CONTENIDO

[RESUMEN 2](#_Toc191379773)

[ABSTRACT 2](#_Toc191379774)

[INTRODUCCIÓN 2](#_Toc191379775)

[HIPÓTESIS 3](#_Toc191379776)

[OBJETIVO GENERAL 3](#_Toc191379777)

[OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3](#_Toc191379778)

[1. MARCO TEÓRICO 4](#_Toc191379779)

[1.1 Termografía 4](#_Toc191379780)

[1.2 Termografía activa 4](#_Toc191379781)

[1.3 Termografía activa lock-in 5](#_Toc191379782)

[1.4 Cámara termográfica 5](#_Toc191379783)

[1.5 Rapberry Pi 4 6](#_Toc191379784)

[1.6 Módulo detector térmico Tiny-1C 6](#_Toc191379785)

[1.7 Pantalla con interfaz táctil 6](#_Toc191379786)

[1.8 Módulo de batería de respaldo 6](#_Toc191379787)

[1.9 Autodesk Inventor 6](#_Toc191379788)

[1.10 Impresión 3D 6](#_Toc191379789)

[1.11 Python 6](#_Toc191379790)

[1.12 OpenCV 6](#_Toc191379791)

[1.13 Tkinter 6](#_Toc191379792)

[1.14 Patrón de diseño Modelo Vista Controlador (MVC) 6](#_Toc191379793)

[2. DESRROLLO 6](#_Toc191379794)

[2.1 Implementación del Hardware 6](#_Toc191379797)

[2.1.1 Diseño del prototipo 6](#_Toc191379798)

[2.1.2 Diseño de la carcasa del prototipo 6](#_Toc191379799)

[2.2 Desarrollo de Software 6](#_Toc191379800)

[2.2.1 Diseño de la interfaz visual 6](#_Toc191379801)

[2.2.2 Algoritmo para el procesamiento lock-in 6](#_Toc191379802)

[2.2.3 Decodificación de los frames obtenidos desde el detector térmico 6](#_Toc191379803)

[2.2.4 Otras funciones de la aplicación 6](#_Toc191379804)

[3 RESULTADOS 7](#_Toc191379805)

[3.1 Análisis de los resultados 7](#_Toc191379806)

[3.2 Limitaciones del sistema 7](#_Toc191379807)

[4 CONCLUSIONES 7](#_Toc191379808)

[4.1 Hallazgos principales 7](#_Toc191379809)

[4.2 Aplicaciones prácticas 7](#_Toc191379810)

[4.3 Trabajo futuro 7](#_Toc191379811)

[5 BIBLIOGRAFÍA 7](#_Toc191379812)

[6 ANEXOS 7](#_Toc191379813)

[6.1 Código fuente 7](#_Toc191379814)

[6.2 Especificaciones técnicas 7](#_Toc191379815)

# RESUMEN

# ABSTRACT

# INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva y no invasiva que se utiliza ampliamente en diversas ramas de la ciencia y la tecnología para la obtención de información cualitativa y cuantitativa sobre estructuras y materiales. Sus orígenes se remontan al siglo XIX, cuando el astrónomo William Herschel descubrió la radiación infrarroja en 1800 (.*Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography,* Maldague). A lo largo del siglo XX, los avances en detectores infrarrojos y sistemas de procesamiento de imágenes permitieron la creación de las primeras cámaras termográficas, que inicialmente se utilizaron en aplicaciones militares y aeroespaciales. Con el tiempo, esta técnica se expandió a otros campos, como la medicina, la construcción y la industria, gracias a su capacidad para detectar variaciones de temperatura y mapear patrones térmicos en superficies y subsuperficies (*Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing* , Vavilov & Burleigh).

