

Calibración de sensores infrarrojos utilizando la plataforma Raspberry Pi



María López Carmona

Departamento de Electrónica y Electromagnetismo

Grado en Física

Universidad de Sevilla

Tutor: Dr. Juan Antonio Leñero Bardallo

Co-tutor: Rubén Gómez Merchán

Agradecimientos

Tras haber finalizado este trabajo, me gustaría agradecer a mi tutor Juan Antonio Leñero la gran disponibilidad, esfuerzo y ayuda prestada junto con Rubén Gómez. Gracias por la implicación, consejos y facilidades dadas por ambos.

A mi familia, todo lo que les pueda decir es poco, gracias por ese apoyo incondicional ante cualquier adversidad; en especial a mi padre.

Y a mis amigos, por haber hecho de esta etapa tan intensa y dura, una experiencia tan bonita.

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado parte de un proyecto colaborativo entre la Universidad de Sevilla y el Departamento de Dermatología Pediátrica del Hospital Virgen de Rocío. El objetivo del estudio es implementar un sistema compacto y económico basado en una cámara infrarroja para el análisis de la temperatura de anomalías vasculares en niños, con el fin de poder clasificarlas de forma temprana. Uno de los retos que se plantea en el proyecto es calibrar la cámara térmica de partida, que mide niveles de radiación en la banda del infrarrojo, para obtener niveles absolutos de temperatura a partir de ellos. En este trabajo se realiza la calibración de dos sensores infrarrojos: un termómetro y la cámara infrarroja existente, con el fin de establecer una relación entre la salida proporcionada por cada uno de ellos. Se han desarrollado dos métodos para obtener la temperatura corregida suministrada por el termómetro infrarrojo en un rango óptimo (distancias a las que se puede adquirir la temperatura calibrada) de medición. De forma que es posible hacer una conversión lineal entre la temperatura de una superficie de la piel y los niveles de radiación infrarroja que mide el sensor térmico de imágenes. Gracias a la relación encontrada entre estas dos medidas es posible obtener un mapa 2D de temperatura que ayuda a la detección de problemas relacionados con las variaciones térmicas en la piel, como son las anomalías vasculares.

Las tareas del proyecto han abarcado la elección de un termómetro infrarrojo comercial; su montaje en el sistema médico desarrollado; el desarrollo de código que permite automatizar las medidas con el termómetro; su calibrado experimental; y el desarrollo de un programa que permite de forma automática convertir los niveles de radiación del sensor de imagen infrarrojo de partida en valores absolutos de temperatura para generar imágenes termográficas.

Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Lista de abreviaturas	x
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Motivación y Objetivos del proyecto	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Principio de operación de los sensores infrarrojos	4
1.3.1 Fundamentos Físicos.....	6
1.3.2 Tipos de sensores infrarrojos	10
1.3.2.1 Termopila	11
1.3.2.2 Bolómetro.....	12
1.4 Protocolos de comunicación entre los sensores IR y la Raspberry Pi	14
1.4.1 Protocolo de comunicación I2C	14
1.4.2 Protocolo de comunicación SPI	16
Capítulo 2. Descripción del sistema	19
2.1 Diagrama de bloques	19
2.2 Sensor de temperatura IR	20
2.3 Sensor de imágenes IR	21
2.4 Conexión entre los sensores IR y la plataforma Rapsberry Pi	23

Capítulo 3. Caracterización experimental y calibrado	25
3.1 Montaje y condiciones de la calibración	26
3.2 Procedimiento calibración termómetro IR	28
3.2.1 Calibración de la temperatura de la superficie medida por el termómetro IR MLX90614D.....	30
3.2.2 Calibración de la temperatura del ambiente medida por el termómetro IR MLX90614D.....	33
3.3 Calibración sensor imágenes infrarrojas Flir Lepton 2.5	34
Capítulo 4. Descripción del programa en lenguaje C	37
4.1 Descripción del programa realizado en lenguaje C de la medición calibrada del termómetro IR.....	37
4.2 Descripción del programa realizado en lenguaje C de la medición calibrada de la cámara IR.....	38
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	41
Referencias	45
Anexo A. Códigos de los programas en lenguaje C	49
A1. Rutina para la obtención de la temperatura de un cuerpo calibrada tras la medición con el termómetro IR.....	49
A2. Algoritmo para la obtención de la dependencia lineal entre los valores de los niveles de radiación y temperatura	52

