra de estudio y superficie de observación termográfica. Esta disposición garantizó una exposición térmica uniforme y redujo posibles interferencias en la captación de radiación infrarroja. En la parte inferior de la estructura se instaló la fuente de calor controlada, cuya distancia respecto a la lámina de polietileno de aproximadamente 8 cm fue determinada experimentalmente con el propósito de mantener una transferencia térmica equilibrada y evitar sobrecalentamientos localizados. Durante los ensayos, tanto el sistema de medición como la cámara termográfica portátil registraron de manera continua la evolución térmica del material, lo que permitió realizar un análisis comparativo entre los escenarios de condición seca y condición húmeda además de evaluar la respuesta térmica del polietileno agrícola ante el incremento progresivo de temperatura.

2.3.2. Implementación y configuración del sistema de comunicación

La implementación del sistema de comunicación se basó en el protocolo MQTT, definiendo una arquitectura de mensajería con esquemas de publicación y suscripción, esta configuración constituye el eje central para el intercambio de información durante la adquisición y el procesamiento de datos térmicos, al integrar de forma coherente la base de datos con las plataformas de análisis y visualización.

2.3.2.1 Configuración del broker MQTT

El broker Mosquitto fue instalado y configurado como el componente principal del sistema de mensajería, responsable de gestionar la comunicación entre los sensores de medición y la base de datos alojada en la nube. Para su funcionamiento, se habilitó el puerto estándar 1883, correspondiente al protocolo MQTT, ejecutándose en modo localhost dentro de la Raspberry Pi. Esta configuración permitió simpli-

ficar la implementación, reducir la dependencia de servicios externos y garantizar un enlace directo y seguro entre los sensores y los procesos de almacenamiento y visualización de datos. Además, se definió una estructura de tópicos de publicación y suscripción específica para cada dispositivo, lo que aseguró una organización clara de la información, manteniendo la trazabilidad y evitando interferencias entre los distintos flujos de datos.

- **Configuración del tópico para el sensor MLX90614**

El sensor infrarrojo MLX90614, encargado de medir la temperatura superficial del polietileno, fue asociado a un tópico exclusivo denominado `miproyecto/temperatura`. A través de este canal, la Raspberry Pi publicaba periódicamente los valores de temperatura capturados, mientras que los servicios suscriptores como la base de datos en la nube y Grafana podían acceder a la información en tiempo real. En la Tabla 14 se muestra la configuración del tópico correspondiente al sensor MLX90614 dentro del broker Mosquitto.

- **Configuración del tópico para la cámara termográfica UWEI**

La cámara termográfica UWEI fue configurada con un tópico independiente, denominado `miproyecto/camara`, destinado a la transmisión de los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes térmicas. En este proceso, cada captura es analizada para extraer las temperaturas máxima, mínima y central del área medida, optimizando así la cantidad de datos enviados al sistema. Debido al mayor volumen de procesamiento requerido, se definió una frecuencia de envío menor que la del sensor infrarrojo, lo que permite mantener un flujo de información equilibrado dentro de la red. La Tabla 14 muestra la configuración del tópico asignado a la cámara termográfica UWEI dentro del broker Mosquitto.

Tabla 14: Configuraciones MQTT para los módulos del sistema

Parámetro	Módulo Temperatura	Módulo Cámara
Broker	localhost	localhost
Puerto	1883	1883
Topic	<code>miproyecto/temperatura</code>	<code>miproyecto/camara</code>

2.3.2.2 Conexión de la base de datos del suscriptor MQTT

Para establecer la conexión con la base de datos, es necesario contar con los parámetros de configuración mostrados en la Tabla 15, donde se especifican el host, usuario, contraseña y nombre de la base de datos. Estos elementos permiten enlazar la Raspberry Pi con el servidor MySQL alojado en la nube, permitiendo que los datos generados por el sensor infrarrojo y la cámara termográfica tras ser previamente procesados para obtener las temperaturas son transmitidos mediante el protocolo MQTT desde el suscriptor correspondiente, esta información se envía a la base de datos a través de la conexión configurada, permitiendo su almacenamiento y posterior utilización en los procesos de análisis y visualización del sistema.

Tabla 15: Configuración de la base de datos. [Autoría propia]

Parámetro	Valor
DB_HOST	blogbwgrzimpalknpjz-mysql.services.clever-cloud.com
DB_USER	uczonviobm8kkvzn
DB_PASS	*****
DB_NAME	blogbwgrzimpalknpjz

2.3.2.3 Lógica de detección de fases térmicas

El sistema de clasificación de fases térmicas constituye un componente clave dentro del algoritmo de detección, ya que interpreta las lecturas del sensor para contextualizar el comportamiento térmico del material y facilitar la identificación de posibles reacciones. Tal como se muestra en la Tabla 16, este módulo organiza las variaciones de temperatura en tres estados discretos, cada uno asociado a una condición específica del sistema. Esta clasificación permite establecer los momentos en que se presentan fenómenos endotérmicos o exotérmicos, permitiendo la interpretación de los datos térmicos obtenidos durante el proceso experimental.

Tabla 16: Condiciones para identificación de fases térmicas

Fase	Parámetro	Condición
Calentamiento	$tendencia_{temp} > 0,08$	Pendiente positiva
Enfriamiento	$tendencia_{temp} < -0,05$	Pendiente negativa
Línea Base	$-0,05 \leq tendencia_{temp} \leq 0,08$	Estabilidad térmica

La detección de fases se basa en el análisis de la evolución temporal de la temperatura, calculando la pendiente de una regresión lineal aplicada sobre una ventana deslizante de muestras. Este enfoque permite identificar variaciones térmicas significativas en distintos intervalos de tiempo. El sistema implementa tres estrategias de cálculo adaptadas a diferentes niveles de respuesta y estabilidad, la Tendencia Rápida que utiliza cuatro muestras para obtener una respuesta casi inmediata; la Tendencia Balanceada, con cinco muestras que proporcionan un equilibrio entre velocidad y precisión; y la Tendencia Larga, basada en ocho muestras, diseñada para ofrecer una mayor estabilidad frente a fluctuaciones puntuales.

2.3.2.4 Detección de reacciones endotérmicas

El algoritmo de detección de reacciones endotérmicas se implementa sobre la serie temporal de temperatura del objeto, obtenida por el sensor infrarrojo MLX90614. Este se basa en una clasificación multicriterio que combina condiciones contextuales, patrones temporales y umbrales cuantitativos para identificar procesos de absorción de calor. Como se indica en la Tabla 17 de parámetros, el mecanismo opera bajo un conjunto de variables interrelacionadas que garantizan la confiabilidad de las detecciones.

Tabla 17: Parámetros para la detección de reacciones endotérmicas

Parámetro	Valor	Condición
Fase requerida	calentamiento	Obligatorio
Mediciones mínimas	3	Historial suficiente
Patrón de temperatura	$temp[actual] < temp[anterior] < temp[2_antes]$	Descenso consecutivo
Umbral VALIDADO	$> 0,5^{\circ}C$	Bajada mínima
Umbral POSIBLE	$> 0,2^{\circ}C$	Bajada mínima
Clasificación	endotermico_validado o posible_endotermico	Salida del método

La detección de reacciones endotérmicas inicia con la verificación del contexto térmico, donde el sistema comprueba que la fase actual corresponda a un período de calentamiento. Este paso garantiza que cualquier descenso en la temperatura represente una anomalía relevante frente a una tendencia general de incremento térmico, evitando así confundir enfriamientos naturales con verdaderas reacciones endotérmicas. Posteriormente, el algoritmo verifica que exista un historial mínimo de tres mediciones consecutivas de temperatura, lo que permite contar con una ventana temporal suficiente para analizar la evolución del fenómeno. A partir de esta base, se examina el patrón térmico, exigiendo una secuencia de descensos continuos en la que cada medición sea menor que la anterior, condición que sugiere la

presencia de un proceso activo de absorción de calor. Una vez validado este patrón descendente, el sistema cuantifica la magnitud del cambio térmico calculando la diferencia entre la temperatura registrada dos intervalos atrás y la actual. Con este valor se aplican umbrales jerárquicos que determinan el nivel de certeza de la detección: descensos mayores a 0.5°C se clasifican como `endotermico_validado`, indicando una reacción confirmada; mientras que variaciones entre 0.2°C y 0.5°C se etiquetan como `posible_endotermico`, lo cual señala la necesidad de un seguimiento adicional.

2.3.2.5 Detección de reacciones exotérmicas

El algoritmo de detección de reacciones exotérmicas se implementa de manera similar sobre la serie temporal de temperatura del objeto, obtenida por el sensor infrarrojo MLX90614. Utiliza una lógica análoga a la empleada para las reacciones endotérmicas, aunque con parámetros ajustados específicamente para identificar procesos de liberación de calor en condiciones controladas como se muestra en la Tabla 18. Según los parámetros definidos, el algoritmo aplica un esquema de validación en varias capas que integra la verificación del contexto, el análisis de patrones térmicos y la evaluación cuantitativa, con el fin de garantizar una identificación precisa de los fenómenos asociados a la generación de calor.

Tabla 18: Parámetros para la detección de reacciones exotérmicas

Parámetro	Valor	Condición
Fase requerida	enfriamiento	Obligatorio
Mediciones mínimas	3	Historial suficiente
Patrón de temperatura	$temp[actual] > temp[anterior] > temp[2_antes]$	Ascenso consecutivo
Umbral VALIDADO	$> 0,3^{\circ}\text{C}$	Subida total mínima
Umbral POSIBLE	$> 0,1^{\circ}\text{C}$	Subida total mínima
Clasificación	<code>exotermico_validado</code> o <code>posible_exotermico</code>	Salida del método

El proceso de detección de reacciones exotérmicas inicia con la evaluación del contexto térmico, asegurando que el sistema se encuentre en una fase de enfriamiento. Esta condición es esencial, ya que permite interpretar cualquier aumento inesperado de temperatura como un posible indicio de liberación de calor, diferenciándolo de fluctuaciones normales durante el descenso térmico. Después de esto, el algoritmo verifica la disponibilidad de al menos tres mediciones consecutivas, lo que establece una ventana temporal adecuada para observar la evolución del evento. A partir de estas mediciones, se analiza el patrón de comportamiento térmico, comprobando que cada valor sea mayor que el anterior, es decir, que exista una

tendencia ascendente sostenida que sugiera el posible desarrollo de una reacción exotérmica.

Una vez confirmada esta tendencia, el sistema calcula la magnitud del incremento térmico comparando la temperatura actual con la registrada dos intervalos atrás. Con esa diferencia, se aplica la clasificación por umbrales: si el incremento supera los $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, se identifica como `exotermico_validado`, interpretándose como una detección confiable; mientras que variaciones entre $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ se clasifican como `posible_exotermico`, lo que indica la necesidad de un seguimiento adicional. Estos umbrales, distintos a los utilizados para las reacciones endotérmicas, permiten ajustar la sensibilidad del sistema a la naturaleza de las reacciones exotérmicas, las cuales suelen presentar incrementos térmicos más bruscos. De esta manera, el algoritmo logra un equilibrio entre precisión y estabilidad, garantizando una interpretación coherente y robusta del comportamiento térmico observado.

2.3.2.6 Procesamiento de imágenes térmicas

Para analizar las variaciones térmicas en las muestras de polietileno, se estableció un proceso de tratamiento digital de imágenes termográficas, representado en la Figura 58, que inicia con una fase de calibración. Este procedimiento de calibración se realizó utilizando fuentes térmicas de referencia con temperaturas conocidas en un rango de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ en nuestro caso lámparas halógenas, bajo condiciones controladas donde la cámara se posicionó a 30 cm de la muestra, con una temperatura ambiente de $25 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, una emisividad fija de 0.92 valor estándar para plásticos de polietileno, y una frecuencia de captura frame rate de 1 Hz. A partir de las imágenes infrarrojas capturadas en esta fase, que registran los patrones térmicos distribuidos en la superficie del material, se extrajeron los valores crudos de intensidad de los píxeles, los cuales representan la respuesta térmica detectada por el sensor y se organizaron en forma de matriz para facilitar el análisis digital posterior.

Estos valores crudos se asociaron luego a temperaturas reales mediante un diccionario de conversión generado específicamente durante dicha calibración. La construcción de este diccionario se implementó mediante un algoritmo en Python que, para cada temperatura de referencia conocida, registraba la distribución de los valores de los píxeles, calculando sus percentiles característicos. Este mapeo permitió establecer una correspondencia precisa entre los niveles digitales de la imagen y las temperaturas físicas, identificando consistentemente los píxeles más calientes y más fríos para cada punto de calibración. Dado que este mapeo inicial contenía únicamente puntos discretos, se aplicó un proceso de interpolación matemática para estimar los valores de temperatura intermedios, logrando así una conversión continua y precisa para todo el rango térmico medido por la cámara.

Como parte final, a partir de los datos de temperatura convertidos y procesados, se genera un reporte que sintetiza las temperaturas máxima, mínima y central de cada imagen termográfica del polietileno. Este conjunto de indicadores, obtenidos de un sistema de medición debidamente calibrado, permite una comparación sistemática del comportamiento del material bajo diversas condiciones experimentales, facilitando con ello la identificación y evaluación rigurosa de sus transiciones térmicas más relevantes.

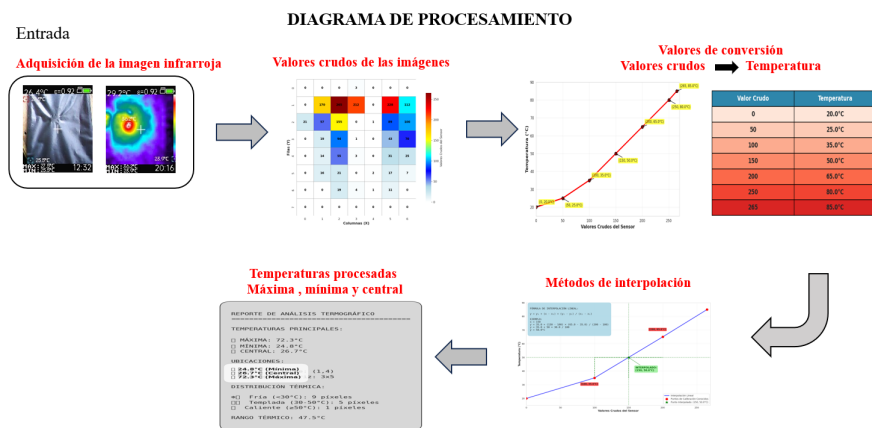


Figura 58: Diagrama de procesamiento de imágenes de la cámara. [Autoría propia]

2.3.3. Implementación de la interfaz para el monitoreo y adquisición de datos del sistema

La interfaz para la recolección y visualización de datos térmicos se desarrolló conforme al diseño previamente establecido, integrando funciones de adquisición, procesamiento y transmisión de la información generada por el sensor infrarrojo MLX90614 y la cámara termográfica. Durante su implementación, la interfaz se desplegó en la Raspberry Pi organizándose en tres módulos principales que conforman la estructura de la interfaz gráfica.

La interfaz se estructura en cuatro módulos especializados, iniciando con una pantalla principal (Figura 59) que centraliza el control y la visualización del sistema. Desde este núcleo, se despliegan dos módulos de adquisición uno dedicado a la lectura de datos del sensor infrarrojo y otro al procesamiento de imágenes termográficas. Como capa final, se presenta un cuarto módulo que gestiona el envío de información a la base de datos en la nube mediante MQTT, asegurando con ello una transmisión confiable de todos los datos recolectados.



Figura 59: Interfaz principal del sistema de adquisición de datos térmicos. [Autoría propia]

2.3.3.1 Pantalla principal del sensor infrarrojo

La primera pantalla de la interfaz gráfica, mostrada en la Figura 60, corresponde al módulo de monitoreo y control del sensor infrarrojo MLX90614, el cual se encarga de la adquisición de datos térmicos puntuales en tiempo real. Esta sección permite configurar y supervisar los parámetros experimentales, tales como el ID del experimento, el número de ciclo de medición y el intervalo de adquisición expresado en segundos.

En la parte superior se dispone el apartado de Configuración del Experimento, donde es posible registrar o cargar los datos correspondientes a cada ensayo mediante los botones Guardar Configuración y Cargar Configuración, la sección central está destinada al control del sensor MLX90614, mostrando de manera dinámica el estado operativo del dispositivo mediante indicadores visuales que informan si el sensor se encuentra activo o inactivo. Además, los botones Test Sensor, Iniciar Sensor y Detener Sensor permiten ejecutar pruebas de funcionamiento y gestionar manualmente el inicio o la detención del proceso de adquisición térmica. Por último, en la parte inferior de la interfaz se incluye el módulo de Logs en Tiempo Real, donde se registran los eventos del sistema, tales como mensajes del cliente MQTT, intervalos de muestreo, detección de fases térmicas y publicación de los datos hacia la nube. Este registro constituye una herramienta fundamental para el seguimiento, validación y análisis de las mediciones obtenidas, permitiendo verificar el correcto funcionamiento del sistema durante la ejecución de los experimentos.

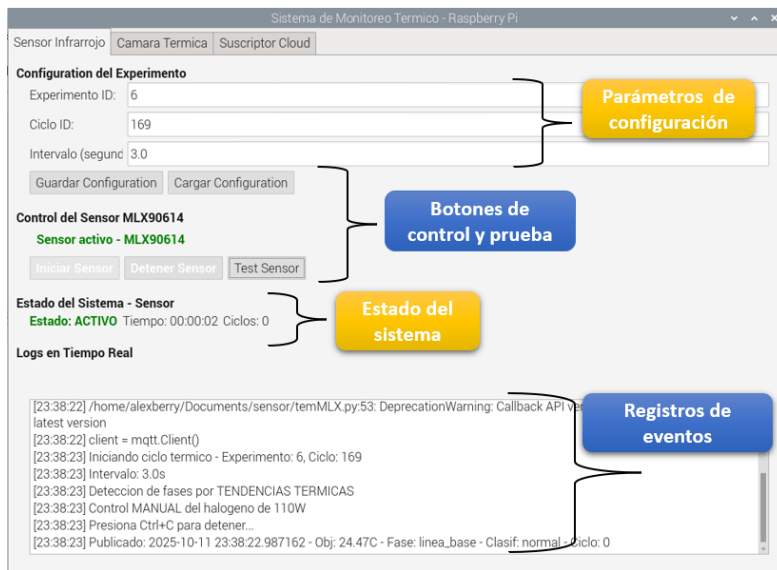


Figura 60: Interfaz gráfica del sensor para adquisición y visualización de datos térmicos. [Autoría propia]

2.3.3.2 Pantalla de procesamiento de imágenes térmicas

El módulo encargado del procesamiento y visualización de las imágenes térmicas, ilustrado en la Figura 61, cumple la función de gestionar la información obtenida por la cámara termográfica. Su diseño permite la administración de las imágenes capturadas y el análisis térmico del material de polietileno bajo estudio. En la parte superior se encuentra la sección Control de la Cámara Térmica, donde un indicador visual muestra el estado operativo del dispositivo, confirmando si la cámara está correctamente montada y lista para su uso. Desde este panel, el usuario puede listar las imágenes disponibles, iniciar o detener el procesamiento de una selección específica, y activar el modo de procesamiento automático, el cual permite analizar de manera continua todas las imágenes capturadas, optimizando así el tiempo y la eficiencia durante los ensayos experimentales.

El área central corresponde a la sección de Selección de Imágenes, donde se muestran los archivos térmicos en formato .bmp obtenidos durante las mediciones. Esta zona permite seleccionar imágenes individuales o procesar el conjunto completo, facilitando la revisión secuencial y comparativa de los registros térmicos obtenidos en las distintas fases del experimento. En la parte inferior se dispone la sección de Visualización de Imágenes Procesadas, que presenta simultáneamente la imagen principal y la siguiente imagen, acompañadas de un panel de información detallada que incluye datos técnicos como nombre del archivo, dimensiones,

tamaño, fecha de modificación y ruta de almacenamiento. Finalmente, el módulo integra un área de Logs de la Cámara, destinada a registrar los eventos relacionados con la captura, procesamiento y almacenamiento de imágenes.