En términos generales, la termografía infrarroja se puede clasificar en dos grandes grupos: **termografía pasiva** y **termografía activa**. La **termografía pasiva** se basa en la detección de la radiación térmica emitida naturalmente por los objetos, sin la aplicación de una fuente de calor externa. Esta técnica es ampliamente utilizada en aplicaciones como la monitorización de edificios para detectar fugas de calor o en medicina para identificar patrones térmicos anormales en el cuerpo humano (.*Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography,* Maldague).Por otro lado, la **termografía infrarroja activa** requiere el empleo de una fuente de calor externa para excitar el material que se desea inspeccionar. Esta técnica ha demostrado ser especialmente útil para la detección de defectos internos y la evaluación de propiedades térmicas, ya que permite una mayor profundidad de inspección y la identificación de anomalías que no serían visibles con termografía pasiva (*Nondestructive testing with thermography* Ibarra-Castanedo et al.).

Dentro de la termografía activa, la técnica de tipo **lock-in** ha ganado popularidad debido a su capacidad para mejorar la relación señal-ruido en entornos con ruido térmico significativo. Esta técnica utiliza excitaciones térmicas periódicas y analiza la respuesta en fase y amplitud, lo que permite detectar pequeñas variaciones de temperatura que de otro modo serían difíciles de identificar (*Nondestructive testing with thermography* Ibarra-Castanedo et al.). El método *lock-in* ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones como la inspección de materiales compuestos en la industria aeroespacial y la evaluación de paneles solares en el sector energético (*Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing* , Vavilov & Burleigh). Además, su versatilidad y precisión la convierten en una herramienta invaluable para la caracterización de materiales y la detección de defectos en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas (.*Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography,* Maldague).

Sin embargo, los sistemas comerciales para realizar termografía *lock-in* presentan varias limitaciones que restringen su accesibilidad y aplicabilidad en diversos contextos. Además de su alto costo, estos sistemas suelen ser de gran tamaño y requieren configuraciones complejas, lo que los hace poco prácticos para su uso en campo o en entornos donde la portabilidad es esencial. Por ejemplo, en el Laboratorio de Técnicas Fototérmicas del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaria del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de Ciudad de México, se cuenta con una cámara termográfica FLIR SC5000, que, aunque es una herramienta poderosa para investigación avanzada, requiere de infraestructura especializada y personal capacitado para su operación (FLIR Systems, 2020).

Estos requisitos técnicos hacen que la termografía *lock-in* no sea accesible para instituciones con recursos limitados o y que no cuenten con un personal altamente capacitado. Además, la compleja configuración experimental requerida, limita la portabilidad y adaptabilidad de estos sistemas a diferentes ambientes fuera de un laboratorio. Esta falta de versatilidad representa una barrera significativa para la adopción generalizada de esta técnica.

En la literatura científica, se han reportado avances en el desarrollo de sistemas de termografía activa más accesibles. Por ejemplo, en 2018, los investigadores Marjal Razani y Artur del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de York, en Canadá, utilizaron una cámara termográfica de bajo costo acoplada a un teléfono celular para realizar termografía infrarroja activa *lock-in* con el fin de detectar caries dentales tempranas. Este avance demostró la viabilidad de utilizar equipos más asequibles para aplicaciones específicas de termografía activa *lock-in*, ampliando así su accesibilidad y potencial de uso en diversos campos. Sin embargo, este sistema solo permitía realizar termografía pasiva (Lock-in thermography using a cellphone attachment infrared camera Enhanced Reader, Razani & Artur).

También, en el Laboratorio de Técnicas Fototérmicas del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaria, del Instituto Politécnico Nacional en Ciudad de México, se reportó el uso de una cámara Super IR CAM 2S, de bajo costo, para realizar termografía infrarroja activa lock-in y calcular la difusividad térmica de materiales*.* Para el procesamiento lock-in se utilizó un software desarrollado por miembros del propio laboratorio que se ejecuta sobre un sistema operativo Windows en una computadora personal. Esta propuesta, aunque disminuye los costos para la ejecución de la técnica, tiene limitaciones en cuando la portabilidad y escalabilidad del sistema ya que depende de un software externo y una computadora personal para el procesamiento lock-in (Draft\_Manuscript)