Lista de abreviaturas

IR	Infrarrojo
RP	Raspberry Pi
AV	Anomalías vasculares
MV	Malformaciones vasculares
EE	Espectro electromagnético
LWIR	Infrarrojo de onda larga
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
MD	<i>Master Device</i> – Dispositivo maestro
SD	<i>Slave Device</i> – Dispositivo esclavo
SDA	<i>Serial Data</i> – Datos en serie
SCL / SCLK	<i>Serial Clock</i> – Reloj serial
ACK	<i>Acknowledgement</i> – recibo correcto
NACK	<i>Negative acknowledgement</i> – recibo negativo
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i> – Salida del MD al SD
MISO	<i>Master Input Slave Output</i> – Entrada del MD al SD
CS	<i>Chip Selector</i> – Selector de Chip
IRT	Termómetro infrarrojo
ADC	<i>Analogic-to-Digital Converter</i> – Convertidor analógico-digital
DSP	<i>Digital Signal Procesor</i> – Procesador digital de señales
CP	<i>Computer Board</i> – Placa computadora
T_o	Temperatura de la superficie del objeto

T_o	Temperatura del ambiente
IRC	Cámara infrarroja
IRT1	Termómetro de referencia Extech IR200
IRT2	Termómetro infrarrojo Melexis MLX90614D
IRCM / IM	Salida de la cámara infrarroja
T_{o1}	Temperatura de la superficie del objeto medida por IRT1
T_{a1}	Temperatura del ambiente medida por IRT1
T_{o2}	Temperatura de la superficie del objeto medida por IRT2
T_{a2}	Temperatura del ambiente medida por IRT2
IA	Inteligencia artificial

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y Objetivos del proyecto

Los Sensores Infrarrojos (IR) son cada vez más usados en la actualidad debido a la gran cantidad de aplicaciones que tienen. Éstos permiten conocer la temperatura de un cuerpo que está a una cierta distancia sin la necesidad de establecer contacto físico. Únicamente sabiendo la radiación infrarroja emitida por el objeto medido y su emisividad, se puede conocer cuál es su temperatura debido a la relación existente entre estos parámetros [1]-[2]-[3]. Esta clase de sensores pueden ser utilizados, entre otras cosas, desde la medición de la temperatura de alimentos, materiales, equipos mecánicos o eléctricos hasta para aplicaciones médicas.

Por otro lado, las cámaras infrarrojas permiten visualizar radiación emitida por un objeto a la que el ser humano no es capaz de detectar visualmente. Esto permite identificar y evaluar la gravedad de problemas relacionados con la temperatura, ya que se puede observar su distribución en el objeto de estudio. Una de las principales aplicaciones de estos sensores es la vigilancia [4]-[5], puesto que permite conocer la radiación térmica emitida por cuerpos independientemente de las condiciones de iluminación. Otra de las grandes ramas en las que se está aumentando su uso es en la medicina [6]-[7], ya que permiten detectar la distribución de temperatura de las diferentes partes del cuerpo, identificando donde pueda haber alguna enfermedad/lesión que altere la temperatura de la piel, como pueden ser tumores, problemas articulares o circulatorios entre muchos otros [8]-[9]-[10]-[11]-[12]. Particularmente, debido a la pandemia de COVID-19, este tipo de sensores están siendo desplegados de forma masiva en entornos públicos para controlar la temperatura corporal de la población.

Las cámaras infrarrojas, y los sensores de imagen en general, son muy adecuados para tele-detección dada la gran cantidad de información que pueden manejar y su adecuación natural a entornos dinámicos. El procesado adecuado de estas imágenes permite extraer información relevante de la escena visual, aun cuando las imágenes están mal acondicionadas o son ruidosas. Los sensores de imagen que trabajan en la banda infrarroja detectan radiación en dicha banda. Los niveles de radiación dependen de la temperatura de los objetos [1]-[2]. Si se desean generar imágenes termográficas, es necesario un proceso de calibrado que permita convertir valores de radiación en la banda infrarroja en valores absolutos de temperatura.