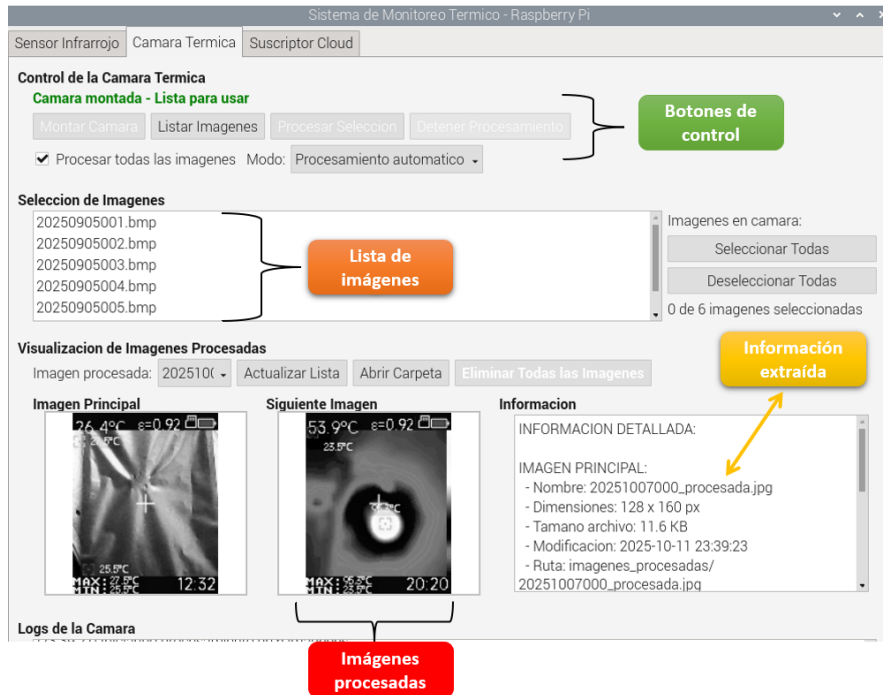


Figura 61: Interfaz de procesamiento y visualización de imágenes térmicas. [Autoría propia]

2.3.3.3 Pantalla del suscriptor del sistema MQTT

Para el envío de los datos recolectados hacia la nube, se implementó el módulo mostrado en la Figura 62, correspondiente al control del suscriptor MQTT. Este componente constituye una parte esencial del sistema debido a que administra la comunicación entre la Raspberry Pi, encargada de la adquisición y procesamiento térmico, y el servidor remoto en Clever Cloud, responsable del almacenamiento y análisis de la información a través de la plataforma Grafana. En la parte superior de la interfaz se encuentra la sección Control del Suscriptor MQTT, donde se visualiza el estado de conexión del sistema mediante indicadores gráficos que confirman si la comunicación con la nube está activa. Desde este panel se puede iniciar o detener el servicio del suscriptor, además de ejecutar la función Test Base de Datos, la cual verifica la correcta conexión con el servidor MySQL antes de iniciar la transmisión de datos.

El módulo permite también supervisar en tiempo real la estabilidad de la conexión y el flujo de mensajes intercambiados con el broker MQTT, asegurando que los valores de temperatura obtenidos por el sensor infrarrojo y la cámara termográfica sean enviados al tópico correspondiente.

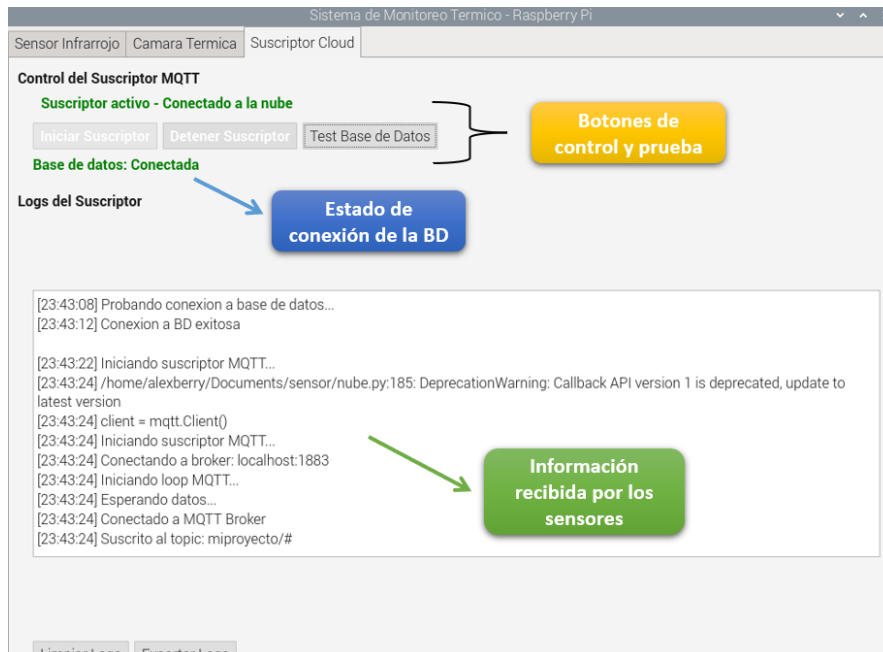


Figura 62: Interfaz de control del suscriptor MQTT para el envío de datos hacia la nube. [Autoría propia]

2.3.4. Configuración de la interfaz en Grafana

La configuración de la interfaz se orientó a garantizar que la información obtenida por los sensores pudiera visualizarse de manera clara y organizada. Para ello, se empleó Grafana como plataforma principal de análisis y representación gráfica, estableciendo una conexión directa con la base de datos MySQL alojada en la nube de Clever Cloud.

2.3.4.1 Accesibilidad remota

Para la visualización de los datos recolectados, se habilitó la accesibilidad remota del sistema, con el fin de que los datos pudieran consultarse desde cualquier dispositivo conectado a la red local o, si se requería, de manera externa. Para ello, se utilizó el puerto por defecto 3000 de Grafana, a través del cual los navegadores web pueden acceder directamente a la interfaz de monitoreo sin necesidad de aplicaciones adicionales.

Con el propósito de garantizar un acceso controlado, se realizaron ajustes básicos de seguridad, entre los cuales se incluyó la creación de un usuario administrador y la asignación de credenciales de acceso personalizadas. Estos parámetros aseguraron que únicamente personal autorizado pudiera visualizar o modificar la información. En la Figura 63 se muestra la ventana de inicio de sesión en Grafana, que constituye el punto de acceso remoto al sistema de visualización.

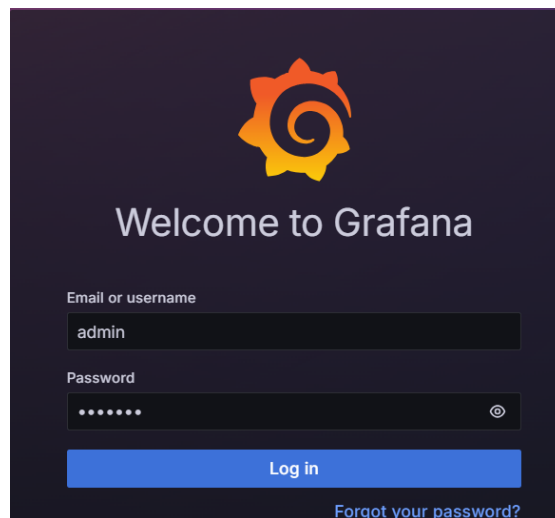
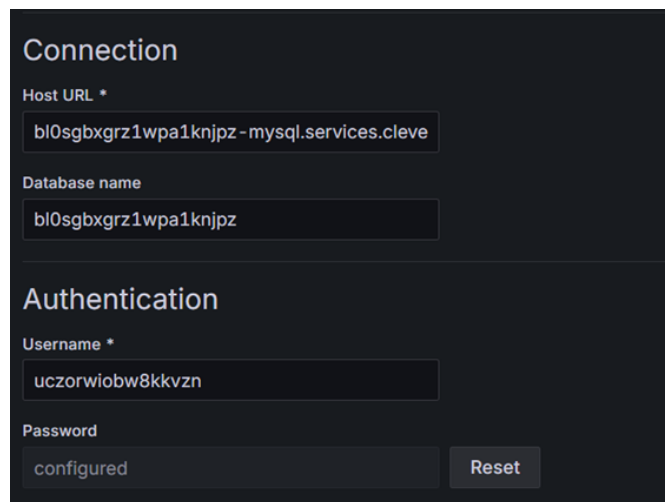


Figura 63: ventana de inicio de sesión de grafana. [Autoría propia]

2.3.4.2 Conexión de Grafana con la base de datos en Clever Cloud

La configuración de la interfaz se centró en establecer la comunicación entre Grafana y la base de datos alojada en la nube de Clever Cloud, la cual funciona como repositorio central de la información recolectada por los sensores. Para ello, se configuró el data source en Grafana, seleccionando el conector de tipo MySQL, en esta sección, se ingresaron los parámetros de conexión proporcionados por el servicio en la nube: la dirección del host correspondiente al servidor remoto, el usuario y la contraseña de acceso, así como el puerto estándar 3306 utilizado por MySQL. Estos datos permitieron autenticar la sesión y vincular la plataforma de

visualización con la base de datos externa. Una vez completada la configuración, se procedió a realizar la verificación de conectividad. Grafana dispone de la opción Save y Test, que permite comprobar de inmediato si la conexión con la nube es exitosa. En la Figura 64 se muestra la ventana de configuración del data source en Grafana, donde se ingresaron los parámetros del host, puerto y credenciales de acceso a la base de datos en Clever Cloud.

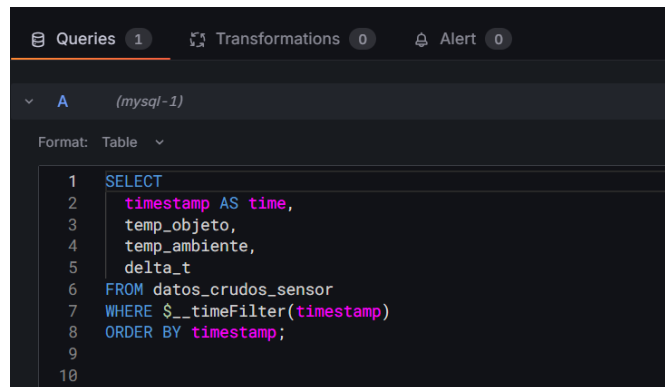


The image shows a dark-themed configuration window titled "Connection" in Grafana. It is divided into two sections: "Connection" and "Authentication".

- Connection section:**
 - Host URL ***: A text input field containing the value `bl0sgbxgrz1wpa1knjpz-mysql.services.cleve`.
 - Database name**: A text input field containing the value `bl0sgbxgrz1wpa1knjpz`.
- Authentication section:**
 - Username ***: A text input field containing the value `uczorwiobw8kkvzn`.
 - Password**: A text input field containing the value `configured`. To the right of this field is a "Reset" button.

Figura 64: Configuración del origen de datos MySQL en Grafana. [Autoría propia]

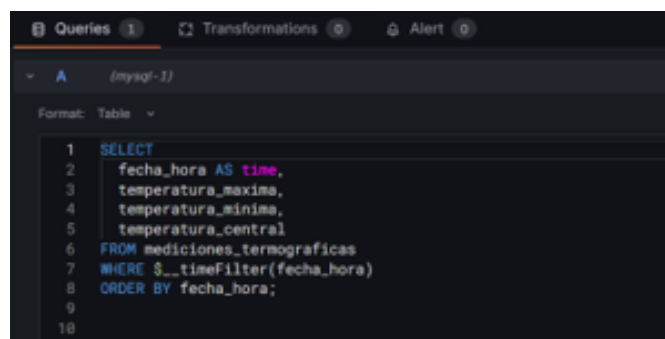
La conexión entre los paneles de Grafana y la base de datos MySQL en Clever Cloud se estableció mediante una consulta SQL como se presenta en la Figura 65, diseñada para recuperar y representar en tiempo real los valores de temperatura del sensor MLX90614. Esta consulta actúa como puente entre las variables térmicas almacenadas y los paneles de visualización, permitiendo que los datos de temperatura del objeto, ambiente y su diferencia térmica se actualicen dinámicamente en función del tiempo, de este modo, se garantiza una representación gráfica que refleja el comportamiento térmico del sistema de manera continua.



```
Queries 1 Transformations 0 Alert 0
(mysql-1)
Format: Table
1 SELECT
2     timestamp AS time,
3     temp_objeto,
4     temp_ambiente,
5     delta_t
6 FROM datos_crudos_sensor
7 WHERE $__timeFilter(timestamp)
8 ORDER BY timestamp;
```

Figura 65: Configuración de la consulta SQL para la visualización de datos del sensor infrarrojo MLX90614 en Grafana. [Autoría propia]

En el caso de los datos obtenidos por la cámara termográfica, se configuró en Grafana una consulta específica que permite su representación gráfica a partir de los registros almacenados en la base de datos MySQL. Esta configuración posibilita la extracción y visualización de los valores de temperatura máxima, mínima y central correspondientes a cada captura térmica, proporcionando una interpretación visual del comportamiento térmico del material analizado. Como se observa en la Figura 66, los paneles de Grafana se actualizan automáticamente conforme se reciben nuevos datos, mostrando de manera continua las variaciones térmicas registradas durante los ensayos experimentales.



```
Queries 1 Transformations 0 Alert 0
(mysql-1)
Format: Table
1 SELECT
2     fecha_hora AS time,
3     temperatura_maxima,
4     temperatura_minima,
5     temperatura_central
6 FROM mediciones_termograficas
7 WHERE $__timeFilter(fecha_hora)
8 ORDER BY fecha_hora;
```

Figura 66: Configuración de la consulta SQL para la representación gráfica de mediciones térmicas obtenidas por la cámara termográfica en Grafana. [Autoría propia]

2.3.4.3 Creación de paneles y dashboards

Una vez establecida la conexión entre Grafana y la base de datos MySQL en la nube, se procedió a construir los paneles de visualización que integran el dashboard principal del sistema. Estos paneles fueron diseñados para mostrar en tiempo real tanto las lecturas puntuales del sensor MLX90614 como los parámetros extraídos de la cámara termográfica UWEI, garantizando una representación gráfica clara y accesible de las variables críticas.

Inicialmente, se configuró un panel específico para el sensor MLX90614, dedicado a visualizar la temperatura superficial puntual del polietileno. Para este panel se utilizaron gráficos de series temporales que permiten observar la evolución de la variable a lo largo del tiempo, complementados con indicadores numéricos que destacan el valor instantáneo más reciente.

De manera complementaria, se desarrollaron paneles especializados para la cámara termográfica, enfocados en presentar las temperaturas mínima, máxima y central registradas en cada adquisición. Al igual que en el caso anterior, se implementaron gráficos de series temporales para analizar las tendencias de los valores, junto con visualizaciones numéricas que facilitan la consulta inmediata de las mediciones en tiempo real. En la Figura 67 se presenta el dashboard completo en Grafana, donde pueden observarse los paneles configurados para ambos dispositivos, mostrando tanto los valores instantáneos como sus correspondientes series temporales.



Figura 67: Ventana de monitoreo de grafana. [Autoría propia]

3. Resultados

3.1. Validación del sistema de registro de datos

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición y registro de datos, se efectuó una prueba de calentamiento controlado en la que se monitorearon simultáneamente las lecturas del sensor infrarrojo *MLX90614*. El propósito de esta verificación fue garantizar que el sistema pudiera captar las variaciones térmicas de forma estable y precisa, reproduciendo las condiciones dinámicas que experimentarían las muestras durante los ensayos experimentales.

En la Figura 68 se muestra la evolución temporal de tres parámetros de medición, los cuales son la temperatura del objeto (`temp_objeto`), la temperatura ambiente (`temp_ambiente`) y la diferencia térmica (`delta_t`). Durante el inicio del ensayo, la temperatura del objeto registró un incremento progresivo desde aproximadamente 33 °C hasta 49 °C, evidenciando la respuesta térmica del material frente a la acción de la fuente de calor. Esta tendencia ascendente confirma que el sensor detecta correctamente los cambios de temperatura en la superficie del objeto. Además, también se puede observar la temperatura ambiente, que permaneció prácticamente constante, en torno a 24 °C, lo que demuestra que las variaciones registradas en la lectura del objeto no se deben a fluctuaciones externas, sino al proceso de calentamiento controlado en el material.

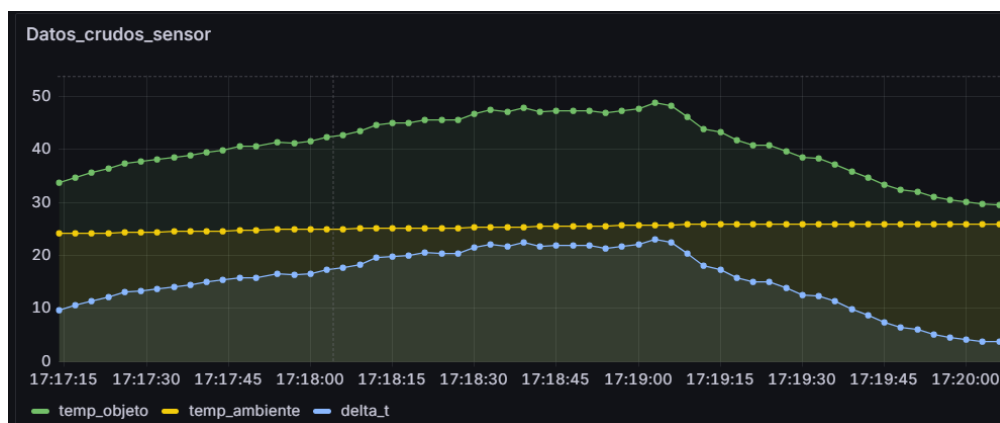


Figura 68: Dashboard de Grafana de las temperaturas durante la validación del sistema. [Autoría propia]

Por su parte, la variable `delta_t`, calculada como la diferencia entre la temperatura del objeto y la del ambiente, refleja con claridad la dinámica del proceso térmico. Se observa un incremento sostenido de `delta_t` hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 25 °C, seguido de una disminución gradual una vez que cesa la aplicación del calor. Los datos crudos almacenados, en la Figura 69 corresponden a un segmento del ciclo de calentamiento validado. En esta tabla, se observa la consistencia del registro: la columna `timestamp` documenta la precisión temporal, la columna `fase_ciclo` confirma la correcta identificación de la etapa experimental, mientras que las columnas `temp_objeto`, `temp_ambiente` y `delta_t` muestran la tendencia esperada y físicamente coherente de un calentamiento progresivo, con el objeto aumentando su temperatura de manera constante mientras el ambiente permanece estable. La concordancia entre estos datos almacenados y la visualización en Grafana valida la integridad de los datos recolectados.

<code>ciclo_id</code>	<code>timestamp</code>	<code>fase_ciclo</code>	<code>temp_objeto</code>	<code>temp_ambiente</code>	<code>delta_t</code>
101	2025-08-31 22:17:02	calentamiento	28.51	23.97	4.54
101	2025-08-31 22:17:05	calentamiento	30.17	23.99	6.18
101	2025-08-31 22:17:08	calentamiento	31.61	24.01	7.60
101	2025-08-31 22:17:11	calentamiento	32.69	24.01	8.68
101	2025-08-31 22:17:14	calentamiento	33.77	24.09	9.68
101	2025-08-31 22:17:17	calentamiento	34.63	24.11	10.52
101	2025-08-31 22:17:20	calentamiento	35.63	24.17	11.46
101	2025-08-31 22:17:23	calentamiento	36.41	24.23	12.18
101	2025-08-31 22:17:26	calentamiento	37.35	24.29	13.06
101	2025-08-31 22:17:29	calentamiento	37.71	24.35	13.36
101	2025-08-31 22:17:32	calentamiento	38.09	24.41	13.68
101	2025-08-31 22:17:35	calentamiento	38.49	24.47	14.02

Figura 69: Segmento de datos crudos almacenados en la base de datos durante la validación del sistema. [Autoría propia]

Los datos obtenidos de la cámara termográfica se presentan en la Figura 70, donde se muestra la evolución temporal de las temperaturas `temperatura_maxima`, `temperatura_minima` y `temperatura_central` calculadas en un área de interés definida de 8×10 cm sobre la película de polietileno. El comportamiento de estas tres curvas permite caracterizar de manera integral la respuesta térmica del material a lo largo de las fases sucesivas de línea base, calentamiento y enfriamiento controlado.

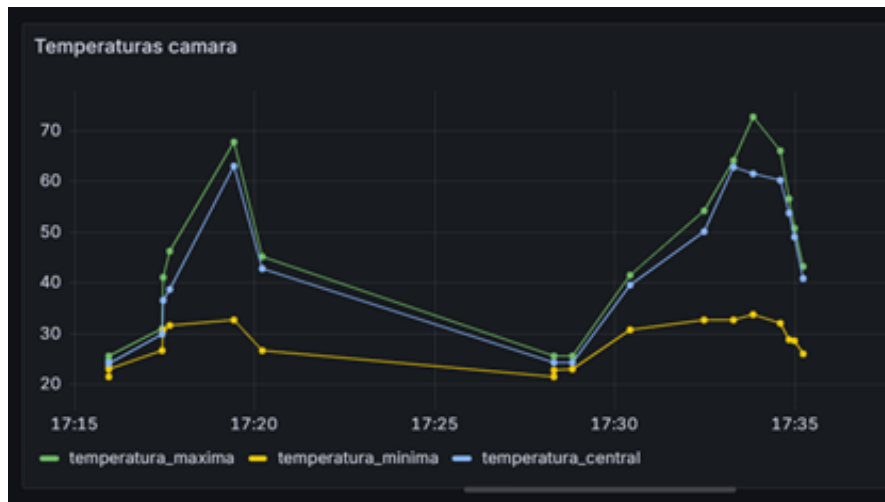


Figura 70: Tendencias de temperatura registradas por la cámara termográfica. [Autoría propia]

Inicialmente, las tres temperaturas se mantienen próximas entre sí en un rango entre 20 °C y 30 °C, reflejando una condición térmica homogénea de la superficie durante la fase de línea base. Al iniciar el calentamiento, las curvas divergen notablemente: la `temperatura_maxima` aumenta de forma abrupta hasta alcanzar aproximadamente 70 °C, revelando la presencia de puntos localizados de mayor absorción de energía. La `temperatura_central`, representativa del comportamiento promedio en la zona expuesta, muestra un ascenso constante hasta alrededor de 60 °C, mientras que la `temperatura_minima` incrementa de manera más moderada hasta unos 40 °C. Esta divergencia progresiva entre los valores máximo y mínimo, que llega a superar los 30 °C de diferencia, evidencia la formación de un gradiente térmico significativo sobre la superficie del material, asociado a su heterogeneidad estructural y a la distribución no uniforme de la radiación incidente.