Otro ejemplo destacado es la cámara termográfica desarrollada por Lab IR Edu, en la República Checa. Este dispositivo, diseñado específicamente para fines educativos, permite a niños y jóvenes explorar los principios de la termografía infrarroja pasiva de manera intuitiva y accesible. Este dispositivo fue implementado sobre una microcomputadora Raspberry Pi 4 y cuenta con una pantalla con entrada táctil, una batería de respaldo y una interfaz de usuario amigable y fácil de usar que incluye funciones como la medición de temperatura en puntos específicos, captura de imágenes y grabación de videos térmicos. Además, su diseño portátil y su capacidad para conectarse a dispositivos externos, como memorias USB, la convierten en una herramienta ideal para su uso en aulas y laboratorios escolares. La limitante principal de este proyecto es que solo permite realizar termografía infrarroja pasiva (Infrared\_Camera\_MANUAL)

Las deficiencias reportadas en la literatura, como el alto costo, la falta de portabilidad y la dependencia de programas externos para el procesamiento *lock-in*, motivan este trabajo, que propone el diseño e implementación de un prototipo experimental basado en una microcomputadora Raspberry Pi, un detector térmico microbolómetro, una interfaz de usuario intuitiva y un algoritmo de procesamiento *lock-in* embebido. Este enfoque busca reducir los costos asociados a los equipos comerciales, aprovechando las ventajas de la Raspberry Pi, como su amplia comunidad de soporte, compatibilidad con Python y flexibilidad para integrarse con otros dispositivos (Raspberry Pi Foundation, 2023).

Este sistema no solo resuelve el problema del alto costo de los sistemas de termografía activa, sino que también contribuye a la literatura al presentar un dispositivo embebido, portátil y escalable, accesible incluso para usuarios sin conocimientos avanzados. Los principales desafíos, como la sincronización entre la excitación térmica y la adquisición de datos, así como la optimización del algoritmo *lock-in* para su ejecución en tiempo real en una plataforma de recursos limitados, se superaron mediante técnicas de programación eficiente y un enfoque modular que permite futuras mejoras.

# HIPÓTESIS

# OBJETIVO GENERAL

* Diseñar e implementar un prototipo experimental aplicado a termografía infrarroja activa de tipo lock-in, utilizando un sistema embebido Raspberry y un detector térmico microbolómetro.

# OBJETIVOS ESPECÍFICOS

* Acoplar el módulo de cámara térmica a la tarjeta de procesamiento Raspberry.
* Desarrollar un algoritmo para la manipulación, adquisición y almacenamiento de la información proveniente de la cámara térmica.
* Implementar un amplificador Lock-in sobre una microcomputadora tipo Raspberry, para procesar los termogramas obtenidos desde la cámara térmica.
* Desarrollar una aplicación de interfaz de usuario para visualizar y analizar la información procesada
* Probar el prototipo sobre un conjunto de materiales de referencia.

# MARCO TEÓRICO

## Termografía

Infrared thermography (IRT) consists of detecting the infrared radiation coming from a medium or body using a suitable camera, and representing it as image known as Thermogram. Although the phenomenon of infrared radiation was discovered in 1800 by Herschel, years had to pass to do research and technological developments with this type of radiation, highlighting the development of the first mono-detector IR camera in 51

1963 by AGA. Subsequently, since the last decade of the twentieth century there is growing interest in the field of IRT, motivated by the emergence of Focal Plane Array Cameras, which have high thermal sensitivity, and high spatial and temporal resolution DocAdrianTesis

Lock-in thermography (LIT) is a non-destructive technique [1,2] that has found growing interest because of its usefulness for the characterization of materials and devices, such as the measurement of thermal properties [3-8], crack localization [9], detection of sub-superficial defects [10,11], and the investigation of microscopic leakage sites in integrated circuits [12]. LIT is based on periodically heating the sample at a given frequency (f) to generate thermal waves. The behavior of these waves is governed by the samplés thermal properties. In this technique, a video of the temporal evolution of the surface temperature at f is recorded with a thermographic camera. Subsequently, the Lock-in processing of this video yields amplitude and phase thermograms, which contain useful thermal information about the sample and in which effects related to the optical or infrared structure of the samplés surface that can appear in conventional, stationary therntography are suppressed [13]. Other notable advantages of LIT over stationary thermography are improved sensitivity and superior spatial resolution Articulo Del Lab camara china