El principal objetivo de este trabajo es la calibración de sensores infrarrojos utilizando la plataforma Raspberry Pi (RP) y un termómetro infrarrojo comercial, para su implementación en la medicina dermatológica, en concreto, para la detección y control de anomalías vasculares que provocan alteraciones de temperatura en la piel [13]. El proyecto abarca la elección del termómetro, su montaje, el desarrollo de software específico para leer y procesar sus medidas, así como, el desarrollo de un programa que permita calibrar adecuadamente los niveles de radiación IR medidos con un sensor de imagen infrarrojo comercial, para generar imágenes termográficas a partir de ellos.

Este trabajo se divide en cinco capítulos, en el primero de ellos se explica el planteamiento del problema, los fundamentos físicos en los que se basa el funcionamiento de los sensores IR, los tipos de sensores infrarrojos y la electrónica asociada para la interconexión entre la Raspberry Pi y dichos sensores (cámara IR y termómetro IR). En el capítulo 2, se detalla las características de los sensores IR que se calibran, así como el conexionado y el montaje del sistema. El capítulo 3 se centra en la caracterización experimental y calibrado, donde se exponen las condiciones de medición para la calibración del termómetro comercial IR para poder realizar la conversión entre los niveles de radiación y temperatura. En el capítulo 4 se describe el código en lenguaje C utilizado para la calibración de los valores proporcionados por los sensores IR. Por último, en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones y líneas futuras.

1.2 Planteamiento del problema

Entre investigadores de la Universidad de Sevilla y el Área de Dermatología Pediátrica del Hospital Virgen del Rocío [13] llevan actualmente a cabo un proyecto I+D+i que consiste en un sistema de visión de infrarrojos para la medición precisa en tiempo real de la temperatura corporal en zonas con anomalías vasculares que provocan alteraciones de temperatura en la piel.

Las anomalías vasculares (AV) son difíciles de clasificar y estudiar incluso por los expertos, dado su enorme parecido. Existen dos grandes grupos en la actualidad: malformaciones vasculares (MV) y tumores vasculares (TV) [8]-[9]-[10]-[11]-[12]. La primera de ellas incluye malformaciones de alto y bajo flujo, y el segundo tipo incluye los hemangiomas que son anomalías vasculares muy común en bebés.

Dentro de las MV, es difícil distinguir las de alto y bajo flujo debido a que son muy similares visualmente y no se pueden diferenciar a simple vista. Las de alto flujo son más peligrosas y, causadas por una malformación arteriovenosa, siendo su flujo sanguíneo mayor en su interior, y, por tanto, tienen una temperatura más alta. Las malformaciones de bajo flujo son provocadas por malformaciones venosas y capilares, las cuales tienen un flujo sanguíneo y una temperatura menor.

Tradicionalmente, las anomalías vasculares son clasificadas y diagnosticadas con pruebas médicas basadas en la ecografía Doppler y/o la resonancia magnética. Ambas requieren equipos que no están siempre disponibles durante la primera consulta del paciente, lo cual retrasa su diagnóstico y tampoco proporciona información de la temperatura.

Aunque a simple vista no es posible diferenciar las malformaciones vasculares, el patrón de temperatura de ambas malformaciones es completamente distinto. Por tanto, si se conoce la variación de temperaturas en la zona afectada, se va a poder identificar y diagnosticar adecuadamente al paciente, en una primera visita al especialista.

Por este motivo, han diseñado un sistema [13] compuesto por cámara infrarroja de baja resolución y una cámara en el espectro visible de alta resolución, una pantalla táctil, una batería reemplazable con cuatro horas de autonomía, un termómetro infrarrojo para calibrar las medidas de temperatura y una placa Raspberry Pi que controla todos los periféricos del sistema como se puede ver en Figura 1-1. Todo esto proporciona un sistema de visión compacto, portable y de bajo coste que es capaz de detectar y visualizar las variaciones térmicas de las

malformaciones de $0,1^{\circ}\text{C}$ cubriendo el rango de distancias necesario para la aplicación, de manera rápida en la consulta durante la examinación del paciente sin necesidad de realizar multitudes de pruebas médicas que requieren equipos más complejos y mayores costes.