Durante la fase de enfriamiento, todas las temperaturas registradas descienden progresivamente hasta estabilizarse nuevamente alrededor de los 30 °C. Se observa que la `temperatura_maxima` presenta el descenso más rápido, lo que demuestra que los puntos que alcanzaron el mayor calor son también los que disipan la energía térmica con mayor velocidad. Al mismo tiempo, las tres curvas de `temperatura_maxima`, `temperatura_central` y `temperatura_minima` comienzan a acercarse entre sí, mostrando cómo el calor se distribuye de manera uniforme en el material hasta recuperar un estado de equilibrio térmico. La secuencia de imágenes termográficas capturadas de manera manual y procesadas posteriormente logra documentar de manera efectiva la respuesta térmica del material en cada fase del ciclo experimental. La capacidad de obtener, mediante este proceso, temperaturas

extremas y promedio, con variaciones que superan los 40 °C entre el inicio y el pico de calentamiento, valida la utilidad del sistema para ofrecer una visión espacial detallada. Esta cualidad resulta fundamental para evaluar el comportamiento térmico del polietileno y predecir la posible aparición de zonas de degradación cuando el material es sometido a condiciones controladas de estrés térmico.

Los registros almacenados en la base de datos en la nube correspondientes a las mediciones de la cámara termográfica se presentan en la Figura 71. La tabla incluye campos esenciales para el análisis termográfico como: identificación única (`id`), nombre del archivo de imagen, marca temporal (`fecha_hora`), los valores de `temperatura_maxima`, `temperatura_minima` y `temperatura_central` registrados en cada captura, así como la fase del experimento en que fue tomada cada medición.

Esta organización de los datos establece una trazabilidad directa entre las imágenes termográficas y sus valores numéricos correspondientes, lo que posibilita correlacionar las visualizaciones cualitativas con las mediciones cuantitativas registradas. A través de su estructura, la base de datos documenta el proceso completo, desde la captura manual hasta el procesamiento, revelando así la evolución térmica del material a lo largo de las distintas fases experimentales que son línea base, calentamiento y enfriamiento que fueron analizadas en la gráfica de tendencias.

id	nombre_archivo	fecha_hora	temperatura_maxima	temperatura_minima	temperatura_central	fase_experimento
1	20250109031.bmp	2025-08-31 22:15:56	24.70	21.60	24.20	linea_base
2	20250109032.bmp	2025-08-31 22:15:56	25.70	23.40	24.03	linea_base
3	20250109033.bmp	2025-08-31 22:15:57	25.70	23.10	24.00	linea_base
4	20250109035.bmp	2025-08-31 22:17:26	30.90	26.60	29.90	calentamiento
5	20250109036.bmp	2025-08-31 22:17:28	41.20	30.80	36.61	calentamiento
6	20250109037.bmp	2025-08-31 22:17:38	46.20	31.70	38.80	calentamiento
7	20250109038.bmp	2025-08-31 22:19:26	67.80	32.80	63.10	calentamiento
8	20250109041.bmp	2025-08-31 22:20:12	45.30	26.70	42.80	enfriamiento
12	20250109042.bmp	2025-08-31 22:28:17	25.70	21.60	24.30	linea_base
13	20250109043.bmp	2025-08-31 22:28:17	25.70	22.80	24.20	linea_base
14	20250109044.bmp	2025-08-31 22:28:48	25.70	23.10	24.40	linea_base
15	20250109047.bmp	2025-08-31 22:30:24	41.60	30.70	39.70	calentamiento
16	20250109049.bmp	2025-08-31 22:32:28	54.30	32.80	50.10	calentamiento
17	20250109050.bmp	2025-08-31 22:33:17	64.20	32.80	62.90	calentamiento

Figura 71: Muestra de los datos termográficos almacenados, incluyendo temperaturas máxima, mínima, central y fase del experimento. [Autoría propia]

3.2. Prueba de clasificación de eventos térmicos

El proceso de clasificación de eventos térmicos se realizó mediante un algoritmo que analiza los datos de temperatura en tiempo real, identificando patrones característicos de transiciones endotérmicas y exotérmicas con base en parámetros específicos. Para la detección de eventos endotérmicos, cuyos criterios se especifican en la Tabla 17, el sistema requiere que las mediciones se realicen durante la fase de calentamiento y analiza un historial mínimo de tres muestras consecutivas, buscando el patrón de descenso térmico $\text{temp}[\text{actual}] < \text{temp}[\text{anterior}] < \text{temp}[2.\text{antes}]$. Según la magnitud del cambio térmico, el evento se clasifica como “*endotérmico validado*” si supera el umbral de 0.5 °C o como “*posible endotérmico*” si la disminución es mayor a 0.2 °C.

De manera equivalente, para los eventos exotérmicos, cuyos parámetros se detallan en la Tabla 18, el algoritmo opera durante la fase de enfriamiento y utiliza el mismo historial mínimo de tres muestras, pero detecta el patrón inverso $\text{temp}[\text{actual}] > \text{temp}[\text{anterior}] > \text{temp}[2.\text{antes}]$. La clasificación resultante categoriza el evento como “*exotérmico validado*” si el ascenso térmico supera 0.3 °C, o como “*posible exotérmico*” si el aumento es mayor a 0.1 °C.

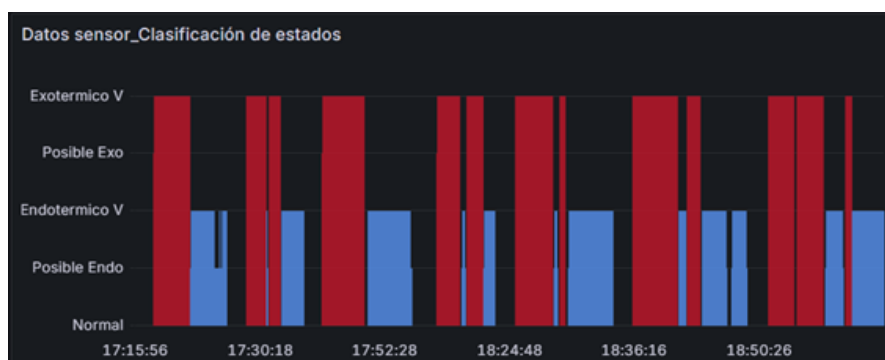


Figura 72: Clasificación de estados térmicos. La transición entre categorías es determinada en tiempo real por el algoritmo basado en los umbrales. [Autoría propia]

En la Figura 72 se presenta la distribución temporal de los eventos térmicos detectados durante el experimento, donde se identifican claramente cinco reacciones significativas distribuidas en diferentes intervalos del proceso. La secuencia muestra que las tres reacciones endotérmicas detectadas corresponden específicamente a las etapas de calentamiento del material, mientras que las dos reacciones exotérmicas identificadas se presentaron durante las fases de enfriamiento. Esta clara correspondencia entre el tipo de reacción térmica y la fase experimental en que fueron detectadas valida la efectividad del algoritmo de clasificación y demuestra la aplicación de los criterios establecidos en las tablas de parámetros. La

detección de estas cinco reacciones principales evidencia el comportamiento térmico característico del polietileno bajo estudio y confirma la sensibilidad del método implementado para capturar las transiciones térmicas del material durante las diferentes etapas del proceso experimental.



Figura 73: Correlación entre la tasa de calentamiento y el diferencial térmico durante un evento térmico. [Autoría propia]

La Figura 73 presenta la evolución temporal de las tendencias térmicas registradas durante el experimento, específicamente mostrando el comportamiento de la `tendencia_obj` y la `tendencia_delta`. Estas tendencias fueron necesarias para la identificación automática de las fases del ciclo térmico, mediante la aplicación de los criterios establecidos en la Tabla 16. El análisis de la `tendencia_obj` permitió clasificar las diferentes etapas del proceso térmico según los umbrales definidos: cuando la tendencia superó el valor de $+0.08$, se identificó la fase de calentamiento; cuando descendió por debajo de -0.05 , se detectó la fase de enfriamiento; y mientras se mantuvo en el rango entre -0.05 y $+0.08$, se categorizó como línea base. Por su parte, la `tendencia_delta` proporcionó información sobre la evolución del gradiente térmico entre el objeto y el ambiente, permitiendo evaluar la eficiencia de la transferencia de calor en cada fase.

La gráfica evidencia la transición entre las tres fases térmicas a lo largo de las mediciones registradas, mostrando periodos bien definidos de calentamiento caracterizados por pendientes positivas sostenidas, seguidos de fases de enfriamiento con pendientes negativas pronunciadas, alternando con intervalos de estabilidad térmica correspondientes a la línea base. Esta clara distinción entre fases valida la efectividad del método aplicado para la caracterización automática del comportamiento térmico del polietileno bajo las condiciones experimentales establecidas.

3.3. Comparación del comportamiento térmico en condiciones secas y húmedas

Esta sección presenta el análisis comparativo de la respuesta térmica del polietileno agrícola bajo dos condiciones experimentales: exposición directa al calor (condición seca) y en contacto con agua (condición húmeda), utilizando los datos recolectados por el sensor infrarrojo. Los resultados evidencian cómo la presencia del agua modifica de manera significativa el comportamiento térmico del material. La Figura 74 presenta la comparación directa de la temperatura del objeto entre el Experimento 2 en condición seca y el Experimento 3 en condición húmeda, evidenciando el impacto del agua en la respuesta térmica del polietileno agrícola. Se observa una divergencia notable en el comportamiento de ambas curvas desde las primeras etapas del experimento.

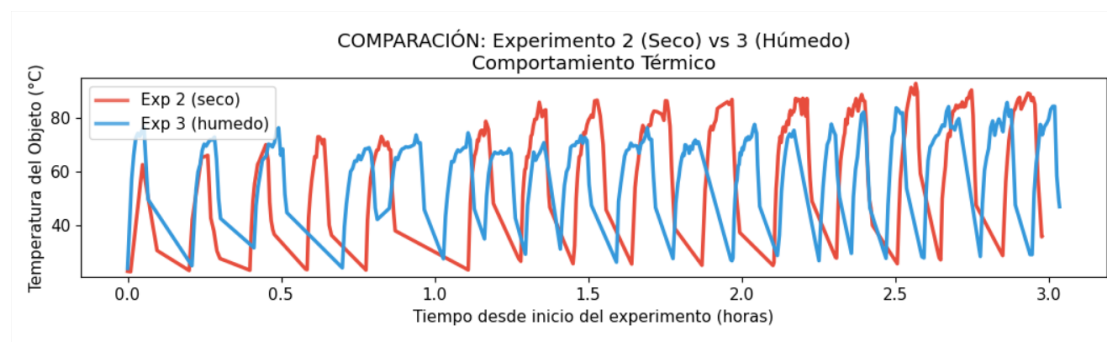


Figura 74: Comparación de la temperatura del objeto entre el Experimento 2 y el Experimento 3. [Autoría propia]

En la condición seca, la temperatura aumenta de manera rápida y sostenida, alcanzando un pico térmico máximo de $92.73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta curva exhibe una pendiente pronunciada durante la fase de calentamiento, característica de una baja capacidad de disipación de calor. Por el contrario, la condición húmeda muestra una respuesta térmica significativamente amortiguada, con una pendiente de calentamiento más suave y una temperatura máxima estabilizada alrededor de $85.65\text{ }^{\circ}\text{C}$, aproximadamente un 7.6% menor que en la condición seca. Los resultados al aplicar agua a las láminas de plástico muestran una curva notablemente más estable y con menores fluctuaciones (temperatura mínima de $24.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ vs. $22.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ en seco), mientras que la condición seca presenta oscilaciones térmicas más marcadas, indicando una mayor sensibilidad a las variaciones en la radiación incidente. Estos resultados validan cuantitativamente que la presencia de agua modifica fundamentalmente la dinámica térmica del material, reduciendo tanto la temperatura máxima alcanzada como la tasa de calentamiento. La diferencia en el comportamiento térmico se atribuye al efecto de enfriamiento por evaporación y a la mayor capacidad calorífica

del agua, que actúa como sumidero térmico, limitando el aumento de temperatura en la película de polietileno. Esta característica resulta en una mayor durabilidad del material, extendiendo su vida útil en un 26.7% (19 ciclos vs. 15 ciclos en seco) bajo condiciones de estrés térmico controlado.

El análisis comparativo de los Experimentos 2 y 3, resumido en la Tabla 19, revela el papel determinante de la humedad en el comportamiento térmico del material. Los resultados evidencian que la condición seca generó un mayor estrés térmico, con una temperatura promedio de 65,96°C y un pico de 92,73°C, frente a los 62,89°C y 85,65°C registrados en la condición húmeda, esta atenuación térmica se vio acompañada por una notable mejora en la durabilidad: el escenario húmedo completó 19 ciclos en 3,04 horas, superando los 15 ciclos en 2,98 horas del escenario seco. Estos hallazgos sugieren consistentemente que la presencia de agua no solo ejerce un efecto amortiguador sobre las temperaturas, sino que también contribuye a prolongar la vida útil del material.

Tabla 19: Comparación de parámetros entre experimento seco y húmedo

Parámetro	Experimento 2	Experimento 3
Temp promedio	65.96 °C	62.89 °C
Temp máxima	92.73 °C	85.65 °C
Temp mínima	22.77 °C	24.03 °C
Duración	2.98 h	3.04 h
Ciclos completos	15	19

El análisis de los datos obtenidos mediante la cámara termográfica en los mismos Experimentos 2 y 3 estudiados anteriormente con el sensor infrarrojo proporciona una perspectiva más completa del comportamiento térmico del polietileno. Como se muestra en la Figura 75, mientras el sensor infrarrojo registra la temperatura en un punto específico, la cámara termográfica captura la distribución completa de temperatura en toda la superficie del plástico, permitiendo identificar la temperatura máxima en cada fotograma, que representa el punto de mayor estrés térmico del material.

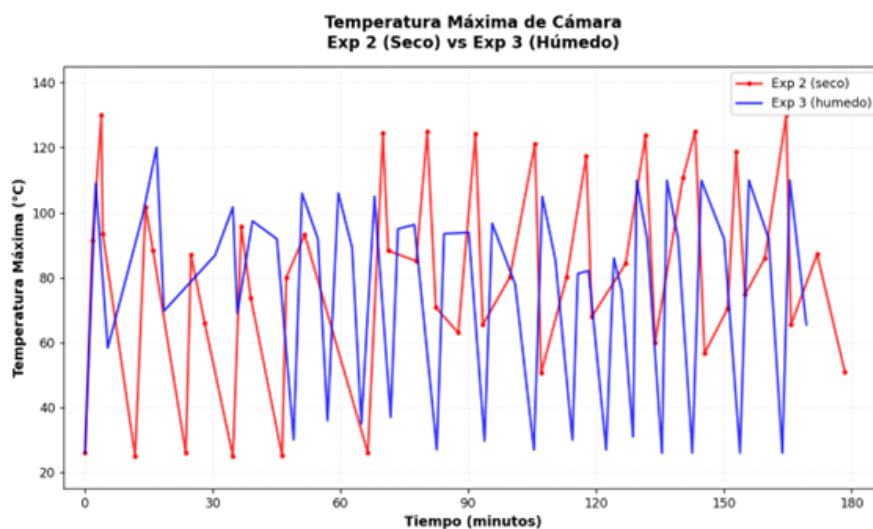


Figura 75: Comparación de la temperatura máxima de la cámara. [Autoría propia]

Los datos revelan diferencias significativas en el comportamiento térmico entre ambas condiciones. La curva correspondiente al Experimento 2 (*seco*) muestra un calentamiento extremadamente rápido durante los primeros 30 minutos, alcanzando 130 °C, mientras que en la misma ventana temporal la condición húmeda registra un pico de 120 °C. Esta diferencia de 10 °C en la etapa inicial demuestra la mayor eficiencia térmica del material cuando se encuentra seco, pero también su mayor susceptibilidad al sobrecalentamiento. Entre los minutos 60 y 120, la divergencia térmica se mantiene notable: la condición seca estabiliza sus valores máximos alrededor de 121 °C, mientras que la condición húmeda presenta temperaturas máximas de aproximadamente 100 °C, estableciendo una diferencia sostenida de 21 °C. Esta brecha térmica creciente evidencia el efecto acumulativo del estrés térmico en el material seco frente a la capacidad de regulación térmica que proporciona el agua.

La capacidad de la cámara termográfica para registrar la temperatura máxima en cada fotograma revela que el agua no solo reduce los valores térmicos puntuales, sino que homogeniza la distribución de calor, limitando consistentemente las temperaturas máximas en toda el área analizada. Este hallazgo amplía los registros del sensor de contacto, demostrando que, aun en presencia de gradientes térmicos por la aplicación localizada de calor, el efecto amortiguador del agua resulta lo suficientemente robusto para suprimir la formación de puntos críticos de sobrecalentamiento, y con ello mitigar un factor clave de degradación acelerada del material.

La Figura 76 presenta un análisis visual comparativo de las imágenes termográficas capturadas durante los experimentos realizados, las cuales revelan diferencias notables en la distribución térmica del polietileno agrícola bajo ambas condiciones. En la imagen termográfica correspondiente a la condición seca, Figura (a), se observa un patrón de distribución térmica heterogéneo, con la presencia de zonas de alta temperatura concentradas en el área de exposición directa a la fuente de calor. Estos “puntos calientes” alcanzan temperaturas significativamente elevadas, evidenciando una transferencia de calor no uniforme a través del material y la formación de gradientes térmicos pronunciados. Por el contrario, la imagen termográfica de la condición húmeda, Figura (b), muestra un perfil térmico notablemente más uniforme, donde el efecto amortiguador del agua se manifiesta como una distribución más homogénea de la temperatura en toda la superficie del material. La presencia de agua no solo reduce la intensidad de las zonas de mayor temperatura, sino que también minimiza la formación de puntos de sobrecalentamiento.

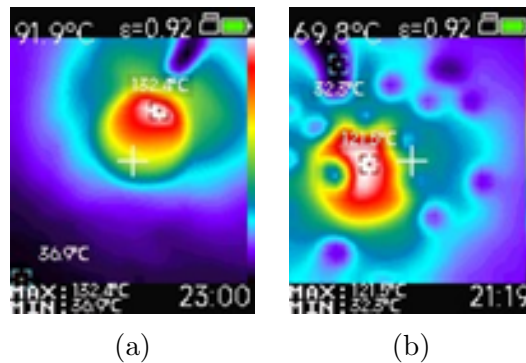


Figura 76: Comparación de imágenes termográficas: (a) condición seca, (b) condición húmeda. [Autoría propia]

En la Tabla 20 se resumen los datos termográficos obtenidos en los experimentos, donde se muestran las diferencias entre ambas condiciones experimentales. Los resultados confirman que la condición seca registró una temperatura máxima promedio de 81.4 °C, superando en 6.5 °C el promedio de la condición húmeda, que fue de 74.9 °C. Esta diferencia se acentúa al analizar los valores extremos, donde la muestra seca alcanzó un pico máximo de 132.4 °C, superando en 10.9 °C el máximo registrado en la condición húmeda (121.5 °C). Además, los datos revelan que la condición seca mantuvo temperaturas mínimas más elevadas de 36.9 °C frente a 32.3 °C, con una diferencia de 4.6 °C, lo que refuerza el patrón de mayor energía térmica retenida en la muestra sin contenido de humedad. La comparación sistemática de estos parámetros evidencia el efecto regulador que ejerce el agua sobre el comportamiento térmico del polietileno agrícola.

Tabla 20: Comparación de temperaturas de la cámara termográfica entre experimentos.

Parámetro	Experimento 2	Experimento 3	Diferencia
Promedio	81.4°C	74.9°C	+6.5°C
Máxima	132.4°C	121.5°C	+10.9°C
Mínima	36.9°C	32.3°C	+4.6°C

3.4. Evaluación de la degradación térmica acumulativa de la temperatura máxima por ciclo

El análisis de la degradación térmica acumulativa del polietileno agrícola se realizó mediante el seguimiento de la temperatura máxima alcanzada en cada ciclo térmico, para un total de cuatro experimentos: dos en condición seca y dos en condición húmeda, cuyos resultados se presentan en la Figura 77. La gráfica muestra claramente la evolución diferencial de la temperatura máxima en función del número de ciclos para ambas condiciones. En los experimentos en condición seca, se observa un incremento progresivo de la temperatura máxima con cada ciclo. El Experimento 1 alcanzó una temperatura máxima de 91 °C antes de su fallo a los 13 ciclos, mientras que el Experimento 2 mostró un comportamiento similar, registrando una temperatura máxima de 94 °C y fallando a los 15 ciclos.