## Termografía activa

The methods and techniques based on IRT can be divided into two groups: passive and active infrared thermography. In the first, a controlled external excitation source is not used to generate an additional heat flow within the body under observation, i.e. only natural heat sources are considered. In the second one, the sample under examination is heated by an external stimulus, a fact that allows studying the thermal response of the body to such stimulation. There are different variants of active IRT depending on the source of heat, which have been used in different fields of applied science to obtain qualitative and quantitative information. Active IRT is used in this manuscript for the thermal characterization of moving and static samples, as well as static interfaces. DocAdrianTesis

## Termografía activa lock-in

La termografía Lock-in es una técnica avanzada que combina la Termografía Infrarroja Activa (Active IRT) con el método de procesamiento de señales conocido como Detección de Fase Sensible (Phase-Sensitive Detection). Este enfoque consiste en aplicar un estímulo térmico periódico, como un haz de luz modulado, sobre la superficie de un material, generando una onda térmica en su interior. La respuesta térmica superficial se registra mediante una cámara infrarroja sincronizada con la frecuencia de modulación del estímulo. Luego, se aplica un algoritmo de procesamiento Lock-in a cada píxel de la secuencia de imágenes térmicas, obteniendo como resultado un mapa de amplitud, que refleja la intensidad de la respuesta térmica, y un mapa de fase, que indica el desfase temporal entre el estímulo y la respuesta [1].

Esta técnica ha evolucionado significativamente en los últimos años, gracias al desarrollo de cámaras infrarrojas de alta sensibilidad y algoritmos de procesamiento más eficientes. La termografía Lock-in se utiliza ampliamente en aplicaciones de inspección no destructiva y caracterización de materiales, ya que permite detectar defectos internos, como grietas, delaminaciones o inclusiones, y evaluar propiedades térmicas como la conductividad y la difusividad [2].

Entre las ventajas de la termografía Lock-in se encuentran su alta sensibilidad y su capacidad para reducir el ruido ambiental, lo que la hace ideal para aplicaciones en entornos industriales y de investigación. Además, la información de fase proporciona datos valiosos sobre la profundidad y naturaleza de los defectos, lo que no es posible con técnicas de termografía convencional [3]. DocAdrianTesis

## Cámara termográfica

The widespread use of this method has been limited by the high cost of the cameras most used for such applications, which are actively

cryogenic cooled devices characterized by high frame rates and spatial

resolution, low NETD (Noise Equivalent Temperature Difference), and

incorporated Lock-in facilities. However, over the last few years, several

thermographic camera models have appeared in the market with very

low prices when compared with those of their research-grade counter-

parts, albeit at the expense of inferior performance. As an example, in

the experimental section of this paper, we will show the main charac-

teristics of the two cameras to which we will refer in this work, namely

the research-grade FLIR SC 5000 and the much cheaper QIANLI MEGA-

IDEA Super iR Cam 28.

## Rapberry Pi 4

## Módulo detector térmico Tiny-1C

## Pantalla con interfaz táctil

## Módulo de batería de respaldo

## Autodesk Inventor

## Impresión 3D

## Python

## OpenCV

## Tkinter

## Patrón de diseño Modelo Vista Controlador (MVC)

# DESRROLLO Y MÉTODOS



## Implementación del Hardware

### Diseño e implementación del prototipo

### Diseño de la carcasa del prototipo

## Desarrollo de Software

### Diseño y desarrollo de la interfaz visual

### Algoritmo para el procesamiento lock-in

### Decodificación de los frames obtenidos desde el detector térmico

### Otras funciones de la aplicación

# RESULTADOS

## Análisis de los resultados

## Limitaciones del sistema

# CONCLUSIONES

## Hallazgos principales

## Aplicaciones prácticas

## Trabajo futuro

# BIBLIOGRAFÍA

# ANEXOS

## Código fuente

## Especificaciones técnicas