Este trabajo se centra en la calibración de termómetro IR y la cámara IR para una implementación adecuada de todo el sistema.

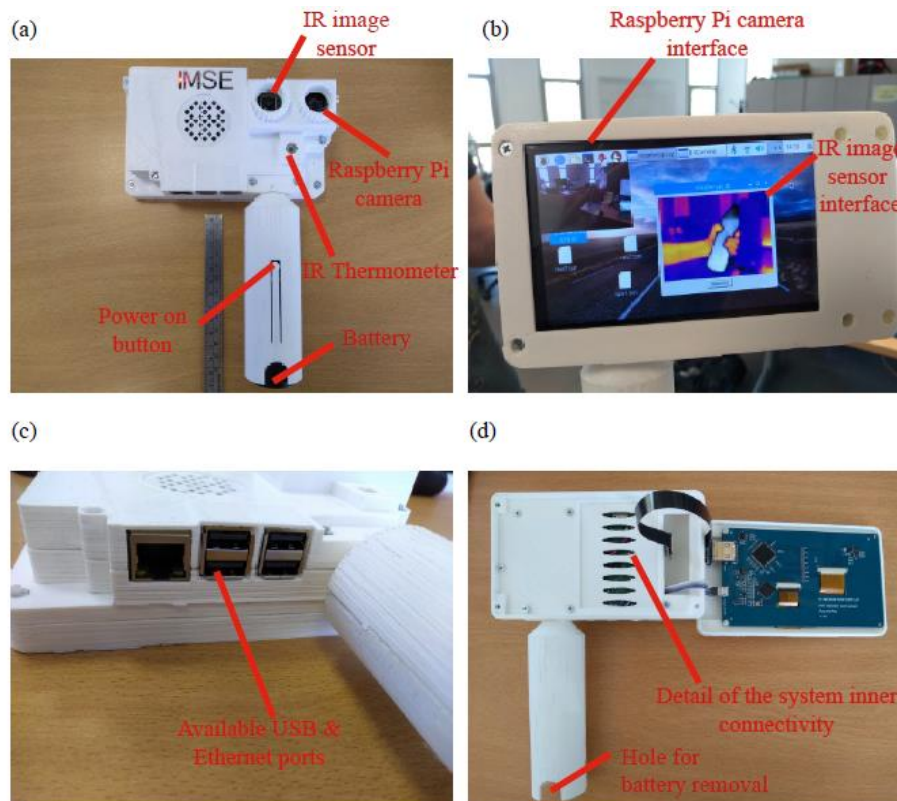


Figura 1-1. Sistema completo. (a) vista frontal del sistema, donde están señalados el termómetro IR, la cámara en el espectro visible, el sensor de imagen IR, la batería y el botón de encendido. (b) vista trasera, donde se visualiza las imágenes que proporciona las dos cámaras (IR, visible). (c) Vista lateral que muestra los puertos USB y de Ethernet disponibles. (d) Vista interior donde se observan los detalles de la conexión interna del sistema [13].

1.3 Principio de operación de los sensores infrarrojos

Para una temperatura por encima del cero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$), un objeto emite un espectro de radiación térmica [1]. A pesar de que, en general, la forma de dicho espectro depende de la composición del mismo, el factor determinante fundamental es la temperatura.

El espectro electromagnético es la radiación electromagnética que emite o absorbe un cuerpo. Al ser un conjunto de ondas electromagnéticas se pueden clasificar en función de su nivel energético, que está relacionado con la longitud de onda mediante la expresión (1.1).

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Donde h es la constante de Planck ($h \approx 6,626069 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), f es la frecuencia asociada a la longitud de onda de la radiación y c es la velocidad de la luz en el vacío ($2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Observando la ecuación (1.2), se puede apreciar que la energía y la longitud de onda de dicha radiación son inversamente proporcionales. Con lo cual, cuanto mayor sea la longitud de onda menor energía va a tener la onda electromagnética.