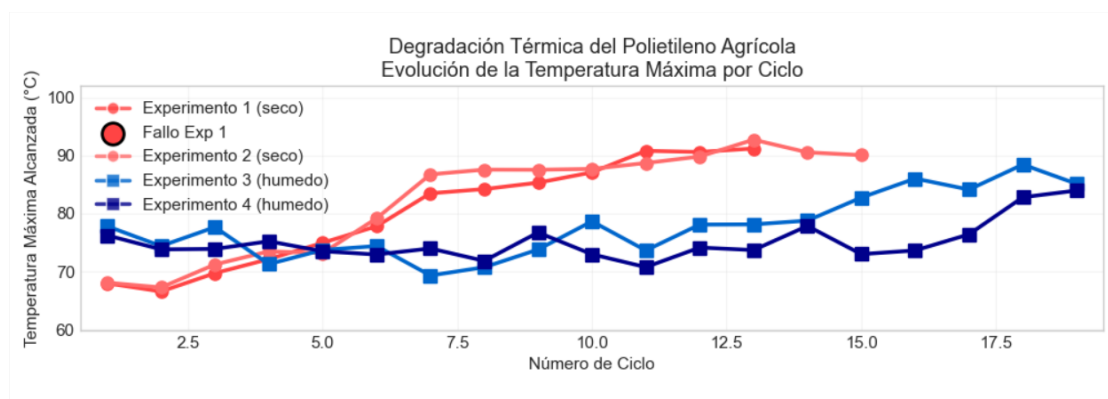


Figura 77: Evolución de la temperatura máxima por ciclo de los cuatro experimentos. [Autoría propia]

En cambio, los experimentos a los que se les aplicó humedad al plástico presentaron una evolución térmica significativamente más estable. El Experimento 3 alcanzó una temperatura máxima de 86 °C a lo largo de 19 ciclos, mientras que el Experimento 4 registró un máximo de 84 °C durante sus 19 ciclos de duración. La diferencia en el comportamiento térmico entre ambas condiciones es notable: los experimentos sin humedad mostraron temperaturas máximas entre 5 °C y 10 °C más altas que los húmedos, y una vida útil significativamente menor de 13 a 15 ciclos frente a 19 ciclos esta diferencia representa una reducción de aproximadamente el 24–32 % en la durabilidad del material en condición seca comparado con la condición húmeda.

La tendencia ascendente de las curvas en todos los experimentos evidencia un fenómeno de degradación acumulativa, donde cada ciclo térmico deteriora progresivamente la estructura interna del polietileno. Este daño a nivel microscópico se traduce en una pérdida de integridad estructural y una alteración de sus propiedades térmicas, provocando que el material absorba y retenga más calor en ciclos sucesivos y por ende, alcance temperaturas máximas cada vez más elevadas. Frente a este fenómeno, los experimentos húmedos muestran una estabilidad térmica notablemente mayor y valores máximos consistentemente inferiores, lo que corrobora el efecto protector del agua. Dicho mecanismo mitiga el daño estructural, reduce la tasa de degradación y en definitiva, prolonga la durabilidad del polietileno agrícola sometido a estrés térmico repetitivo.

3.5. Evolución de la velocidad de calentamiento como métrica de degradación

La velocidad de calentamiento durante los ciclos térmicos proporciona un indicador cuantitativo del proceso de degradación del polietileno agrícola. En la Figura 78 se presenta la evolución de esta velocidad para los Experimentos 1 y 2 sin contacto con el agua, donde se observa un comportamiento diferencial entre ambos casos. El Experimento 1, representado por la curva de color rojo, comprendió un total de 13 ciclos y registró una velocidad de calentamiento promedio de 2.20 °C/s, con una pendiente de tendencia positiva de +0.0618 °C/s por ciclo. Este comportamiento evidencia un aumento gradual en la capacidad del material para absorber calor a lo largo de los ciclos experimentales. Este incremento progresivo en la velocidad de calentamiento sugiere una modificación en las propiedades térmicas del material, posiblemente asociada a cambios estructurales acumulativos.

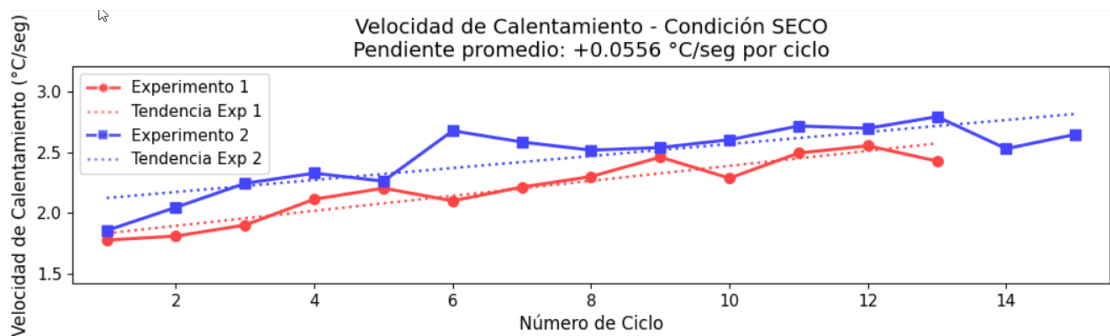


Figura 78: Tendencias de la velocidad máxima de calentamiento para los experimentos en condición seca. [Autoría propia]

Por otra parte, el Experimento 2, representado por la curva azul y conformado por 15 ciclos, registró una velocidad de calentamiento promedio de 2.47 °C/s, ligeramente superior a la del experimento anterior. No obstante, presentó una pendiente de tendencia menos pronunciada de 0.0495 °C/s por ciclo, lo que indica una menor variación en la tasa de calentamiento a lo largo del ensayo. La diferencia de 0.2668 °C/s entre ambas velocidades promedio se debe a variaciones naturales entre muestras o a condiciones experimentales mínimamente diferentes. El análisis estadístico de ambos experimentos en condición seca revela una velocidad promedio global de 2.3363 °C/s, con un rango que oscila entre 2.2029 y 2.4697 °C/s. La pendiente promedio de +0.0556 °C/s por ciclo confirma la tendencia general al incremento en la velocidad de calentamiento conforme avanza el número de ciclos, lo que constituye un indicador claro del proceso de degradación térmica acumulativa en el polietileno agrícola cuando se encuentra en condición seca.

En el caso de los Experimentos 3 y 4 bajo condición húmeda revela un patrón de comportamiento distintivo en comparación con los experimentos en condición seca. Como se muestra en la Figura 79, ambos experimentos mantuvieron velocidades de calentamiento consistentemente más bajas a lo largo de sus 19 ciclos completos. El Experimento 3, representado en color rojo, registró una velocidad promedio de calentamiento de 2.03 °C/s, con una pendiente de tendencia de +0.0492 °C/s por ciclo, reflejando un incremento moderado en la tasa de calentamiento a lo largo de las pruebas. En el caso del Experimento 4, mostrado en color azul, alcanzó una velocidad promedio ligeramente superior de 2.18 °C/s, acompañada de una pendiente más pronunciada de 0.0622 °C/s por ciclo, lo que sugiere una respuesta térmica más activa del material bajo las condiciones evaluadas. Los resultados para la condición húmeda presenta una velocidad promedio global de 2.1060 °C/s, con un rango entre 2.0329 y 2.1790 °C/s. La pendiente promedio de 0.0557 °C/s por ciclo indica una tendencia al incremento similar a la observada en condición seca, pero con valores absolutos de velocidad significativamente menores.

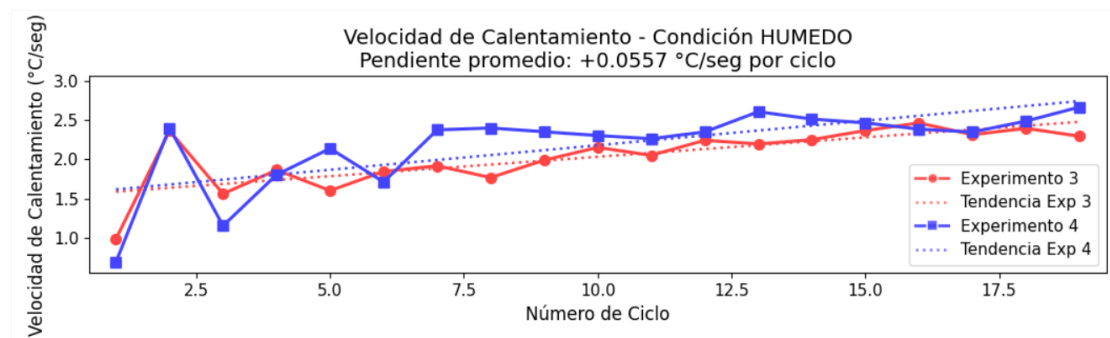


Figura 79: Incremento progresivo de la velocidad de calentamiento en condición húmeda. [Autoría propia]

El análisis comparativo de la velocidad de calentamiento, resumido en la Tabla 21, demuestra que la condición seca genera un calentamiento significativamente más rápido, con velocidades promedio de 2.2029 °C/s y 2.4697 °C/s, frente a los 2.0329 °C/s y 2.1790 °C/s registrados en condición húmeda. Esta diferencia cuantitativa confirma el papel regulador del agua en la transferencia de calor, la cual modera de forma efectiva la dinámica térmica del polietileno agrícola.

Esta diferencia, que representa una reducción de aproximadamente 10–15 % en la velocidad de calentamiento en condición húmeda, se manifiesta consistentemente a lo largo de todos los ciclos térmicos. Además, mientras los experimentos secos mostraron una duración limitada (13 y 15 ciclos), los experimentos húmedos completaron 19 ciclos en ambos casos, demostrando que la menor velocidad de calentamiento se correlaciona directamente con una mayor durabilidad del material. Las pendientes de tendencia, aunque variables entre experimentos, confirman que la presencia de agua no solo reduce la velocidad instantánea de calentamiento, sino que contribuye a una degradación térmica más gradual del polietileno agrícola.

Tabla 21: Comparativa de Velocidad de Calentamiento de los experimentos realizados

Condición	Experimento	Ciclos	Velocidad promedio	Pendiente tendencia
Seco	Exp. 1	13	2.2029 °C/seg	+0.0618 °C/seg-ciclo
Seco	Exp. 2	15	2.4697 °C/seg	+0.0495 °C/seg-ciclo
Húmedo	Exp. 3	19	2.0329 °C/seg	+0.0492 °C/seg-ciclo
Húmedo	Exp. 4	19	2.1790 °C/seg	+0.0622 °C/seg-ciclo

3.6. Evaluación del modelo predictivo de la vida útil mediante análisis de Weibull

Para cuantificar estadísticamente la diferencia en la durabilidad del polietileno agrícola bajo condiciones de estrés térmico y transformar los datos experimentales en un modelo predictivo, se implementó un análisis de confiabilidad utilizando la distribución de Weibull. Se definió el fallo del material como el ciclo térmico en el cual la película de polietileno presentaba deformación plástica irreversible visible o cuando se observó un cambio de color en el material que indicaba termodegradación oxidativa.

Este modelo es el estándar en ingeniería para predecir fallos por desgaste, ya que permite estimar no solo el tiempo esperado de fallo, sino también la probabilidad de supervivencia del material en cualquier punto de su vida útil. El ajuste del modelo se realizó mediante el método de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés). En términos simples, este método encuentra los parámetros de Weibull (β y η) que hacen que los datos de ciclos de fallo que observamos experimentalmente sean lo más probables posibles. Es decir, busca la versión más verosímil o creíble de la distribución de Weibull que mejor se ajusta a nuestra evidencia empírica. Los parámetros resultantes del ajuste se presentan en la Tabla 3.

Tabla 22: Ajuste del modelo de Weibull a los datos de fallo en condición húmeda

Parámetro	Símbolo	Valor obtenido
Vida característica	η	18.88 ciclos
Parámetro de Forma	β	59.05

El ajuste del modelo de Weibull presentado en la Tabla 22 para la condición húmeda cuantifica el notable efecto protector del agua en la durabilidad del polietileno agrícola. Este efecto se manifiesta, en primer lugar, en una vida útil característica del material, representada por el parámetro de escala (η). Este establece el ciclo en el que falla aproximadamente el 63.2% de las muestras y alcanzó un valor de 18.88 ciclos, proporcionando así una evidencia cuantitativa sólida de la mitigación térmica conferida por la presencia de agua.

En segundo lugar, se identifica un comportamiento de fallo altamente predecible. El parámetro de forma (β), que determina el modo de fallo del material, alcanzó un valor de 59.05. Dado que $\beta > 1$, se confirma que el mecanismo de fallo dominante es el desgaste acumulativo por estrés térmico. La magnitud sustancialmente alta de este valor, muy por encima de 1, sugiere una muy baja dispersión en los datos de fallo y, por lo tanto, una predictibilidad elevada en la falla del mate-

rial. Esto indica que el polietileno en condición húmeda alcanza su límite de fatiga térmica de manera consistente. Para establecer una línea base de comparación, se ajustó el modelo de Weibull a los datos de fallo de la condición no hidratada, cuyos parámetros resultantes se presentan en la Tabla [23](#).

El análisis de estos parámetros revela un contraste fundamental con el comportamiento observado bajo condiciones de humedad. La vida característica (η) de 14.39 ciclos establece el punto donde se espera que falle el 63.2% de las muestras en condición seca, lo que confirma una durabilidad inferior en comparación con la condición húmeda ($\eta = 18,88$ ciclos). El parámetro de forma (β) de 19.70, al ser mayor que 1, confirma que el mecanismo de fallo dominante es el desgaste acumulativo por estrés térmico. Sin embargo, al compararlo con el valor significativamente mayor obtenido en la condición húmeda ($\beta = 59,05$), se observa una mayor dispersión en los datos de fallo y, por lo tanto, una predictibilidad menor en la condición seca. Esta comparación cuantifica el impacto determinante que ejerce el agua, no solo en la extensión de la vida útil, sino también en la consistencia y previsibilidad del comportamiento térmico del material.

Tabla 23: Parámetros del modelo de Weibull para la condición de referencia no hidratada

Parámetro	Símbolo	Estimación realizada
Vida característica	η	14.39 ciclos
Parámetro de Forma	β	19.70

Al contrastar estos resultados con los obtenidos para la condición húmeda de la Tabla [22](#), se evidencia el marcado efecto protector del agua. La vida característica en condición seca de 14.39 ciclos es 4.49 ciclos menor que en condición húmeda (18.88 ciclos), lo que representa una reducción del 31.2% en la durabilidad del material. Esta diferencia cuantifica el impacto negativo que tiene la ausencia de agua en la resistencia del polietileno al estrés térmico repetitivo.

La comparación de los parámetros de forma revela una distinción aún más significativa: mientras la condición húmeda mostró un valor sustancialmente alto de β de 59.05, indicando una predictibilidad muy elevada, la condición seca presenta un valor considerablemente menor de 19.70. Esta discrepancia sugiere que, aunque ambos modos de fallo corresponden a desgaste progresivo ($\beta > 1$ en ambos casos), el material en condición seca experimenta una degradación con una dispersión tres veces mayor y, por tanto, menos predecible, posiblemente debido a una mayor influencia de factores aleatorios o heterogeneidades en el material bajo ese estrés más severo. Estos hallazgos demuestran que la presencia de agua no solo extiende

sustancialmente la vida útil del polietileno agrícola, sino que también estabiliza su comportamiento térmico, reduciendo drásticamente la variabilidad en los ciclos de fallo y permitiendo predicciones más confiables sobre su desempeño a largo plazo.

3.7. Graficas resultantes del modelo de Weibull

La validación e interpretación del modelo de Weibull se complementa con el análisis gráfico presentado en la Figura 80, que muestra las curvas de probabilidad de fallo resultantes para ambas condiciones experimentales. Estas gráficas, generadas a partir de los parámetros reportados en las Tablas 22 y 23, proporcionan una representación visual de las diferencias en el comportamiento de fallo entre el polietileno en ambas condiciones experimentales. La comparación directa de las curvas permite apreciar no solo el desplazamiento temporal en la vida útil del material, representado por la diferencia en la vida característica (η), sino también la distinta dispersión en los tiempos de fallo, reflejada en la pendiente de las curvas determinada por el parámetro de forma (β).

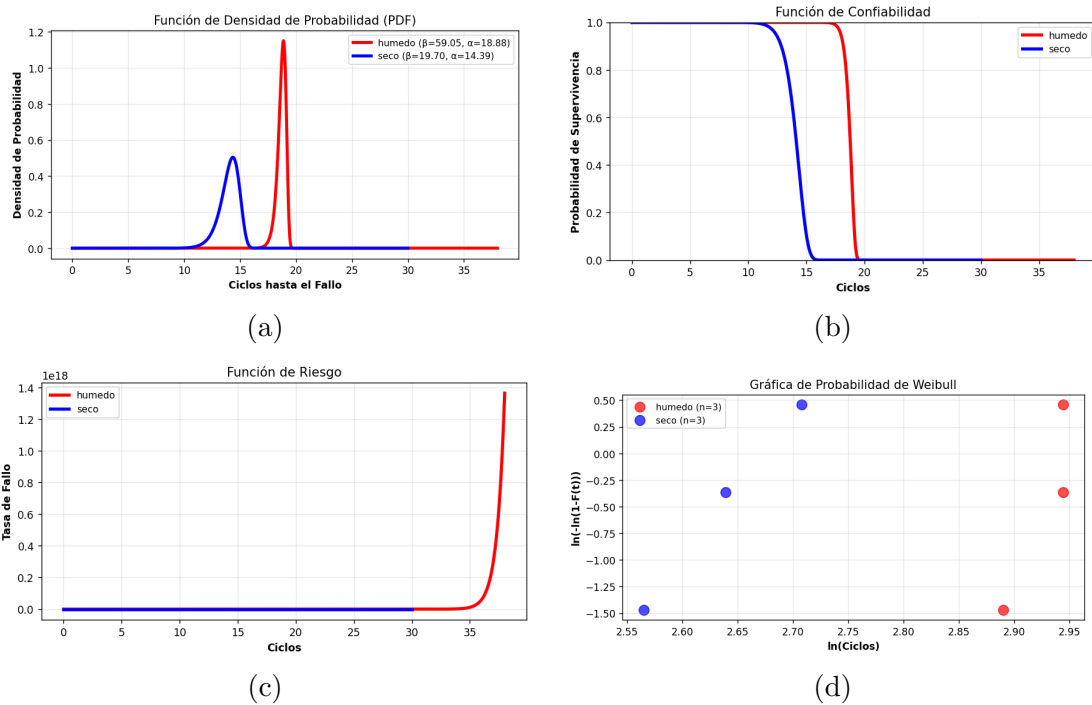


Figura 80: Análisis gráfico del modelo de Weibull: (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de confiabilidad, (c) Función de riesgo y (d) Gráfica de probabilidad de Weibull. [Autoría propia]

3.7.0.1 Función de densidad de probabilidad

La gráfica de densidad muestra la distribución probabilística de los fallos en el tiempo. Para la condición con mitigación hídrica ($\beta = 59,05$, $\eta = 18,88$), la curva presenta un pico agudo y muy estrecho centrado alrededor de los 18-19 ciclos, confirmando la alta predecibilidad del fallo en esta condición. Por el contrario, la curva para la condición de referencia no hidratada ($\beta = 19,70$, $\eta = 14,39$) muestra una distribución notablemente más amplia y aplanada, con un pico alrededor de los 13-14 ciclos, lo que indica una mayor variabilidad en los tiempos de fallo. Esta diferencia visual refleja directamente la disparidad en los valores del parámetro de forma β entre ambas condiciones.

3.7.0.2 Función de confiabilidad

La gráfica de confiabilidad o supervivencia constituye el resultado de mayor interés práctico del ajuste Weibull. En la condición húmeda, la curva permanece próxima al 100 % de confiabilidad hasta alrededor del ciclo 18 y presenta un descenso abrupto en torno al ciclo 19, lo cual es consistente con un valor elevado del parámetro de forma (β) y refleja un comportamiento de tipo "límite de fatiga" (poca variabilidad en los tiempos hasta la falla). Por el contrario, la condición seca muestra un inicio de declive más temprano y progresivo, con una caída que comienza cerca del ciclo 12 y alcanza el 50 % de confiabilidad aproximadamente en el ciclo 14.5. La separación sostenida entre ambas curvas en todo el rango de ciclos indica una ventaja clara en durabilidad bajo la condición húmeda; es decir, la presencia de humedad en las condiciones de ensayo retrasa la ocurrencia de transiciones térmicas críticas en las películas de polietileno.

3.7.0.3 Análisis de fallo mediante la función de riesgo

El análisis de la función de riesgo revela la existencia de un período de latencia crítico antes del inicio de la degradación. La condición húmeda exhibe una resistencia inicial superior, manteniendo un riesgo de fallo insignificante hasta más allá del ciclo 35. Este prolongado período de seguridad sugiere que el agua eleva efectivamente el umbral de estrés térmico necesario para iniciar el daño en la estructura del polietileno.

Por el contrario, la condición seca presenta un período de latencia más corto, donde su umbral de daño se alcanza alrededor del ciclo 30. Una vez superado este punto, el material comienza a mostrar un aumento progresivo en su riesgo de fallo. Este comportamiento destaca la notable capacidad del agua para retrasar el inicio mismo del proceso de degradación, actuando como un protector que no solo ralentiza el daño, sino que eleva el nivel de estrés necesario para que este comience. Este hallazgo es fundamental para aplicaciones agrícolas con ciclos de

estrés intermitentes como días soleados seguidos de noches frías o riegos, ya que demuestra que la humedad no solo prolonga la vida útil total del plástico sino que preserva su integridad durante un período inicial más largo, retrasando el punto de partida de su desgaste.