Aunque un cuerpo emita un espectro continuo de radiación térmica, el ojo humano solo es sensible a la región visible del espectro electromagnético (EE). Incluso a temperaturas muy altas (de varios miles de grados Kelvin), la inmensa mayoría (más del 90%) de la radiación térmica emitida es invisible, empezando por la zona del infrarrojo (IR) del EE. Por lo tanto, a temperatura ambiente la mayoría de los cuerpos son visibles gracias a la luz que reflejan, y no por la radiación que emiten, dado que ésta queda fuera de la región visible del espectro electromagnético.

La clasificación de la radiación electromagnética (EE) se puede apreciar en la Figura 1-2.

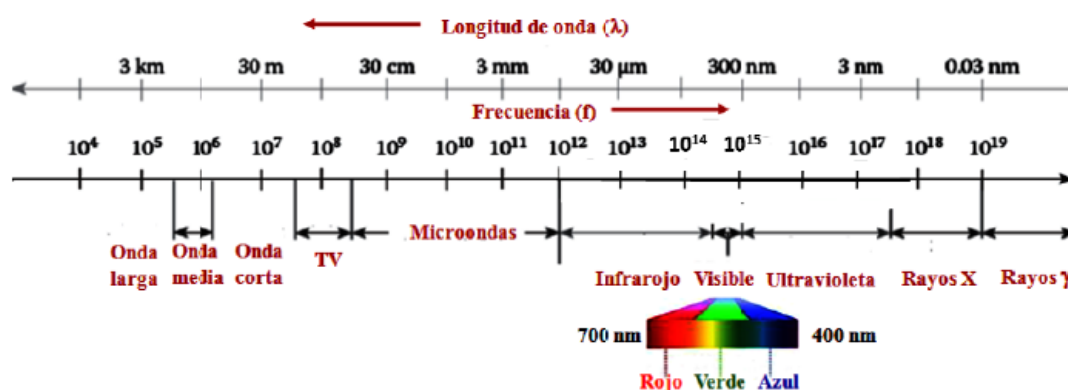


Figura 1-2. Esquema de las regiones del espectro electromagnético.

Como el objeto de este trabajo es calibrar sensores infrarrojos, se analiza la radiación infrarroja (IR), que resulta invisible para nuestros ojos pero estos dispositivos electrónicos son capaces de medir en esta banda de emisión. En concreto, los sensores infrarrojos analizados en

este trabajo son sensibles al infrarrojo de onda larga (LWIR), que es la adecuada para detectar temperaturas por debajo de 100 °C.

La clasificación de las diferentes regiones de emisión infrarroja (IR) se indica en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Clasificación de la radiación infrarroja (IR) [2].

Región	Longitud de onda λ (μm)
Infrarrojo cercano (NIR, <i>near IR</i>)	0,78-1
Infrarrojo de onda corta (SWIR, <i>short wavelength IR</i>)	1-3
Infrarrojo de onda media (MWIR, <i>medium wave IR</i>)	3-4
Infrarrojo de onda larga (LWIR, <i>long wave IR</i>)	6-15
Infrarrojo de onda muy larga (VLWIR, <i>very long wave IR</i>)	15-30
Infrarrojo lejano (FIR, <i>far IR</i>)	30-100

1.3.1 Fundamentos Físicos

A finales del siglo XIX y principios del XX Josef Stefan, Ludwig Edward Boltzmann, Max Planck, Wilhelm Wien y Gustav Kirchhoff establecieron correlaciones cuantitativas y cualitativas para la descripción de la energía infrarroja [1]-[2].

Se puede demostrar, tanto teóricamente como experimentalmente, que hay una clase de cuerpos que emiten espectros térmicos de características generales o universales, que siguen un patrón de radiación térmica común o estándar, y que corresponden a los referidos como cuerpos negros. Se denominan así porque idealmente absorben toda la radiación térmica que incide sobre ellos y por tanto al no reflejar luz, su color para el ojo humano es negro.