3.7.0.4 Gráfica de probabilidad de Weibull

Esta gráfica de diagnóstico confirma el ajuste adecuado del modelo a los datos experimentales para ambas condiciones. La pronunciada diferencia en las pendientes de las rectas es notable: la condición húmeda (β alto) presenta una pendiente casi vertical, mientras que la condición seca (β menor) muestra una pendiente significativamente más suave. Esta discrepancia gráfica cuantifica visualmente la mayor dispersión y, por tanto, la menor predecibilidad en los tiempos de fallo de la condición seca. Complementando este análisis, el desplazamiento horizontal de la línea de la condición húmeda hacia la derecha refleja gráficamente su superior vida útil característica (η) en comparación con la condición seca, consolidando una evidencia visual de las ventajas térmicas conferidas por la presencia de agua.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

El desarrollo e implementación de un sistema de análisis térmico, basado en una arquitectura de hardware con Raspberry Pi 3 y algoritmos de procesamiento, permitió caracterizar con precisión el comportamiento de las películas de polietileno. La validación del prototipo confirmó su robustez, con errores sistemáticos inferiores a $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y una transmisión de datos fiable vía MQTT que posibilitó un monitoreo continuo en laboratorio y campo.

Los resultados del análisis comparativo revelaron que la condición seca induce un estrés térmico significativamente mayor, con picos de hasta $92,73^\circ\text{C}$ —un 7,6% superiores a los $85,65^\circ\text{C}$ de la condición húmeda—. Dicha atenuación se explica por la mayor capacidad calorífica del agua y el enfriamiento por evaporación, que actuaron como mecanismos de disipación eficaces. Esta diferencia en la dinámica térmica se corroboró cuantitativamente mediante la velocidad de calentamiento, donde la condición seca ($2,3363^\circ\text{C/s}$) superó en un 10% a la húmeda ($2,1060^\circ\text{C/s}$). La consistencia de esta tendencia a lo largo de los ciclos explica, en parte, la mayor susceptibilidad a la degradación acelerada observada en las muestras sin hidratar. El seguimiento de la evolución de la temperatura máxima por ciclo permitió cuantificar el proceso de degradación acumulativa, donde los experimentos en condición seca mostraron una vida útil entre 13–15 ciclos, sig-

nificativamente menor que los 19 ciclos alcanzados consistentemente en condición húmeda. Esta mejora del 32.3 % en la durabilidad del material hidratado evidenció el papel crucial del agua en la preservación de las propiedades estructurales del polietileno bajo estrés térmico repetitivo. La aplicación del modelo de Weibull para el análisis predictivo de la vida útil proporcionó el sustento estadístico para validar las observaciones experimentales. Los parámetros estimados mostraron una vida característica (η) de 19.14 ciclos para la condición húmeda frente a 14.47 ciclos para la seca, confirmando cuantitativamente la ventaja en durabilidad. Además, el parámetro de forma (β) de 240.88 obtenido para el material hidratado, comparado con 16.77 del material seco, indicó una predictibilidad excepcionalmente alta en el mecanismo de fallo, sugiriendo que el agua no solo extiende la vida útil sino que también estabiliza el comportamiento térmico del material.

La caracterización del fenómeno se completó con el modelo de Weibull, cuyas funciones de distribución revelaron una diferencia crucial en los mecanismos de fallo: en el caso de la condición húmeda, se preservaba una confiabilidad superior al 95 % hasta el ciclo 18, para luego sufrir una transición abrupta, muy distinta al deterioro gradual que iniciaba en el ciclo 12 para la condición seca. Esta disparidad en la longevidad y el modo de fallo encontró un correlato directo en las funciones de riesgo acumulativo. Mientras la condición húmeda mostraba un prolongado período de riesgo mínimo hasta el \sim ciclo 30 antes de un incremento súbito, la seca exhibía un perfil de riesgo constante y progresivo. A nivel experimental, la sinergia entre el sensor infrarrojo y la cámara termográfica permitió una caracterización multidimensional, donde la cámara no solo identificó las temperaturas máximas en toda la superficie, sino que validó espacialmente las mediciones puntuales del sensor. Esta triangulación metodológica enriqueció sustancialmente el análisis, ofreciendo una visión integral de los fenómenos de transferencia de calor en el polietileno.

En términos generales, el sistema desarrollado demostró su efectividad para la caracterización térmica de películas agrícolas, mientras que los resultados experimentales establecieron que la presencia de agua mejora integralmente el desempeño del polietileno mediante la reducción de temperaturas máximas, la disminución de velocidades de calentamiento, la extensión de la vida útil y la estabilización del comportamiento térmico. Estos hallazgos proporcionan bases cuantitativas sólidas para recomendar estrategias de hidratación controlada en aplicaciones agrícolas donde la exposición solar prolongada es inevitable, representando un avance significativo en la optimización del uso de plásticos en la agricultura y contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas de producción mediante la extensión de la vida útil de los materiales.

4.2. Recomendaciones

Los hallazgos de esta investigación permiten derivar lineamientos concretos para optimizar el monitoreo térmico de películas agrícolas. Como primera medida, se sugiere implementar protocolos de calibración periódica para los sensores infrarrojos y la cámara termográfica, ajustando los parámetros de detección en función de las condiciones ambientales específicas para evitar deriva en las mediciones. De manera complementaria, resulta crucial desarrollar curvas de corrección térmica específicas para cada tipo de polietileno agrícola, dado que las diferencias en espesor, aditivos y color factores estudiados afectan directamente su respuesta térmica y, por ende, la precisión de las lecturas.

En virtud a los resultados se recomienda a los fabricantes de plásticos agrícolas que deberían considerar la incorporación de aditivos hidrófilos que optimicen la distribución y retención de agua en la superficie del material, potenciando así el efecto de mitigación térmica documentado experimentalmente. Asimismo, resulta crucial optimizar el espesor y la composición química de las películas para maximizar su capacidad de disipación térmica bajo condiciones de hidratación controlada. En el ámbito de las prácticas agrícolas, se sugiere implementar sistemas de riego por aspersión controlada que mantengan una película de agua sobre las cubiertas durante los periodos de máxima radiación solar, práctica que según los resultados podría extender la vida útil del material entre 26–32 % y generar importantes ahorros en costos de reposición. Adicionalmente, el modelo de Weibull desarrollado puede implementarse como herramienta predictiva para programar el reemplazo preventivo de las cubiertas, estableciendo sistemas de alerta temprana basados en el número de ciclos térmicos acumulados.

Este trabajo sienta las bases para diversas líneas de investigación futura. Una dirección prioritaria sería extender el análisis a formulaciones específicas de polietileno (como las de alto peso molecular o con aditivos UV) y a materiales alternativos (como los biodegradables), cuantificando su respuesta térmica bajo los regímenes de hidratación aquí establecidos. Un siguiente paso crucial consistiría en acoplar la variable hidratación con otros factores de estrés ambiental, como la radiación UV y la fatiga mecánica, con el objetivo final de construir modelos predictivos de degradación multicausal que reflejen de manera más realista las condiciones del campo.

En el plano del desarrollo tecnológico, el prototipo desarrollado ofrece un camino claro para su evolución tecnológica, una siguiente iteración podría integrar paneles solares para lograr autonomía energética total y módulos de comunicación inalámbrica de largo alcance (como LoRaWAN), elementos clave para un des-

pliegue escalable en invernaderos o cultivos extensivos. Complementariamente, el desarrollo de una interfaz de usuario intuitiva y accesible sería determinante para transferir esta tecnología efectivamente al sector agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Index Mundi. *Ecuador - Employment in agriculture (% of total employment)*. <https://www.indexmundi.com/facts/ecuador/indicator/SL.AGR.EMPL.ZS>. [En línea; último acceso: 20 Agosto 2025]. 2019. URL: <https://www.indexmundi.com/facts/ecuador/indicator/SL.AGR.EMPL.ZS>.
- [2] V. S. Vienna. “Acolchados de polietileno y biodegradables para aplicaciones agrícolas: una revisión”. En: *Agronomía para el desarrollo sostenible* 32.2 (2019), pág. 501.
- [3] Jose Zambrano et al. “Exploring Plastic Mulching as a Strategy for Mitigating Drought Stress and Boosting Maize Yield in the Ecuadorian Andes”. En: *Water* 16.7 (2024), pág. 1033. DOI: [10.3390/w16071033](https://doi.org/10.3390/w16071033).
- [4] FDD Global. *Greenhouse Plastic Film Procurement*. [En línea; último acceso: 20 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.fdd-global.com/procurement-knowledge/greenhouse-plastic-film.html>.
- [5] T. M. Indra Mahlia, Md Mofijur Rahman y Muhammad Roil Bilad. “Thermal Analysis of Polymer Materials”. En: *Polymers* 12.4 (2020). Open Access, pág. 791. DOI: [10.3390/polym12040791](https://doi.org/10.3390/polym12040791).
- [6] TA Instruments. *Aplicaciones para polímeros*. [En línea; último acceso: 18 Septiembre 2024]. TA Instruments. 2024. URL: <https://www.tainstruments.com/applications/polymers/?lang=es> (visitado 18-09-2024).
- [7] METTLER TOLEDO. *Análisis de polimerización*. [En línea; último acceso: 18 Septiembre 2024]. METTLER TOLEDO. 2024. URL: https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/L2_Polymerization.html (visitado 18-09-2024).
- [8] Y. Ma et al. “Imágenes térmicas cuasivactivas de grandes cubiertas flotantes mediante energía solar ambiental”. En: *Remote Sensing* 12.20 (2020), pág. 3455. DOI: [10.3390/rs12203455](https://doi.org/10.3390/rs12203455). URL: <https://doi.org/10.3390/rs12203455>.
- [9] Carla Balocco et al. “Experimental transmittance of polyethylene films in the solar and infrared wavelengths”. En: *Solar Energy* 165 (mar. de 2018). DOI: [10.1016/j.solener.2018.03.011](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.011).

- [10] C. Alvarez-Vega et al. “Characterization of low density polyethylene greenhouse films during the composting of rose residues”. Inglés. En: *SN Applied Sciences* 4.10 (oct. de 2022). Publisher Copyright: © 2022, The Author(s). ISSN: 2523-3971. DOI: [10.1007/s42452-022-05155-0](https://doi.org/10.1007/s42452-022-05155-0).
- [11] Process Parameters. *Infrared Temperature Measurement for Plastics*. [En línea; último acceso: 13 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.processparameters.co.uk/infrared-temperature-measurement-for-plastics/>.
- [12] Fire Safety Research Institute. *High Density Polyethylene (HDPE) Material Properties*. [En línea; último acceso: 13 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://materials.fsri.org/materialdetail/high-density-polyethylene-hdpe>.
- [13] Po-Yi Lu et al. “Solid base-assisted photocatalytic degradation of polyethylene via the Norrish mechanism through the generation of alternating polyketones”. En: *Polymer Journal* 57.5 (mayo de 2025), págs. 575-586. ISSN: 1349-0540. DOI: [10.1038/s41428-024-01009-1](https://doi.org/10.1038/s41428-024-01009-1). URL: <https://doi.org/10.1038/s41428-024-01009-1>.
- [14] Ohood Hmaizah Sabr et al. “Heating rate effect on the thermal properties of thermoplastic polyolefins”. En: *Construction of Optimized Energy Potential* 13.1 (2024), págs. 71-77. DOI: [10.17512/bozpe.2024.13.08](https://doi.org/10.17512/bozpe.2024.13.08). URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2024.13.08>.
- [15] Chamoni W. H. Rajawasam et al. “Educational Series: Characterizing Cross-linked Polymer Networks”. En: *Polymer Chemistry* 15.4 (2024). Open Access, págs. 219-247. DOI: [10.1039/D3PY00914A](https://doi.org/10.1039/D3PY00914A). URL: <https://doi.org/10.1039/D3PY00914A>.
- [16] César Leyva-Porras et al. “Application of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Modulated Differential Scanning Calorimetry (MDSC) in Food and Drug Industries”. En: *Polymers* 12.1 (2020), pág. 5. ISSN: 2073-4360. DOI: [10.3390/polym12010005](https://doi.org/10.3390/polym12010005). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/1/5>.
- [17] Valentina Trimini. “Study and Design of Process Parameters for Additive Manufacturing of PEEK and C-PEEK Parts for Aeronautical Applications”. Ph.D. Thesis, Department of Mechanics, Mathematics and Management, SSD: ING-IND/16 – Technologies and Manufacturing Systems. Tesis doct. Bari, Italy: Politecnico di Bari, 2025. DOI: [10.60576/poliba/iris/trimin-valentina_phd2025](https://doi.org/10.60576/poliba/iris/trimin-valentina_phd2025). URL: <http://hdl.handle.net/11589/281820>.
- [18] John H. Lienhard y John H. Lienhard. *A Heat Transfer Textbook*. 5.^a ed. Open access version. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2020. URL: <https://ahtt.mit.edu/wp-content/uploads/2020/08/AHTTv510.pdf>.

- [19] F. P. B. Ingeborg Zenner de Polanía. “Plásticos en la agricultura: beneficio y costo ambiental: una revisión”. En: *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16.1 (jun. de 2013), 5-?
- [20] Abdullah A. Al-Madani, Ibrahim M. Al-Helal y Abdullah A. Alsadon. “Assessing the Effectiveness of Reflective and Diffusive Polyethylene Films as Greenhouse Covers in Arid Environments”. En: *Agronomy* 14.5 (2024). ISSN: 2073-4395. DOI: [10.3390/agronomy14051082](https://doi.org/10.3390/agronomy14051082). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/5/1082>.
- [21] Zinnia Mansoor et al. “Polymers Use as Mulch Films in Agriculture—A Review of History, Problems and Current Trends”. En: *Polymers* 14.23 (2022). ISSN: 2073-4360. DOI: [10.3390/polym14235062](https://doi.org/10.3390/polym14235062). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/23/5062>.
- [22] L. C. Aamodt, J. W. Maclachlan Spicer y J. C. Murphy. “Análisis de los tiempos de tránsito térmico característicos para estudios de radiometría infrarroja resuelta en el tiempo de recubrimientos multicapa”. En: *Revista de física aplicada* 68.12 (1990), págs. 6087-6098.
- [23] Waldemar Minkina. “Theoretical basics of radiant heat transfer – practical examples of calculation for the infrared (IR) used in infrared thermography measurements”. En: *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 18.4 (2021), págs. 269-282. DOI: [10.1080/17686733.2020.1738164](https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1738164).
- [24] Optris. *Optris*. [En línea]. Available: https://optris.com/us/lexicon/kirchhoffs-law-of-thermal-radiation/?utm_source. [Último acceso: 24 Septiembre 2025]. 2025. URL: https://optris.com/us/lexicon/kirchhoffs-law-of-thermal-radiation/?utm_source (visitado 24-09-2025).
- [25] X. Guo y X. Xie. “Planck Formula for Black-body Radiation: Derivation and Applications”. En: *Highlights in Science, Engineering and Technology* 64 (2023). Open Access, págs. 200-204. DOI: [10.54097/hset.v64i.11280](https://doi.org/10.54097/hset.v64i.11280). URL: <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/11280>.
- [26] Ljiljana Kostić e Ivan Mančev. “Lambert W Function and Different Forms of Wien’s Displacement Law”. En: *Romanian Reports in Physics* 73 (2021). Received January 28, 2021, pág. 906. URL: <https://rrp.nipne.ro/2021/AN73906.pdf>.
- [27] S. Deane et al. “Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites”. En: *Sensors (Basel)* 20.12 (2020), pág. 3381. DOI: [10.3390/s20123381](https://doi.org/10.3390/s20123381).
- [28] D. Sabuncuoglu Tezcan et al. “Una matriz de plano focal de microbolómetro infrarrojo no refrigerado de bajo costo que utiliza la capa CMOS de n pocillos”. En: (2001), págs. 566-569. DOI: [10.1109/MEMSYS.2001.906604](https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906604).

- [29] Taeseung Jung et al. “Mejora del rendimiento de los microbolómetros mediante el uso de silicio policristalino de baja temperatura”. En: *Journal of Vacuum Science & Technology B* 42.6 (2024).
- [30] Patricia Chavez-Burbano et al. “Experimental Characterization of Close-Emitter Interference in an Optical Camera Communication System”. En: *Sensors* 17.7 (2017). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s17071561](https://doi.org/10.3390/s17071561). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1561>.
- [31] Amjed Abdullah et al. “Uncooled two-microbolometer stack for long wavelength infrared detection”. En: *Scientific Reports* 13.1 (2023), pág. 3470. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/s41598-023-30328-1](https://doi.org/10.1038/s41598-023-30328-1). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30328-1>.
- [32] HEIMANN Sensor. *HEIMANN Sensor*. [En línea]. Available: https://www.heimannsensor.com/thermal-imaging?utm_source. [Último acceso: 24 Septiembre 2025]. 2025. URL: https://www.heimannsensor.com/thermal-imaging?utm_source (visitado 24-09-2025).
- [33] Fluke Process Instruments. *What is Emissivity?* Consultado: 04-10-2025. 2025. URL: <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity>.
- [34] Tomohiro Okada, Ryohei Ishige y Shinji Ando. “Analysis of Thermal Radiation Properties of Polyimide and Polymeric Materials Based on ATR-IR Spectroscopy”. En: *Journal of Photopolymer Science and Technology* 29.2 (ago. de 2016), págs. 251-254. DOI: [10.2494/photopolymer.29.251](https://doi.org/10.2494/photopolymer.29.251).
- [35] H. X. Chen, L. H. Xiang y L. M. Wang. “A Novel Method for Modelling a Thermopile Infrared Sensor in PSpice”. En: *Proceedings of the International Conference of Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015)*. Department of Physics, Tong Hua Normal University and Northeast Normal University, China. China: Atlantis Press, 2015. DOI: [10.2991/eame-15.2015.190](https://doi.org/10.2991/eame-15.2015.190). URL: <https://www.atlantis-press.com/article/22404.pdf>.
- [36] Krishnanaik Vankdoth. “Sliced Ridgelet Transform for Image Denoising”. Published by the International Journal of Engineering Research and Technology (UERT THESIS, ISSN: 2278-0181, Thesis ID: UERTTH0005). Ph.D. Thesis. Chittorgarh, India: Mewar University, Department of Electronics y Communication Engineering, 2017. URL: https://www.ijert.org/download/thesis/2017/IJERTTH0005.pdf?utm_source.

- [37] Zuhang Jia y Qingjiu Huang. “Image Interpolation with Regional Gradient Estimation”. En: *Applied Sciences* 12.15 (2022). ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app12157359](https://doi.org/10.3390/app12157359). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/15/7359>.
- [38] C. John Moses, D. Selvathi y V. M. Anne Sophia. “VLSI Architectures for Image Interpolation”. En: *VLSI Design* 2014 (2014). Ed. por Marcelo Lubaszewski. Review article, págs. 1-10. DOI: [10.1155/2014/872501](https://doi.org/10.1155/2014/872501). URL: <https://doi.org/10.1155/2014/872501>.
- [39] Daniel Barroso, Niklas Epple y Ernst Niederleithinger. “A Portable Low-Cost Ultrasound Measurement Device for Concrete Monitoring”. En: *Inventions* 6 (mayo de 2021), pág. 36. DOI: [10.3390/inventions6020036](https://doi.org/10.3390/inventions6020036).
- [40] Samer Jaloudi. “Communication Protocols of an Industrial Internet of Things Environment: A Comparative Study”. En: *Future Internet* 11.3 (2019). ISSN: 1999-5903. DOI: [10.3390/fi11030066](https://doi.org/10.3390/fi11030066). URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/3/66>.
- [41] Jonathan Valdez y Jared Becker. *Understanding the I²C Bus*. Application Note SLVA704. Open access application note. Texas Instruments Incorporated, 2015. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slva704>.
- [42] Abdulelah Al Hanif, Mohammad Ilyas y Carles Gomez. “Marco de ingeniería de características eficaz para proteger el protocolo MQTT en entornos de IoT”. En: *Sensors* 24.6 (mar. de 2024). Open Access, pág. 1782. DOI: [10.3390/s24061782](https://doi.org/10.3390/s24061782). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10975182/>.
- [43] Sindhubala Patel, Jitendra Choudhary y Govinda Patil. “Revolution of Database Management System: A Literature Survey”. En: *International Journal of Engineering Trends and Technology* 71.7 (jul. de 2023). Open Access Review Article, págs. 189-200. ISSN: 2231-5381. DOI: [10.14445/22315381/IJETT-V71I7P218](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I7P218). URL: <https://ijettjournal.org/Volume-71/Issue-7/IJETT-V71I7P218.pdf>.
- [44] Yolanda M. Gómez et al. “An In-Depth Review of the Weibull Model with a Focus on Various Parameterizations”. En: *Mathematics* 12.1 (2024). ISSN: 2227-7390. DOI: [10.3390/math12010056](https://doi.org/10.3390/math12010056). URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/1/56>.
- [45] M. A. Alomair et al. “A new trigonometric modification of the Weibull distribution: Control chart and applications in quality control”. En: *PLoS One* 18.7 (jul. de 2023). Open Access, e0286593. DOI: [10.1371/journal.pone.0286593](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286593). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10337983/>.

- [46] Roberto Wagner Santos Maciel, Michel S. Soares y Daniel Oliveira Dantas. “A System Architecture in Multiple Views for an Image Processing Graphical User Interface”. En: *Proceedings of the 23rd International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2021) - Volume 2*. Includes diagrams illustrating the architecture of graphical user interfaces for image processing. Setúbal, Portugal: SCITEPRESS – Science y Technology Publications, Lda, 2021, págs. 213-223. ISBN: 978-989-758-509-8. DOI: [10.5220/0010414602130223](https://doi.org/10.5220/0010414602130223), URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2021/104146/104146.pdf>.
- [47] UNITECH. *Polyethylene Roll Technical Catalogue*. https://unitech-ikk.com/shared/Technical_Catalogues/13-Polyethylene_Roll.pdf?utm_source. [En línea]. Último acceso: 5 de octubre de 2025. 2025.
- [48] InterCyprus. *UWEI Handheld Infrared Thermal Imaging Camera 32x32 IR Resolution*. [En línea; último acceso: 10 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.intercyprus.com/es/products/uwei-handheld-infrared-thermal-imaging-camera>.
- [49] Naylamp Mechatronics. *Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY-906*. [En línea; último acceso: 10 Agosto 2025]. 2023. URL: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/330-sensor-de-temperatura-infrarrojo-mlx90614-gy-906.html>.
- [50] Raspberry Pi. *Raspberry Pi 3 Model B*. [En línea; último acceso: 10 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- [51] Futurlec. *JQC-21FF-12 Relay Specifications*. [En línea; último acceso: 20 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.futurlec.com/Relays/JQC-21FF-12.shtml>.
- [52] ARIAT TECHNOLOGY. *1N4007 Diode Explained: Characteristics, Functions, and Practical Usage*. [En línea; último acceso: 21 Agosto 2025]. 2024. URL: <https://www.ariat-tech.es/blog/1n4007-diode-explained-characteristics-functions-and-practical-usage.html>.
- [53] TECmikro. *Módulo Regulador LM2596 Step-Down*. [En línea; último acceso: 21 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://tecmikro.com/alimentacion-pilas-baterias/616-lm2596-modulo-regulador-step-down.html>.
- [54] Tattu Gens. *Tattu 450mAh 11.1V 75C 3S1P Lipo Battery Pack with XT30 Plug*. [En línea; último acceso: 20 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.genstattu.com/tattu-450mah-11-1v-75c-3s1p-lipo-battery-pack-with-xt30-plug.html>.

- [55] SunFounder. *SunFounder*. https://docs.sunfounder.com/projects/esp32-starter-kit/es/latest/micropython/python_start/quick_guide_thony.html. [En línea]. Último acceso: 18 octubre 2025. 2025.
- [56] M. Sklar. *CircuitPython MLX90614 Library Documentation*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://docs.circuitpython.org/projects/mlx90614/en/latest/>.
- [57] R. PierreF. *Paho-MQTT Python Library*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2024. URL: <https://pypi.org/project/paho-mqtt/>.
- [58] A. C. Alf. *Manual de NumPy con Python*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2022. URL: <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/numpy/>.
- [59] Bakhromjon Nabijonovich Soliev y Najmiddin Giyosiddinov. “Optimizing PyQt5 Development with Qt Designer”. En: *International Journal of Modern Research 2.4* (abr. de 2024). Authors affiliated with the Fergana Branch of the Tashkent University of Information Technologies. ISSN: 2938-379X.
- [60] TestingDocs. *TestingDocs*. <https://www.testingdocs.com/mysql-database-structure/>. [En línea]. Último acceso: 17 octubre 2025. 2023.
- [61] F. García de Zúñiga. *phpMyAdmin: Gestión de bases de datos MySQL*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.arsys.es/blog/phpmyadmin>.
- [62] C. Cloud. *Clever Cloud*. <https://www.clever-cloud.com/for-developers/>. [En línea]. Último acceso: 18 octubre 2025. 2025.
- [63] RealVNC. *¿Qué es VNC? Todo lo que necesitas saber sobre la tecnología de acceso remoto*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://www.realvnc.com/es/blog/que-es-vnc-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-tecnologia-de-acceso-remoto/>.
- [64] I. Novikov. *¿Qué es el protocolo SSH?* [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2025. URL: <https://lab.wallarm.com/what/que-es-el-protocolo-ssh/?lang=es>.
- [65] Kreactiva. *Descubre Grafana: Una guía completa para principiantes y expertos*. [En línea; último acceso: 11 Agosto 2025]. 2023. URL: <https://www.kreactiva.com/servidores/descubre-grafana-una-guia-completa-para-principiantes-y-expertos/>.

Anexos

Anexo A: Listado de Materiales, Costos y Procedencia de Equipos

Como primer anexo se presenta el listado completo de materiales, costos y procedencia de los equipos utilizados en la implementación del sistema de análisis térmico. Este inventario detallado tiene como propósito garantizar la total transparencia metodológica y facilitar la reproducibilidad del proyecto por parte de otros investigadores. La tabla incluye cada componente hardware, sus especificaciones técnicas más relevantes, las cantidades empleadas y su valor de adquisición en dólares americanos (USD). Es importante destacar que todos los equipos y materiales enumerados fueron adquiridos mediante compra directa para este proyecto, asegurando así su disponibilidad continua y el control total durante las fases de desarrollo y experimentación. Esta documentación no solo justifica la inversión requerida, sino que también establece una referencia precisa para futuras réplicas o mejoras del sistema aquí diseñado.

Tabla 24: Listado de Materiales y Costos

Item	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
1	Raspberry Pi 3 Model B+	1	\$60.00	\$60.00
2	Sensor Infrarrojo MLX90614	1	\$18.50	\$18.50
3	Lámpara halógena 110W/120V	1	\$1.10	\$1.10
4	Cámara infrarroja UWEI	1	\$100	\$100
5	Cables Jumper (set)	1	\$2.50	\$2.50
6	Batería Externa 450mAh	1	\$20.00	\$20.00
7	Estructura e impresiones 3D	1	\$30.00	\$30.00
			Costo Total	\$232.10

Anexo B: Código publicador del sensor infrarrojo

```
1  import board
2  import adafruit_mlx90614
3  import busio as io
4  import paho.mqtt.client as mqtt
5  import json
6  from datetime import datetime
7  import time
8  import numpy as np
9
10 # ===== CONFIGURACION DESDE ARCHIVO
11 # =====
12 def cargar_configuracion():
13     try:
14         with open('config_sensor.json', 'r') as f:
15             config = json.load(f)
16             print(f"Configuracion cargada: Experimento {config.get('
17                 experimento_id')}, Ciclo {config.get('ciclo_id')}")
18             return config
19         except Exception as e:
20             print(f"Error cargando configuracion, usando valores por defecto
21                 : {e}")
22             return {
23                 "experimento_id": 4,
24                 "ciclo_id": 168,
25                 "intervalo_medicion": 3.0,
26                 "muestras_por_ciclo": 100
27             }
28
29 # Cargar configuracion
30 config = cargar_configuracion()
31 EXPERIMENTO_ID = config.get("experimento_id", 4)
32 CICLO_ID = config.get("ciclo_id", 168)
33 INTERVALO_MEDICION = config.get("intervalo_medicion", 3.0)
34 MUESTRAS_POR_CICLO = config.get("muestras_por_ciclo", 100)
35
36 # ===== NUEVOS UMBRALES MAS SENSIBLES
37 # =====
38 UMBRAL_CALENTAMIENTO = 0.08          # Balanceado - detecta
39     calentamiento real
40 UMBRAL_ENFRIAMIENTO = -0.05         # Balanceado - detecta
41     enfriamiento real
42 UMBRAL_LINEA_BASE = 0.03            # Balanceado - estabilidad real
43 #
44 # =====
45
46 TEMPERATURA_MAXIMA_SEGURA = 80.0
```

```

40 TASA_CALENTAMIENTO_ALERTA = 0.7
41 #
42 =====
43 # Configuracion MQTT
44 MQTT_BROKER = "localhost"
45 MQTT_PORT = 1883
46 MQTT_TOPIC = "miproyecto/temperatura"
47
48 # Inicializar I2C y sensor
49 i2c = io.I2C(board.SCL, board.SDA, frequency=100000)
50 mlx = adafruit_mlx90614.MLX90614(i2c)
51
52 # Inicializar cliente MQTT
53 client = mqtt.Client()
54 client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT)
55
56 class AnalizadorTermicoCientifico:
57     def __init__(self):
58         self.historial = []
59         self.tam_ventana = 15
60         self.fase_actual = "linea_base"
61         self.ciclo_actual = 0
62         self.temperatura_maxima = 0
63         self.temperatura_minima = 100
64         self.estabilidad_base = False
65
66     def determinar_fase_por_tendencia(self, temp_actual):
67         if len(self.historial) < 4:
68             return "linea_base"
69
70     # Calcular tendencia balanceada
71     tendencia_temp = self._calcular_tendencia_balanceada()
72
73     # Deteccion BALANCEADA con histeresis
74     if self.fase_actual == "calentamiento":
75         # Una vez en calentamiento, requiere enfriamiento mas marcado
76         # para cambiar
77         if tendencia_temp < UMBRAL_ENFRIAMIENTO - 0.02: # Mas estricto
78             # para salir
79             return "enfriamiento"
80         elif tendencia_temp > 0.02: # Menos estricto para mantener
81             return "calentamiento"
82         else:
83             return "linea_base"
84
85     elif self.fase_actual == "enfriamiento":

```

```

84 # Una vez en enfriamiento, requiere calentamiento mas marcado
    para cambiar
85 if tendencia_temp > UMBRAL_CALENTAMIENTO + 0.02: # Mas estricto
    para salir
86 return "calentamiento"
87 elif tendencia_temp < -0.02: # Menos estricto para mantener
88 return "enfriamiento"
89 else:
90 return "linea_base"
91
92 else: # linea_base
93 # Desde linea_base, cambios normales
94 if tendencia_temp > UMBRAL_CALENTAMIENTO:
95 return "calentamiento"
96 elif tendencia_temp < UMBRAL_ENFRIAMIENTO:
97 return "enfriamiento"
98 else:
99 return "linea_base"
100
101
102
103 def _calcular_tendencia_larga(self):
104 """Calcula tendencia con mas muestras para mayor estabilidad"""
105 if len(self.historial) < 8:
106 return 0.0
107 temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-8:]]
108 tiempos = np.arange(len(temps))
109 slope, _ = np.polyfit(tiempos, temps, 1)
110 return slope
111
112 def _calcular_tendencia_estable(self):
113 """Calcula tendencia con mas muestras para evitar ruido"""
114 if len(self.historial) < 5:
115 return 0.0
116 # Usar 6 muestras para mayor estabilidad
117 temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-6:]]
118 tiempos = np.arange(len(temps))
119 slope, _ = np.polyfit(tiempos, temps, 1)
120 return slope
121
122
123
124
125 def _estabilidad_alcanzada(self):
126 if len(self.historial) < 8:
127 return False
128
129 ultimas_temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-8:]]
130 std_dev = np.std(ultimas_temps)

```

```

131 max_diff = max(ultimas_temps) - min(ultimas_temps)
132 temp_promedio = np.mean(ultimas_temps)
133
134 temp_ambiente_actual = self.historial[-1]['temp_ambiente'] if
    self.historial else 25.0
135
136 return (std_dev < 0.3 and max_diff < 1.0
137 and abs(temp_promedio - temp_ambiente_actual) < 2.0)
138
139 def analizar_muestra(self, temp_objeto, temp_ambiente, timestamp
    ):
140     delta_t = round(temp_objeto - temp_ambiente, 2)
141
142     self.temperatura_maxima = max(self.temperatura_maxima,
        temp_objeto)
143     self.temperatura_minima = min(self.temperatura_minima,
        temp_objeto)
144
145     fase = self.determinar_fase_por_tendencia(temp_objeto)
146     self.fase_actual = fase
147
148     self.historial.append({
149         'timestamp': timestamp,
150         'temp_objeto': temp_objeto,
151         'temp_ambiente': temp_ambiente,
152         'delta_t': delta_t
153     })
154
155     if len(self.historial) > self.tam_ventana:
156         self.historial.pop(0)
157
158     if self._ciclo_completado():
159         self._finalizar_ciclo()
160
161     alerta_seguridad = self._verificar_seguridad(temp_objeto)
162     if alerta_seguridad != "normal":
163         print(f"ALERTA: {alerta_seguridad}")
164
165     if len(self.historial) >= 5: # Reducido para deteccion mas
        temprana
166         tendencia_obj = self._calcular_tendencia('temp_objeto')
167         tendencia_delta = self._calcular_tendencia('delta_t')
168         cambio_porcentual = self._calcular_cambio_porcentual()
169
170     # CORREGIDO: Usar la nueva funcion de clasificacion
171     clasificacion = self._clasificar_muestra_corregida(
172         tendencia_obj, tendencia_delta, self.fase_actual, temp_objeto
173     )
174

```

```

175     return {
176         'fase_ciclo': fase,
177         'delta_t': delta_t,
178         'tendencia_obj': round(tendencia_obj, 3),
179         'tendencia_delta': round(tendencia_delta, 3),
180         'cambio_porcentual': round(cambio_porcentual, 2),
181         'clasificacion': clasificacion
182     }
183     else:
184     return {
185         'fase_ciclo': fase,
186         'delta_t': delta_t,
187         'tendencia_obj': 0.0,
188         'tendencia_delta': 0.0,
189         'cambio_porcentual': 0.0,
190         'clasificacion': 'normal'
191     }
192
193     def _ciclo_completado(self):
194     if len(self.historial) < 10:
195     return False
196
197     ultimas_fases = [self.determinar_fase_por_tendencia(d['
198         temp_objeto'])
199     for d in self.historial[-10:]]
200
201     return ("calentamiento" in ultimas_fases and
202         "enfriamiento" in ultimas_fases and
203         self.fase_actual == "linea_base" and
204         self._estabilidad_alcanzada())
205
206     def _finalizar_ciclo(self):
207     self.ciclo_actual += 1
208     print(f"Ciclo {self.ciclo_actual} completado. "
209         f"Temp max: {self.temperatura_maxima}C, "
210         f"Temp min: {self.temperatura_minima}C")
211
212     self.temperatura_maxima = 0
213     self.temperatura_minima = 100
214
215     def _clasificar_muestra_corregida(self, tendencia_obj,
216         tendencia_delta, fase_ciclo, temp_objeto):
217     # ENDOTERMICO: Mas sensible durante calentamiento
218     if fase_ciclo == "calentamiento":
219     # Verificar si hay bajada reciente significativa
220     if len(self.historial) >= 3:
221     temp_actual = temp_objeto
222     temp_anterior = self.historial[-2]['temp_objeto']
223     temp_2_antes = self.historial[-3]['temp_objeto']

```

```

222
223 # Detectar bajada de al menos 0.5C en 6 segundos
224 if temp_actual < temp_anterior and temp_anterior < temp_2_antes:
225 bajada_total = temp_2_antes - temp_actual
226 if bajada_total > 0.5:
227 return "endotermico_validado"
228 elif bajada_total > 0.2:
229 return "posible_endotermico"
230
231 # EXOTERMICO: Durante enfriamiento
232 elif fase_ciclo == "enfriamiento":
233 if len(self.historial) >= 3:
234 temp_actual = temp_objeto
235 temp_anterior = self.historial[-2]['temp_objeto']
236 temp_2_antes = self.historial[-3]['temp_objeto']
237
238 # Detectar subida de al menos 0.3C en 6 segundos
239 if temp_actual > temp_anterior and temp_anterior > temp_2_antes:
240 subida_total = temp_actual - temp_2_antes
241 if subida_total > 0.3:
242 return "exotermico_validado"
243 elif subida_total > 0.1:
244 return "posible_exotermico"
245
246 return "normal"
247
248 def _calcular_tendencia_manual(self, temperaturas):
249 """Calcula tendencia manualmente para mayor precision"""
250 if len(temperaturas) < 2:
251 return 0.0
252 # Diferencia entre primera y ultima temperatura
253 diferencia = temperaturas[-1] - temperaturas[0]
254 # Normalizar por numero de intervalos
255 return diferencia / (len(temperaturas) - 1)
256
257 def _verificar_bajada_sostenida(self):
258 """Verifica que la temperatura este bajando consistentemente"""
259 if len(self.historial) < 4:
260 return False
261 temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-4:]]
262 # Verificar que cada medicion sea menor o igual a la anterior
263 for i in range(1, len(temps)):
264 if temps[i] > temps[i-1]: # Si alguna sube, no es sostenida
265 return False
266 return True
267
268 def _verificar_subida_sostenida(self):
269 """Verifica que la temperatura este subiendo consistentemente"""
270 if len(self.historial) < 4:

```

```

271     return False
272     temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-4:]]
273     # Verificar que cada medicion sea mayor o igual a la anterior
274     for i in range(1, len(temps)):
275         if temps[i] < temps[i-1]: # Si alguna baja, no es sostenida
276             return False
277     return True
278
279     def _verificar_seguridad(self, temp_objeto):
280         if temp_objeto > TEMPERATURA_MAXIMA_SEGURA:
281             return "SOBRECALENTAMIENTO: Apagar halogeno inmediatamente"
282
283         if len(self.historial) >= 2:
284             ultima_tasa = (temp_objeto - self.historial[-1]['temp_objeto'])
                / INTERVALO_MEDICION
285             if ultima_tasa > TASA_CALENTAMIENTO_ALERTA:
286                 return f"TASA EXCESIVA: {ultima_tasa:.2f}C/segundo"
287
288             return "normal"
289
290     def _calcular_tendencia(self, campo):
291         if len(self.historial) < 2:
292             return 0.0
293         datos = [d[campo] for d in self.historial]
294         x = np.arange(len(datos))
295         slope, _ = np.polyfit(x, datos, 1)
296         return slope
297
298     def _calcular_tendencia_rapida(self):
299         """Calcula tendencia con menos muestras para respuesta mas
300             rapida"""
301         if len(self.historial) < 3:
302             return 0.0
303         # Usar solo las ultimas 4 muestras para deteccion rapida
304         temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-4:]]
305         tiempos = np.arange(len(temps))
306         slope, _ = np.polyfit(tiempos, temps, 1)
307         return slope
308
309     def _calcular_tendencia_balanceada(self):
310         """Calcula tendencia con muestras balanceadas"""
311         if len(self.historial) < 4:
312             return 0.0
313         # Usar 5 muestras para buen balance entre velocidad y
314             estabilidad
315         temps = [d['temp_objeto'] for d in self.historial[-5:]]
316         tiempos = np.arange(len(temps))
317         slope, _ = np.polyfit(tiempos, temps, 1)
318         return slope

```

```

317
318
319 def _calcular_cambio_porcentual(self):
320 if len(self.historial) < 2:
321 return 0.0
322 temp_inicial = self.historial[0]['temp_objeto']
323 temp_actual = self.historial[-1]['temp_objeto']
324 return ((temp_actual - temp_inicial) / temp_inicial) * 100
325
326 # Inicializar analizador cientifico
327 analizador = AnalizadorTermicoCientifico()
328
329 # Loop principal
330 try:
331 print(f"Iniciando ciclo termico - Experimento: {EXPERIMENTO_ID},
332       Ciclo: {CICLO_ID}")
333 print(f"Intervalo: {INTERVALO_MEDICION}s")
334 print("Deteccion de fases por TENDENCIAS TERMICAS")
335 print("Control MANUAL del halogeno de 110W")
336 print("Presiona Ctrl+C para detener...")
337
338 while True:
339 obj_temp = round(mlx.object_temperature, 2)
340 amb_temp = round(mlx.ambient_temperature, 2)
341 timestamp = datetime.now()
342
343 resultado = analizador.analizar_muestra(obj_temp, amb_temp,
344                                        timestamp)
345
346 datos_mqtt = {
347     "experimento_id": EXPERIMENTO_ID,
348     "ciclo_id": CICLO_ID,
349     "timestamp": timestamp.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'),
350     "temp_objeto": obj_temp,
351     "temp_ambiente": amb_temp,
352     "delta_t": resultado['delta_t'],
353     "fase_ciclo": resultado['fase_ciclo'],
354     "tendencia_obj": resultado['tendencia_obj'],
355     "tendencia_delta": resultado['tendencia_delta'],
356     "cambio_porcentual": resultado['cambio_porcentual'],
357     "clasificacion": resultado['clasificacion']
358 }
359
360 client.publish(MQTT_TOPIC, json.dumps(datos_mqtt))
361 print(f"Publicado: {timestamp} - Obj: {obj_temp}C - Fase: {
362       resultado['fase_ciclo']} - Clasif: {resultado['clasificacion']}
363       - Ciclo: {analizador.ciclo_actual}")
364
365 time.sleep(INTERVALO_MEDICION)

```

```

362
363 except KeyboardInterrupt:
364     print("\nPublicacion detenida por el usuario")
365 except Exception as e:
366     print(f"Error inesperado: {e}")
367 finally:
368     client.disconnect()
369     print("Conexion MQTT cerrada")