Un cuerpo negro ideal absorbe toda la energía electromagnética que recibe, y bajo la hipótesis de que está en equilibrio térmico, la energía que emite debe coincidir con la que absorbe, como establece la ley de Kirchhoff de la radiación térmica (publicada en 1859) [2]. Esta emisión depende exclusivamente de la temperatura del cuerpo, presentando unos patrones característicos.

En 1894, Wilhelm Wien mostró que, una vez conocida la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro para una temperatura dada, podría ser deducida para cualquier otra temperatura. De tal forma que, la distribución espectral $M(\lambda, T)$ dependía del producto de la función de onda por la temperatura (λT) , mediante $M(\lambda, T) = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T)$. Este resultado es conocido como la ley de desplazamiento de Wien, debido a que el máximo de la función $M(\lambda, T)$ se desplaza hacia longitudes de onda más pequeñas a medida que aumenta la temperatura T , que concordaba con los experimentos realizados.

Posteriormente, en 1896, Wien encontró una posible solución de $\varphi(\lambda T) = \exp\left(-\frac{\alpha}{\lambda T}\right)$, siendo α una constante. Sin embargo, esta ley no era correcta para longitudes de onda largas y se proponía para la descripción de todo el espectro de radiación térmica.

Más tarde, en 1900, dicha ley fue sustituida por la ley de Planck, que describe el espectro completo de radiación térmica. Esta ley proporciona la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura T , en función de su longitud de onda λ . Por lo que, una definición de cuerpo negro (ideal) es aquel que, independientemente de su composición, para una misma temperatura emite una radiación térmica con un espectro que viene determinado por la ley de radiación de Planck [1]-[2].

La energía de la radiación térmica de un cuerpo se describe a partir de la energía asociada a cada frecuencia (o en su lugar a la longitud de onda) del espectro de radiación, y se caracteriza por una magnitud denominada radiancia espectral, indicada como $R_T(\nu)$ dada en la ecuación (1.3) [1], o como $M(\lambda, T)$, dada por la expresión (1.4) [2].

$$R_T(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1} d\nu \quad (1.3)$$

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda K_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \text{ W / (cm}^2 \mu\text{m)} \quad (1.4)$$

De forma que $R_T(\nu) d\nu$, o en su lugar $M(\lambda, T) d\lambda$, determina la energía por unidad de tiempo (potencia) emitida en forma de radiación dentro del intervalo de frecuencias $[\nu, \nu + d\nu]$, o en su lugar $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ por unidad de superficie a una temperatura T (en K).

Con esta definición, a la integral de la radiación espectral a lo largo de frecuencias (o en su caso, de longitudes de onda) en el que haya emisión se denomina radiancia total o radiancia R_T , o en su caso $M(T)$.

Donde los símbolos que aparecen en las expresiones (1.3) y (1.4) se definen como:

- λ : longitud de onda.
- T: temperatura del cuerpo negro.
- c: velocidad de la luz ($2,99792458 \cdot 10^8 m/s$).
- K_B : Constante de Boltzmann ($1,3806488(13) \cdot 10^{-23} J/K$).

La ley de Stefan-Boltzmann [1], que se obtuvo experimentalmente por Stefan en 1879 y deducida teóricamente por Boltzmann en 1884, establece que la potencia emitida por unidad de área de un cuerpo negro viene dada por la expresión (1.5).

$$R_T = \sigma \cdot T^4 \quad (1.5)$$

Donde, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ es la llamada constante de Stefan-Boltzmann. Este resultado se puede obtener integrando las ecuaciones (1.3) o (1.4) en todo el rango de frecuencias o longitudes de onda, según corresponda.

Por otro lado, la ley de desplazamiento de Wien [1]-[2] establece que la curva del espectro de radiación se desplaza hacia frecuencias mayores a medida que la temperatura aumenta, de forma que la frecuencia para la que se produce el máximo de la radiación espectral, R_T , es directamente proporcional a la temperatura absoluta T (1.6).

$$\nu_{m\acute{a}x} \propto T \quad (1.6)$$

Si la ley de desplazamiento de Wien se expresa utilizando la longitud de onda (λ), se obtiene que la longitud de onda para la que se produce el máximo de radiancia espectral viene dada por (1.7).