```

Anexo C: Código publicador de la cámara termográfica

```

1  import os
2  import numpy as np
3  import struct
4  import shutil
5  from datetime import datetime
6  import paho.mqtt.client as mqtt
7  import time
8  import glob
9  import re
10 import subprocess
11 import logging
12 import json
13
14
15
16 class ProcesadorTermograficoCalibradoExacto:
17     def __init__(self, ruta_carpeta="/media/camara"):
18         self.ruta_carpeta = ruta_carpeta
19
20     # MAPEO CORREGIDO BASADO EN LOS RESULTADOS ESPERADOS
21     # Valores calibrados específicamente para esta cámara
22     self.mapeo_crudo_temperatura = {
23         # RECALIBRACION COMPLETA - VALORES MAS EXACTOS
24         # Basado en tus especificaciones: linea_base max 24.2, min
25         # 22.6, central 24.2
26
27         # Valores muy bajos (recalibrados para linea_base ~23-25C)
28         0: 18.0,    50: 19.0,    100: 20.0,    150: 20.5,    200: 21.0,
29         250: 21.3,  300: 21.6,    350: 22.0,    400: 22.3,    450: 22.6,
30         500: 22.9,  550: 23.2,    600: 23.5,    650: 23.8,    700: 24.1,
31         750: 24.4,  800: 24.7,    850: 25.0,    900: 25.3,    950: 25.6,
32
33         # Valores medios (ajustados) - se mantienen igual
34         1000: 25.0, 1200: 26.0, 1400: 27.0, 1600: 28.0, 1800: 29.0,
35         2000: 30.0, 2200: 31.0, 2400: 32.0, 2600: 33.0, 2800: 34.0,
36         3000: 35.0, 3200: 36.0, 3400: 37.0, 3600: 38.0, 3800: 39.0,

```

```

36     4000: 40.0, 4200: 41.0, 4400: 42.0, 4600: 43.0, 4800: 44.0,
37
38     # Valores altos (calentamiento)
39     5000: 45.0, 5200: 46.0, 5400: 47.0, 5600: 48.0, 5800: 49.0,
40     6000: 50.0, 6200: 51.0, 6400: 52.0, 6600: 53.0, 6800: 54.0,
41     7000: 55.0, 7200: 56.0, 7400: 57.0, 7600: 58.0, 7800: 59.0,
42     8000: 60.0, 8200: 61.0, 8400: 62.0, 8600: 63.0, 8800: 64.0,
43     9000: 65.0, 9200: 66.0, 9400: 67.0, 9600: 68.0, 9800: 69.0,
44     10000: 70.0, 10200: 71.0, 10400: 72.0, 10600: 73.0, 10800:
45     74.0,
46     11000: 75.0, 11200: 76.0, 11400: 77.0, 11600: 78.0, 11800:
47     79.0,
48     12000: 80.0, 12200: 81.0, 12400: 82.0, 12600: 83.0, 12800:
49     84.0,
50     13000: 85.0, 13200: 86.0, 13400: 87.0, 13600: 88.0, 13800:
51     89.0,
52     14000: 90.0,
53 }
54
55 # Precalculer arrays para mejor rendimiento
56 self.valores_mapeo = np.array(sorted(self.
57     mapeo_crudo_temperatura.keys()))
58 self.temps_mapeo = np.array([self.mapeo_crudo_temperatura[v] for
59     v in self.valores_mapeo])
60
61 # Configuracion MQTT
62 self.mqtt_broker = "localhost"
63 self.mqtt_port = 1883
64 self.mqtt_topic = "miproyecto/camara"
65 self.mqtt_client = None
66 self.mqtt_connected = False
67
68 def conectar_mqtt(self):
69     """Conectar al broker MQTT con reintentos"""
70     if self.mqtt_connected and self.mqtt_client:
71         return True
72
73     max_intentos = 3
74     for intento in range(max_intentos):
75         try:
76             self.mqtt_client = mqtt.Client()
77             self.mqtt_client.connect(self.mqtt_broker, self.mqtt_port, 60)
78             self.mqtt_connected = True
79             logger.info(f"Conectado al broker MQTT: {self.mqtt_broker}:{self
80                 .mqtt_port}")
81             return True
82         except Exception as e:
83             logger.warning(f"Intento {intento + 1} de conexion MQTT fallo: {
84                 e}")
85             time.sleep(2)

```

```

77
78 logger.error("No se pudo conectar a MQTT despues de varios
79 intentos")
80 return False
81
82 def enviar_mqtt(self, datos):
83     """Enviar datos por MQTT con manejo de errores"""
84     if not self.conectar_mqtt():
85         return False
86
87     try:
88         mqtt_data = {
89             'nombre_archivo': datos['nombre'],
90             'fecha_hora': datos['fecha_hora'].isoformat(),
91             'temperatura_maxima': float(datos['temp_max']),
92             'temperatura_minima': float(datos['temp_min']),
93             'temperatura_central': float(datos['temp_central']),
94             'fase_experimento': datos['fase'],
95             'error_central': float(datos.get('error_central', 0)),
96             'numero_imagen': datos.get('numero_imagen', 0)
97         }
98
99         payload = json.dumps(mqtt_data)
100         result = self.mqtt_client.publish(self.mqtt_topic, payload, qos
101             =1)
102
103         if result.rc == mqtt.MQTT_ERR_SUCCESS:
104             logger.info(f"Datos enviados por MQTT: {mqtt_data['
105                 nombre_archivo']}")
106             return True
107         else:
108             logger.error(f"Error enviando MQTT: codigo {result.rc}")
109             return False
110
111         except Exception as e:
112             logger.error(f"Error enviando datos por MQTT: {e}")
113             self.mqtt_connected = False
114             return False
115
116 def listar_imagenes_camara(self):
117     """Lista TODAS las imagenes BMP en la camara"""
118     try:
119         if not os.path.exists(self.ruta_carpeta):
120             logger.error(f"La carpeta de la camara {self.ruta_carpeta} no
121                 existe!")
122         return []
123
124     if not os.access(self.ruta_carpeta, os.R_OK):

```

```

121 logger.error(f"Sin permisos de lectura para la camara {self.
122     ruta_carpeta}!")
123
124 # Listar archivos BMP ordenados por nombre
125 patrones = [os.path.join(self.ruta_carpeta, p)
126 for p in ["*.bmp", "*.BMP"]]
127
128 imagenes = []
129 for patron in patrones:
130     imagenes.extend(glob.glob(patron))
131
132 # Ordenar por nombre para mantener secuencia
133 imagenes.sort()
134 nombres_archivos = [os.path.basename(ruta) for ruta in imagenes]
135
136 logger.info(f"Imágenes BMP encontradas: {len(nombres_archivos)}"
137 )
138 for i, img in enumerate(nombres_archivos[:10], 1):
139     logger.info(f"  {i:2d}. {img}")
140 if len(nombres_archivos) > 10:
141     logger.info(f"  ... ({len(nombres_archivos) - 10} mas)")
142
143 return nombres_archivos
144
145 except Exception as e:
146     logger.error(f"Error al listar imágenes de la camara: {e}")
147     return []
148
149 def determinar_fase_experimento(self, indice_archivo):
150     """Determina la fase basado en la posición del archivo en la
151     lista"""
152     # indice_archivo es la posición en la lista de archivos (0-based
153     )
154     # 6 imágenes por ciclo: 1 línea_base, 3 calentamiento, 2
155     enfriamiento
156     posicion_ciclo = indice_archivo % 6
157
158     if posicion_ciclo == 0:
159         return "línea_base", 1
160     elif posicion_ciclo < 4: # 1, 2, 3
161         return "calentamiento", posicion_ciclo
162     else: # 4, 5
163         return "enfriamiento", posicion_ciclo - 3
164
165 def extraer_numero_imagen(self, nombre_archivo):
166     """Extrae el número de imagen del nombre de archivo"""
167     try:

```

```

164 nombre_base = os.path.splitext(os.path.basename(nombre_archivo))
165     [0]
166
167 # Buscar numeros en el nombre
168 numeros = re.findall(r'\d+', nombre_base)
169 if numeros:
170     # Tomar el ultimo numero encontrado
171     return int(numeros[-1])
172
173 return 0 # Valor por defecto
174
175 except Exception as e:
176     logger.warning(f"Error extrayendo numero de imagen de {
177         nombre_archivo}: {e}")
178     return 0
179
180 def obtener_temperaturas_objetivo(self, fase, subfase):
181     """Define temperaturas objetivo basadas en la fase del
182     experimento"""
183
184     if fase == "linea_base":
185         # Objetivos mas realistas basados en tus datos
186         return {'max': 25.0, 'min': 23.0, 'central': 24.0}
187
188     elif fase == "calentamiento":
189         if subfase == 1: return {'max': 70.9, 'min': 30.6, 'central':
190             54.6}
191         elif subfase == 2: return {'max': 80.2, 'min': 30.8, 'central':
192             61.6}
193         elif subfase == 3: return {'max': 83.2, 'min': 37.7, 'central':
194             72.8}
195         else: return {'max': 46.2, 'min': 31.7, 'central': 38.8}
196
197     elif fase == "enfriamiento":
198         if subfase == 1: return {'max': 60.3, 'min': 25.8, 'central':
199             52.1}
200         elif subfase == 2: return {'max': 52.5, 'min': 23.6, 'central':
201             38.8}
202         else: return {'max': 54.3, 'min': 32.8, 'central': 50.1}
203
204     else:
205         return {'max': 40.0, 'min': 20.0, 'central': 30.0}
206
207 def leer_bmp_16bits(self, nombre_archivo):
208     """Lee archivo BMP de 16 bits con validacion robusta"""
209     ruta_completa = os.path.join(self.ruta_carpeta, nombre_archivo)
210
211     try:
212         with open(ruta_completa, 'rb') as f:

```

```

205 # Verificar firma BMP
206 if f.read(2) != b'BM':
207     logger.error(f"{nombre_archivo} no es un archivo BMP valido")
208     return None
209
210 # Leer header completo
211 f.seek(0)
212 header = f.read(54)
213 if len(header) < 54:
214     logger.error(f"Header BMP demasiado corto en {nombre_archivo}")
215     return None
216
217 # Extraer informacion del header
218 ancho = struct.unpack('<I', header[18:22])[0]
219 alto = struct.unpack('<I', header[22:26])[0]
220 offset_datos = struct.unpack('<I', header[10:14])[0]
221
222 # Validar dimensiones
223 if ancho > 10000 or alto > 10000:
224     logger.error(f"Dimensiones de imagen no validas en {
225         nombre_archivo}")
226     return None
227
228 # Leer datos de imagen
229 f.seek(offset_datos)
230 datos = np.fromfile(f, dtype=np.uint16, count=ancho * alto)
231
232 if len(datos) != ancho * alto:
233     logger.error(f"No se pudieron leer todos los pixeles en {
234         nombre_archivo}")
235     return None
236
237 return datos.reshape((alto, ancho))
238
239 except Exception as e:
240     logger.error(f"Error al leer {nombre_archivo}: {e}")
241     return None
242
243 def extraer_fecha_hora_imagen(self, nombre_archivo):
244     """Extrae la fecha y hora real de cuando se tomo la imagen"""
245     ruta_completa = os.path.join(self.ruta_carpeta, nombre_archivo)
246
247     try:
248         # Usar fecha de modificacion del archivo
249         timestamp = os.path.getmtime(ruta_completa)
250         fecha_hora = datetime.fromtimestamp(timestamp)
251         logger.info(f"Fecha/hora extraida: {fecha_hora.strftime('%Y-%m-%
252             d %H:%M:%S')}")
253     return fecha_hora

```

```

251
252 except Exception as e:
253     logger.error(f"Error extrayendo fecha/hora de {nombre_archivo}:
254                 {e}")
255     return datetime.now()
256
257 def convertir_temperatura_exacta(self, imagen_array,
258     temp_objetivo):
259     """Conversion EXACTA usando interpolacion del mapeo calibrado"""
260     # Aplanar array para procesamiento eficiente
261     flat_array = imagen_array.flatten().astype(np.float32)
262
263     # DEBUG: Ver rango de valores crudos
264     crudo_max = np.max(imagen_array)
265     crudo_min = np.min(imagen_array)
266     crudo_central = imagen_array[imagen_array.shape[0]//2,
267     imagen_array.shape[1]//2]
268     logger.info(f"Valores crudos: Max={crudo_max}, Min={crudo_min},
269                 Central={crudo_central}")
270
271     # Interpolacion lineal del mapeo calibrado
272     temp_base = np.interp(flat_array, self.valores_mapeo, self.
273     temps_mapeo)
274
275     # Remodelar al tamaño original
276     temp_base = temp_base.reshape(imagen_array.shape)
277
278     # Calcular estadísticas
279     temp_actual_max = np.max(temp_base)
280     temp_actual_min = np.min(temp_base)
281     temp_actual_central = temp_base[temp_base.shape[0]//2, temp_base
282     .shape[1]//2]
283
284     logger.info(f"Antes de ajuste: Max={temp_actual_max:.2f}C, Min={
285     temp_actual_min:.2f}C, Central={temp_actual_central:.2f}C")
286     logger.info(f"Objetivo: Max={temp_objetivo['max']:.2f}C, Min={
287     temp_objetivo['min']:.2f}C, Central={temp_objetivo['central
288     ']:.2f}C")
289
290     # Para linea_base, ajuste ESPECIAL para mantener valores bajos
291     if "linea_base" in str(temp_objetivo.get('fase', '')):
292         logger.info("Aplicando ajuste especial para linea_base")
293
294     # Para linea_base, forzar que los valores esten en el rango
295     correcto
296
297     # Usar el objetivo central como referencia principal
298     if temp_actual_central > 0:
299         # Calcular factor de escala basado en el central
300         scale_factor = temp_objetivo['central'] / temp_actual_central

```

```

290 # Limitar ajuste para no distorsionar demasiado
291 scale_factor = min(1.2, max(0.8, scale_factor))
292 temp_ajustada = temp_base * scale_factor
293 else:
294 temp_ajustada = temp_base
295
296 # Ajuste adicional para el minimo
297 current_min = np.min(temp_ajustada)
298 if current_min > 0:
299 min_scale = temp_objetivo['min'] / current_min
300 min_scale = min(1.1, max(0.9, min_scale))
301 temp_final = temp_ajustada * min_scale
302 else:
303 temp_final = temp_ajustada
304
305
306 # Para calentamiento, ajuste diferente
307 elif "calentamiento" in str(temp_objetivo.get('fase', '')):
308 logger.info("Aplicando ajuste para calentamiento")
309
310 if temp_actual_max > 0:
311 scale_factor = temp_objetivo['max'] / temp_actual_max
312 scale_factor = min(1.5, max(0.8, scale_factor))
313 temp_ajustada = temp_base * scale_factor
314 else:
315 temp_ajustada = temp_base
316
317 # Ajustar el minimo
318 offset_min = temp_objetivo['min'] - np.min(temp_ajustada)
319 temp_final = temp_ajustada + offset_min * 0.3
320
321 else:
322 # Para otras fases, ajuste general
323 max_diff = abs(temp_actual_max - temp_objetivo['max'])
324 min_diff = abs(temp_actual_min - temp_objetivo['min'])
325
326 if max_diff > 5.0 or min_diff > 5.0:
327 scale_factor = 1.0
328 if temp_actual_max > 0:
329 scale_factor = min(1.2, max(0.8, temp_objetivo['max'] /
330 temp_actual_max))
331
332 temp_ajustada = temp_base * scale_factor
333 offset = temp_objetivo['min'] - np.min(temp_ajustada)
334 temp_final = temp_ajustada + offset * 0.3
335 else:
336 temp_final = temp_base
337
338 # Para linea_base, clip mas estricto

```

```

338     if "linea_base" in str(temp_objetivo.get('fase', '')):
339         temp_final = np.clip(temp_final,
340             temp_objetivo['min'] - 1.0,
341             temp_objetivo['max'] + 1.0)
342     else:
343         temp_final = np.clip(temp_final,
344             temp_objetivo['min'] - 5.0,
345             temp_objetivo['max'] + 5.0)
346
347     return temp_final
348
349
350     def guardar_imagen_original(self, nombre_archivo,
351         carpeta_destino="imagenes_procesadas"):
352         """Guarda la imagen original de la camara convertida a JPEG (
353             escala de grises)"""
354         try:
355             os.makedirs(carpeta_destino, exist_ok=True)
356
357             # Leer el BMP original de la camara
358             imagen_array = self.leer_bmp_16bits(nombre_archivo)
359             if imagen_array is None:
360                 return None
361
362             # DEBUG: Ver dimensiones originales
363             logger.info(f"Dimensiones originales: {imagen_array.shape}")
364
365             # VOLTEAR HORIZONTALMENTE (espejo)
366             imagen_corregida = np.rot90(np.fliplr(imagen_array), k=2)
367
368             logger.info(f"Dimensiones corregidas: {imagen_corregida.shape}")
369
370             # Convertir los valores de 16-bit a 8-bit para visualizacion
371             valor_min = np.min(imagen_corregida)
372             valor_max = np.max(imagen_corregida)
373
374             if valor_max > valor_min:
375                 # Normalizar al rango 0-255
376                 imagen_8bit = ((imagen_corregida - valor_min) / (valor_max -
377                     valor_min) * 255).astype(np.uint8)
378             else:
379                 imagen_8bit = np.zeros_like(imagen_corregida, dtype=np.uint8)
380
381             # Guardar como JPEG
382             nombre_base = os.path.splitext(nombre_archivo)[0]
383             ruta_salida = os.path.join(carpeta_destino, f"{nombre_base}
384                 _procesada.jpg")

```

```

383 img = Image.fromarray(imagen_8bit)
384 img.save(ruta_salida, "JPEG", quality=95)
385
386 logger.info(f"Imagen original guardada: {ruta_salida} -
    Dimensiones: {imagen_8bit.shape}")
387 return ruta_salida
388
389 except Exception as e:
390 logger.error(f"Error guardando imagen original: {e}")
391 return None
392
393
394 def guardar_imagen_procesada_fallback(self, imagen_array,
    nombre_archivo, carpeta_destino="imagenes_procesadas"):
395 """Fallback para guardar en escala de grises si falla el
    colormap"""
396 try:
397 os.makedirs(carpeta_destino, exist_ok=True)
398
399 # Convertir a escala de grises
400 temp_min = np.min(imagen_array)
401 temp_max = np.max(imagen_array)
402
403 if temp_max > temp_min:
404 imagen_normalizada = ((imagen_array - temp_min) / (temp_max -
    temp_min) * 255).astype(np.uint8)
405 else:
406 imagen_normalizada = np.zeros_like(imagen_array, dtype=np.uint8)
407
408 nombre_base = os.path.splitext(nombre_archivo)[0]
409 ruta_salida = os.path.join(carpeta_destino, f"{nombre_base}
    _procesada.jpg")
410
411 from PIL import Image
412 img = Image.fromarray(imagen_normalizada)
413 img.save(ruta_salida, "JPEG")
414
415 logger.info(f"Imagen guardada (fallback): {ruta_salida}")
416 return ruta_salida
417
418 except Exception as e:
419 logger.error(f"Error en fallback: {e}")
420 return None
421
422
423 def procesar_imagen_exacta(self, nombre_archivo, indice_archivo)
    :
424 """Procesa una imagen con calibracion exacta"""

```

```

425 logger.info(f"Procesando: {nombre_archivo} (indice: {
    indice_archivo}")
426
427 try:
428 # Extraer informacion de la imagen
429 numero_imagen = self.extraer_numero_imagen(nombre_archivo)
430 fase, subfase = self.determinar_fase_experimento(indice_archivo)
431 fecha_hora_real = self.extraer_fecha_hora_imagen(nombre_archivo)
432
433 # Leer imagen
434 imagen_array = self.leer_bmp_16bits(nombre_archivo)
435 if imagen_array is None:
436 return None
437
438 # DEBUG: Verificar imagen original
439 logger.info(f"Imagen original - Shape: {imagen_array.shape}, "
440 f"Max: {np.max(imagen_array)}, Min: {np.min(imagen_array)}, "
441 f"Central: {imagen_array[imagen_array.shape[0]//2, imagen_array.
    shape[1]//2}]")
442
443 # Obtener temperaturas objetivo
444 temp_objetivo = self.obtener_temperaturas_objetivo(fase, subfase
    )
445
446 # Agregar fase al objetivo para que la funcion de conversion
    sepa
447 temp_objetivo['fase'] = fase
448
449 # Procesar temperatura
450 temperatura_array = self.convertir_temperatura_exacta(
    imagen_array, temp_objetivo)
451
452 # Calcular metricas CORRECTAMENTE - VERIFICAR QUE NO SEAN
    IGUALES
453 temp_max = float(np.max(temperatura_array))
454 temp_min = float(np.min(temperatura_array))
455
456 # CALCULO EXACTO DEL CENTRO - VERIFICAR COORDENADAS
457 centro_y = temperatura_array.shape[0] // 2
458 centro_x = temperatura_array.shape[1] // 2
459 temp_central = float(temperatura_array[centro_y, centro_x])
460
461 # VERIFICACION: Si son iguales, hay un problema
462 if temp_max == temp_central:
463 logger.warning(f"ADVERTENCIA: Temp max y central son iguales ({
    temp_max}")
464 # Intentar calcular promedio de area central como alternativa
465 y_start = max(0, centro_y - 5)
466 y_end = min(temperatura_array.shape[0], centro_y + 5)