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2897,6 \mu m \cdot K \quad (1.7)$$

donde la constante $2897,6 \mu m \cdot K$ que aparece en (1.7) es conocida como la constante de Wien.

Estas relaciones se pueden deducir a partir de la fórmula de Planck para la radiancia espectral empleando la condición de máximo de la función de la expresión (1.8).

$$\frac{\partial(M(\lambda, T))}{\partial \lambda} = 0 \quad (1.8)$$

Para el caso en el que $h\nu \ll k_B T$, y pasando al límite, las expresiones $R_T(\nu)$ converge hacia el resultado de la física clásica obtenida por Rayleigh-Jeans para la densidad de energía

de radiación de un cuerpo negro [1], válida solo para el rango de frecuencias que cumplan $h\nu < k_B T$,

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3} d\nu \quad (1.9)$$

En la Figura 1-3 se muestra la radiancia espectral de Planck para un cuerpo negro para tres temperaturas diferentes. Como se puede observar, a medida que la temperatura aumenta, la energía radiada aumenta (área bajo la curva) y el máximo de la curva se desplaza hacia la derecha. Como es lógico, en caso de emplear la longitud de onda como magnitud en el eje horizontal, el máximo de la curva de radiancia espectral se desplaza hacia la izquierda a medida que aumenta la temperatura. Por tanto, se puede observar también lo que predice la ley de desplazamiento de Wien.

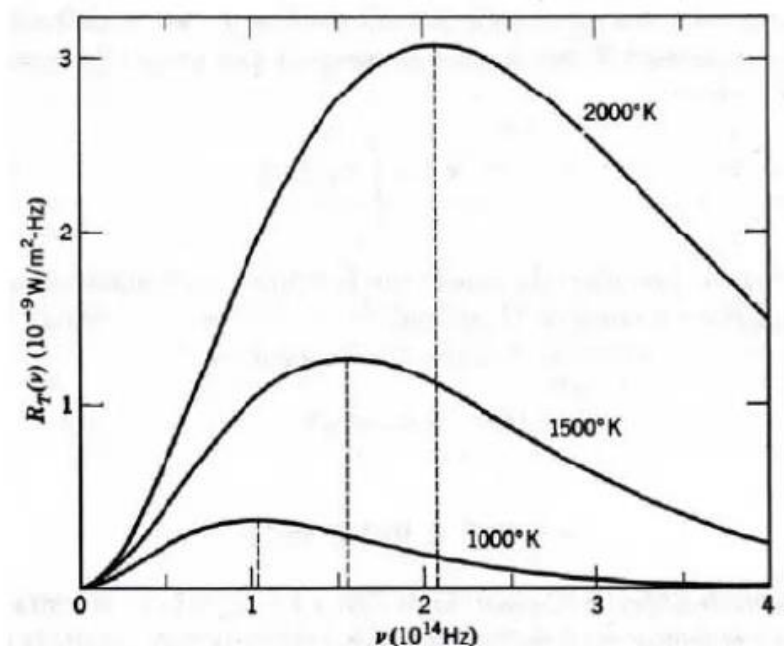


Figura 1-3. Ley de Planck [1].

La curva de radiancia espectral de un cuerpo negro proporciona el límite superior de radiación electromagnética asociada a cada frecuencia del espectro generada por un cuerpo a una temperatura T . La mayoría de las fuentes térmicas no son cuerpos negros ideales, por lo que se suele emplear el término de cuerpo gris [2], que corresponde a un cuerpo cuyo espectro de radiación tiene la misma forma (distribución espectral) que un cuerpo negro que emite radiación a la misma temperatura, pero con una magnitud más reducida. El cociente entre la

radiancia de un cuerpo y la radiancia de un cuerpo negro a la misma temperatura se denomina emitancia o emisividad térmica, ε (1.10), que en general depende de la longitud de onda y de la temperatura.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)_{\text{cuerpo}}}{M(\lambda, T)_{\text{cuerpo_negro}}} \quad (1.10)$$

Para un cuerpo negro perfecto, $\varepsilon = 1$ para todas las longitudes de onda, mientras que la emisividad de un cuerpo gris depende de la longitud de onda, estando su emisividad limitada en el rango $0 < \varepsilon < 1$.