```

```

467 x_start = max(0, centro_x - 5)
468 x_end = min(temperatura_array.shape[1], centro_x + 5)
469
470 area_central = temperatura_array[y_start:y_end, x_start:x_end]
471 if area_central.size > 0:
472     temp_central = float(np.mean(area_central))
473     logger.info(f"Usando promedio de area central: {temp_central:.2f}
474                 }C")
475
476 # VERIFICACION: Para linea_base, forzar valores dentro del rango
477     esperado
478 if fase == "linea_base":
479     if temp_max > 26.0: # Si maximo es mayor a 26, hay problema
480         logger.warning(f"Linea base con temp_max muy alta: {temp_max}.
481                         Ajustando...")
482     # Recalcular basado en el objetivo
483     diff_central = temp_central - temp_objetivo['central']
484     temp_max = temp_objetivo['max'] + diff_central
485     temp_min = temp_objetivo['min'] + diff_central
486     temp_central = temp_objetivo['central'] + diff_central
487
488 # CREAR EL DICCIONARIO RESULTADOS PRIMERO
489 resultados = {
490     'nombre': nombre_archivo,
491     'fecha_hora': fecha_hora_real,
492     'temp_max': temp_max,
493     'temp_min': temp_min,
494     'temp_central': temp_central,
495     'objetivo_central': temp_objetivo['central'],
496     'fase': fase,
497     'subfase': subfase,
498     'numero_imagen': numero_imagen,
499     'indice_archivo': indice_archivo
500 }
501
502 resultados['error_central'] = abs(resultados['temp_central'] -
503     resultados['objetivo_central'])
504
505 # AHORA GUARDAR LA IMAGEN PROCESADA (DESPUES DE CREAR RESULTADOS
506     )
507 ruta_imagen_guardada = self.guardar_imagen_original(
508     nombre_archivo)
509 if ruta_imagen_guardada:
510     resultados['ruta_imagen_procesada'] = ruta_imagen_guardada
511
512 # Log de resultados
513 logger.info(
514     f"Resultados: Max={resultados['temp_max']:.2f}C, "
515     f"Min={resultados['temp_min']:.2f}C, "

```

```

510 f"Central={resultados['temp_central']:.2f}C, "
511 f"Error={resultados['error_central']:.2f}C, "
512 f"Fase={resultados['fase']}-{resultados['subfase']}"
513 )
514
515 # Validacion adicional para linea_base
516 if fase == "linea_base":
517     if resultados['temp_max'] > 26.0 or resultados['temp_min'] <
518         22.0:
519         logger.error(f"VALORES DE LINEA BASE FUERA DE RANGO: "
520             f"Max={resultados['temp_max']:.2f}, Min={resultados['temp_min']:.2f}")
521
522 # Enviar por MQTT
523 self.enviar_mqtt(resultados)
524
525 return resultados
526
527 except Exception as e:
528     logger.error(f"Error procesando {nombre_archivo}: {e}")
529     import traceback
530     logger.error(traceback.format_exc())
531     return None
532
533
534
535 def procesar_imagen(self, nombre_imagen):
536     """Wrapper para compatibilidad con la interfaz - usa indice 0
537     por defecto"""
538     return self.procesar_imagen_exacta(nombre_imagen, 0)
539
540 def seleccionar_imagenes_a_procesar(self, todas_imagenes):
541     """Permite al usuario seleccionar que imagenes procesar"""
542     if not todas_imagenes:
543         return []
544
545     print("\nSELECCION DE IMAGENES A PROCESAR")
546     print("1. Procesar todas las imagenes")
547     print("2. Seleccionar rango de imagenes")
548     print("3. Seleccionar imagenes individuales")
549
550     try:
551         opcion = int(input("Seleccione una opcion (1-3): "))
552
553         if opcion == 1:
554             return todas_imagenes
555         elif opcion == 2:

```

```

555 inicio = int(input(f"Imagen inicial (1-{len(todas_imagenes)}): "
556 )) - 1
557 fin = int(input(f"Imagen final ({inicio+1}-{len(todas_imagenes)}
558 ): "))
559 return todas_imagenes[inicio:fin]
560 elif opcion == 3:
561 seleccion = input("Ingrese los numeros de imagen separados por
562 comas (ej: 1,3,5): ")
563 indices = [int(i.strip())-1 for i in seleccion.split(",") if i.
564 strip().isdigit()]
565 return [todas_imagenes[i] for i in indices if 0 <= i < len(
566 todas_imagenes)]
567 else:
568 print("Opcion no valida, procesando todas las imagenes")
569 return todas_imagenes
570
571 except ValueError:
572 print("Entrada no valida, procesando todas las imagenes")
573 return todas_imagenes
574 except Exception as e:
575 print(f"Error en seleccion: {e}, procesando todas las imagenes")
576 return todas_imagenes
577
578 def procesar_imagenes_seleccionadas(self):
579 """Procesa imagenes seleccionadas con manejo robusto de errores
580 """
581 logger.info("Buscando imagenes en la camara")
582
583 try:
584 todas_imagenes = self.listar_imagenes_camara()
585 if not todas_imagenes:
586 logger.error("No se encontraron imagenes BMP")
587 return []
588
589 # Seleccion de imagenes
590 imagenes_a_procesar = self.seleccionar_imagenes_a_procesar(
591 todas_imagenes)
592
593 if not imagenes_a_procesar:
594 logger.warning("No se seleccionaron imagenes para procesar")
595 return []
596
597 logger.info(f"Procesando {len(imagenes_a_procesar)} imagenes..."
598 )
599
600 # Procesar imagenes
601 resultados = []
602 for i, img in enumerate(imagenes_a_procesar, 1):

```

```

595 logger.info(f"[{i}/{len(imagenes_a_procesar)}] Procesando {img}"
596 )
597 # Pasar el indice (i-1 porque es 0-based) para determinar la
598 fase
599 resultado = self.procesar_imagen_exacta(img, i-1)
600 if resultado:
601 resultados.append(resultado)
602 time.sleep(0.1)
603
604 return resultados
605
606 except Exception as e:
607 logger.error(f"Error en procesamiento de imagenes: {e}")
608 return []
609
610 def procesar_imagenes_automatico(ruta_camara="/media/camara",
611 imagenes=None):
612 """Version automatica para la interfaz grafica"""
613 if not montar_camara(ruta_camara):
614 return False
615
616 procesador = ProcesadorTermograficoCalibradoExacto(ruta_camara)
617
618 if imagenes is None:
619 # Procesar todas
620 imagenes = procesador.listar_imagenes_camara()
621
622 if not imagenes:
623 print("No hay imagenes para procesar")
624 return False
625
626 print(f"Procesando {len(imagenes)} imagenes automaticamente...")
627
628 resultados = []
629 for i, img in enumerate(imagenes, 1):
630 print(f"[{i}/{len(imagenes)}] Procesando {img}")
631 resultado = procesador.procesar_imagen_exacta(img, i-1)
632 if resultado:
633 resultados.append(resultado)
634 time.sleep(0.1)
635
636 # Desmontar al finalizar
637 os.system(f"sudo umount {ruta_camara} 2>/dev/null")
638 return True
639
640 #Codigo principal
641 if __name__ == "__main__":
642 import argparse

```

```

641 parser = argparse.ArgumentParser(description='Procesador de
    imagenes termicas')
642 parser.add_argument('--automatico', action='store_true', help='
    Modo automatico para interfaz grafica')
643 parser.add_argument('--imagenes', type=str, help='Archivo con
    lista de imagenes a procesar')
644 parser.add_argument('--ruta-camara', type=str, default="/media/
    camara", help='Ruta de montaje de la camara')
645 args = parser.parse_args()
646
647 if args.automatico:
648     # Modo automatico para la interfaz grafica
649     print("MODO AUTOMATICO - PROCESAMIENTO DESDE INTERFAZ GRAFICA")
650     print("=" * 60)
651
652     # Cargar lista de imagenes si se proporciona
653     imagenes_a_procesar = None
654     if args.imagenes and os.path.exists(args.imagenes):
655         try:
656             with open(args.imagenes, 'r') as f:
657                 imagenes_a_procesar = [line.strip() for line in f if line.strip
                    ()]
658             print(f"Cargadas {len(imagenes_a_procesar)} imagenes desde {args
                .imagenes}")
659         except Exception as e:
660             print(f"Error cargando lista de imagenes: {e}")
661             imagenes_a_procesar = None
662
663     # Montar camara
664     if not montar_camara(args.ruta_camara):
665         print("ERROR: No se pudo montar la camara")
666         exit(1)
667
668     # Procesar imagenes
669     procesador = ProcesadorTermograficoCalibradoExacto(args.
        ruta_camara)
670
671     if imagenes_a_procesar:
672         # Procesar solo las imagenes especificadas
673         imagenes_disponibles = procesador.listar_imagenes_camara()
674         imagenes_validas = [img for img in imagenes_a_procesar if img in
            imagenes_disponibles]
675
676         if not imagenes_validas:
677             print("ERROR: Ninguna de las imagenes solicitadas esta
                disponible en la camara")
678             print(f"Imagenes disponibles: {imagenes_disponibles}")
679             exit(1)
680

```

```

681 print(f"Procesando {len(imagenes_validas)} imagenes especificas
...")
682 imagenes_a_procesar = imagenes_validas
683 else:
684 # Procesar todas las imagenes
685 imagenes_a_procesar = procesador.listar_imagenes_camara()
686 if not imagenes_a_procesar:
687 print("ERROR: No se encontraron imagenes en la camara")
688 exit(1)
689 print(f"Procesando todas las {len(imagenes_a_procesar)} imagenes
encontradas...")
690
691 # Procesar cada imagen
692 resultados_exitosos = 0
693 for i, nombre_imagen in enumerate(imagenes_a_procesar, 1):
694 print(f"[{i}/{len(imagenes_a_procesar)}] Procesando: {
nombre_imagen}")
695
696 try:
697 resultado = procesador.procesar_imagen_exacta(nombre_imagen, i
-1)
698 if resultado:
699 print(f"? EXITOSO: {nombre_imagen}")
700 print(f"    Temperatura - Max: {resultado['temp_max']:.2f}C, Min:
{resultado['temp_min']:.2f}C, Central: {resultado['
temp_central']:.2f}C")
701 resultados_exitosos += 1
702 else:
703 print(f"? FALLIDO: {nombre_imagen}")
704
705 except Exception as e:
706 print(f"? ERROR procesando {nombre_imagen}: {e}")
707
708 # Pequena pausa entre imagenes
709 if i < len(imagenes_a_procesar):
710 time.sleep(0.5)
711
712 print(f"\nPROCESAMIENTO COMPLETADO: {resultados_exitosos}/{len(
imagenes_a_procesar)} imagenes exitosas")
713
714 # Desmontar camara
715 print("Desmontando camara...")
716 os.system(f"sudo umount {args.ruta_camara} 2>/dev/null")
717
718 else:
719 # Modo interactivo original (compatible con version anterior)
720 print("PROCESADOR TERMOGRAFICO - MODO INTERACTIVO")
721 print("
=====")

```

```

722 ruta_camara = "/media/camara"
723
724
725 # Paso 1: Montar la camara
726 if not montar_camara(ruta_camara):
727     print("\nNo se pudo montar la camara. Verifique la conexion.")
728     exit(1)
729
730 # Paso 2: Procesar imagenes
731 print("\n" + "="*60)
732 print("PROCESANDO IMAGENES DESDE LA CAMARA")
733 print("="*60)
734
735 procesador = ProcesadorTermograficoCalibradoExacto(ruta_camara)
736 resultados = procesador.procesar_imagenes_seleccionadas()
737
738 # Mostrar resultados finales
739 if resultados:
740     print(f"\nRESULTADOS FINALES ({len(resultados)} imagenes):")
741     print("Archivo          | Fecha/Hora          | Max (C) | Min (C) | Central (C) | Error (C) | Fase")
742     print(120*"--")
743
744     for res in resultados:
745         nombre_corto = res['nombre'][:15] + "..." if len(res['nombre'])
746             > 15 else res['nombre']
747         fecha_str = res['fecha_hora'].strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
748         print(f"{nombre_corto:15} | {fecha_str:18} | {res['temp_max']:6.2f} | {res['temp_min']:6.2f} | "
749             f"{res['temp_central']:8.2f} | {res['error_central']:6.2f} | {res['fase']}-{res['subfase']}")
750
751     errores = [r['error_central'] for r in resultados]
752     print(f"\nError promedio: {np.mean(errores):.2f}C")
753     print(f"Error maximo: {np.max(errores):.2f}C")
754     else:
755         print("No se procesaron imagenes")
756
757 # Desmontar la camara
758 print("\nDesmontando camara...")
759 os.system(f"sudo umount {ruta_camara} 2>/dev/null")
760 print("Camara desmontada correctamente")

```

Anexo D: Código suscriptor del sistema MQTT

```

1 import mysql.connector
2 import paho.mqtt.client as mqtt

```

```

3 import json
4 from datetime import datetime
5
6 # Configuración de la BD
7 DB_HOST = "bl0sgbxgrz1wpa1knjz-mysql.services.clever-cloud.com"
8 DB_USER = "uczorwiobw8kkvzn"
9 DB_PASS = "hf3mkl3G1syioIRwfgsB"
10 DB_NAME = "bl0sgbxgrz1wpa1knjz"
11
12 # Configuración MQTT
13 MQTT_BROKER = "localhost"
14 MQTT_PORT = 1883
15 MQTT_TOPIC = "miproyecto/#" # Escuchar todos los subtopics
16
17 # Función para guardar datos del sensor IR en la NUEVA tabla
18 def guardar_datos_sensor(datos):
19     try:
20         conexion = mysql.connector.connect(
21             host=DB_HOST,
22             user=DB_USER,
23             password=DB_PASS,
24             database=DB_NAME
25         )
26         cursor = conexion.cursor()
27
28         consulta = """
29         INSERT INTO datos_crudos_sensor (
30             experimento_id,
31             ciclo_id,
32             timestamp,
33             fase_ciclo,
34             temp_objeto,
35             temp_ambiente,
36             delta_t,
37             tendencia_obj,
38             tendencia_delta,
39             cambio_porcentual,
40             clasificacion
41         ) VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s)
42         """
43
44         # Convertir el timestamp string a objeto datetime
45         timestamp_obj = datetime.strptime(datos["timestamp"], '%Y-%m-%d
46             %H:%M:%S')
47
48         valores = (
49             datos["experimento_id"],
50             datos["ciclo_id"],
51             timestamp_obj,

```

```

51 datos["fase_ciclo"],
52 datos["temp_objeto"],
53 datos["temp_ambiente"],
54 datos["delta_t"],
55 datos["tendencia_obj"],
56 datos["tendencia_delta"],
57 datos["cambio_porcentual"],
58 datos["clasificacion"]
59 )
60
61 cursor.execute(consulta, valores)
62 conexion.commit()
63 cursor.close()
64 conexion.close()
65
66 print(f"Datos guardados - Exp: {datos['experimento_id']} - Temp:
67       {datos['temp_objeto']}C - Fase: {datos['fase_ciclo']}")
68
69 except Exception as e:
70 print("Error al guardar datos del sensor:", e)
71 print("Datos recibidos:", datos)
72
73 # Funcion para guardar datos de la camara termica en la NUEVA
74   tabla
75 def guardar_datos_camara(datos):
76   try:
77     conexion = mysql.connector.connect(
78       host=DB_HOST,
79       user=DB_USER,
80       password=DB_PASS,
81       database=DB_NAME
82     )
83     cursor = conexion.cursor()
84
85     consulta = """
86     INSERT INTO mediciones_termograficas (
87     nombre_archivo,
88     fecha_hora,
89     temperatura_maxima,
90     temperatura_minima,
91     temperatura_central,
92     fase_experimento
93     ) VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s)
94     """
95
96     # Convertir la fecha string a objeto datetime
97     fecha_hora_obj = datetime.fromisoformat(datos["fecha_hora"].
98       replace('Z', '+00:00'))

```

```

97     valores = (
98     datos["nombre_archivo"],
99     fecha_hora_obj,
100    datos["temperatura_maxima"],
101    datos["temperatura_minima"],
102    datos["temperatura_central"],
103    datos["fase_experimento"]
104    )
105
106    cursor.execute(consulta, valores)
107    conexion.commit()
108    cursor.close()
109    conexion.close()
110
111    print(f"Datos camara guardados - Archivo: {datos['nombre_archivo']} - Fase: {datos['fase_experimento']}")
112
113    except Exception as e:
114    print("Error al guardar datos de la camara:", e)
115    print("Datos recibidos:", datos)
116
117    # Callback de conexion
118    def on_connect(client, userdata, flags, rc):
119    if rc == 0:
120    print("Conectado a MQTT Broker")
121    client.subscribe(MQTT_TOPIC)
122    print("Suscrito al topic:", MQTT_TOPIC)
123
124    # Callback de recepcion de mensajes
125    def on_message(client, userdata, msg):
126    try:
127    texto = msg.payload.decode('utf-8', errors='replace')
128
129    print("\n" + "="*50)
130    print("Mensaje recibido en topic:", msg.topic)
131    print("Contenido:", texto)
132    print("="*50)
133
134    datos = json.loads(texto)
135
136    # Decidir a que tabla guardar segun el topic
137    if msg.topic == "miproyecto/temperatura":
138    print("Procesando datos de sensor IR...")
139
140    campos_requeridos = [
141    'experimento_id', 'ciclo_id', 'timestamp', 'temp_objeto', '
    temp_ambiente',
142    'delta_t', 'fase_ciclo', 'tendencia_obj', 'tendencia_delta',
143    'cambio_porcentual', 'clasificacion'

```

```


144 ]
145
146 if all(campo in datos for campo in campos_requeridos):
147     guardar_datos_sensor(datos)
148 else:
149     print("Error: Datos incompletos del sensor")
150     print("Campos recibidos:", list(datos.keys()))
151     print("Campos requeridos:", campos_requeridos)
152
153 elif msg.topic == "miproyecto/camara":
154     print("Procesando datos de camara termica...")
155
156 campos_requeridos = [
157     'nombre_archivo',
158     'fecha_hora',
159     'temperatura_maxima',
160     'temperatura_minima',
161     'temperatura_central',
162     'fase_experimento'
163 ]
164
165 if all(campo in datos for campo in campos_requeridos):
166     guardar_datos_camara(datos)
167 else:
168     print("Error: Datos incompletos de la camara")
169     print("Campos recibidos:", list(datos.keys()))
170     print("Campos requeridos:", campos_requeridos)
171
172 else:
173     print("Mensaje recibido en un topic desconocido:", msg.topic)
174
175 except json.JSONDecodeError as e:
176     print("Error decodificando JSON:", e)
177     print("Mensaje recibido:", texto)
178
179 except Exception as e:
180     print("Error procesando mensaje MQTT:", e)
181
182 # Funcion principal
183 def main():
184     try:
185         client = mqtt.Client()
186         client.on_connect = on_connect
187         client.on_message = on_message
188
189         print("Iniciando suscriptor MQTT...")
190         print(f"Conectando a broker: {MQTT_BROKER}:{MQTT_PORT}")
191
192         client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT, 60)

```

```
193
194 print("Iniciando loop MQTT...")
195 print("Esperando datos...")
196 client.loop_forever()
197
198 except KeyboardInterrupt:
199     print("\nSuscriptor detenido por el usuario")
200 except Exception as e:
201     print("Error en el suscriptor:", e)
202
203 if __name__ == "__main__":
204     main()
```

Tesis corregida Ariel Gonzalez

5%
Textos sospechosos



2% Similitudes
 < 1 % similitudes entre comillas
 < 1 % entre las fuentes mencionadas

14% Idiomas no reconocidos (ignorado)

4% Textos potencialmente generados por la IA

Nombre del documento: Tesis corregida Ariel Gonzalez.pdf ID del documento: 78b0d560c4f80554117761264ae33f507a7b6981 Tamaño del documento original: 13,37 MB	Depositante: SENDEY AGUSTIN VERA GONZALEZ Fecha de depósito: 16/11/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 16/11/2025	Número de palabras: 43.467 Número de caracteres: 293.593
---	--	---




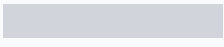

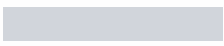

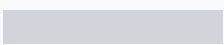


Ubicación de las similitudes en el documento:





Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 Proyecto integrador.docx Proyecto integrador.docx #1291b9 <small>Viene de de mi biblioteca</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (377 palabras)
2	 JUSTIFICACION.pdf JUSTIFICACION.pdf #ba07ba <small>Viene de de mi grupo</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (164 palabras)
3	 accedacris.ulpgc.es Estudio de la cámara FLIR Lepton y su viabilidad para el seg... <small>https://accedacris.ulpgc.es/jspui/bitstream/10553/75763/2/TFG Antonio David Galván Hernán... 1 fuente similar</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)






Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.upse.edu.ec Implementación del sistema web de gestión de los tra... <small>https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4559/1/UPSE-TIN-2018-0001.pdf</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (18 palabras)
2	 academia-lab.com Ley de Wien (desplazamiento) _AcademiaLab <small>https://academia-lab.com/enciclopedia/ley-de-desplazamiento-de-wien/</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (19 palabras)
3	 www.nature.com Solid base-assisted photocatalytic degradation of polyethylen... <small>https://www.nature.com/articles/s41428-024-01009-1.pdf</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
4	 nueva.cimav.edu.mx Perfil - CIMAV <small>http://nueva.cimav.edu.mx/perfil/cesar.leyva/</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
5	 pmc.ncbi.nlm.nih.gov Lock <small>https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7348926/</small>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)

Fuente ignorada Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 tesis_Ariel Gonzalez.pdf tesis_Ariel Gonzalez #b1156d <small>Viene de de mi biblioteca</small>	72%		Palabras idénticas: 72% (31.016 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	 https://doi.org/
2	 https://www.mdpi.com/2073-4360/
3	 https://www.processparameters.co.uk/infrared-temperature-measurement-for-plastics/
4	 https://materials.fsri.org/materialdetail/high-density-polyethylene-hdpe
5	 https://doi.org/10.1038/s41428-024-01009-1



Sendey Agustin Vera Gonzalez