Por lo tanto, la radiación térmica emitida (potencia) por un cuerpo gris (gris, GB) de superficie A cuya temperatura absoluta es T , viene dada por (1.11).

$$R_{TGB} = \varepsilon \cdot R_T \cdot A \quad (1.11)$$

donde R_T es la radiancia térmica que generaría un cuerpo negro a la misma temperatura T , y ε es la emisividad del material que constituye el objeto.

Los sensores infrarrojos detectan la radiación IR en distintas bandas, pero no captan su temperatura. Por tanto, para poder conocer la temperatura del cuerpo, es necesario realizar una conversión entre los niveles de radiación infrarroja y la temperatura absoluta mediante un proceso de calibrado. Para ello, en este trabajo se empleará un termómetro comercial infrarrojo que proporciona la temperatura del cuerpo y se relacionará con los valores suministrados por el sensor de imágenes infrarrojas para poder conocer la temperatura de cualquier punto del objeto de medición.

1.3.2 Tipos de sensores infrarrojos

Un sensor infrarrojo (IR) [2] es aquel que mide la radiación infrarroja emitida por un objeto que se encuentran dentro de su campo de visión y la transforma en una señal eléctrica. Aunque la radiación se puede producir en un rango amplio de frecuencias y está influenciada por la atmósfera, el detector va a filtrar todas las longitudes de onda que estén fuera del rango del espectro de la radiación IR.

Existen dos grandes grupos de detectores de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, los fotónicos (fotodetectores) y los térmicos [2].

El primero de ellos, el fotodetector, está fabricado con semiconductores. La radiación emitida por el cuerpo es absorbida por el semiconductor, generando pares electrón-hueco que producen una corriente si estos se crean en la zona de depleción de la unión PN. Este grupo a su vez se puede subdividir en función de la naturaleza de la radiación o en función de cómo se desarrollen los campos eléctricos o magnéticos. Estos detectores son muy sensibles a las diferentes longitudes de onda incidentes y son más rápidos de respuesta que los detectores térmicos. Sin embargo, requieren un enfriamiento criogénico para aumentar su precisión y disminuir el ruido, debido a que a temperatura ambiente los electrones pueden ser excitados y pasar a la banda de conducción.

Por otro lado, en un detector térmico la radiación incidente es absorbida para cambiar la temperatura del material del detector, y el cambio en alguna propiedad física se utiliza para generar una señal eléctrica. Dicha señal no depende de la naturaleza de la radiación incidente, por lo que los efectos térmicos son generalmente independientes de la longitud de onda, es decir, la señal depende de la potencia radiante pero no de su contenido espectral. Esto ocurre si el cuerpo presenta las características de absorción de un cuerpo negro. Estos detectores no requieren refrigeración, son más fáciles de usar y más baratos, pero su tiempo de respuesta es lento y la velocidad de detención es baja. Dentro de este grupo se encuentra una clasificación según el esquema de funcionamiento, los detectores de bolómetro, piroeléctrico y de termopila.

Como en este trabajo se calibra el termómetro IR MLX90614D [14] y la cámara IR FLIR LEPTON 2.5 [15], se va a especificar con más detalle el principio de operación de la termopila [19] que se corresponde con el termómetro, y del bolómetro porque es el tipo de sensor IR de la cámara, en concreto un micro-bolómetro [16]-[17]-[18].

1.3.2.1 Termopila

La termopila está formada por un conjunto de termopares interconectados entre ellos en serie para aumentar la sensibilidad del dispositivo [19]. Cada termopar está formado por dos materiales termoeléctricos determinados diferentes. Una de las uniones A (fría) se mantiene a una temperatura de referencia conocida, que normalmente suele ser 0 °C, y en la otra unión B (caliente) hay un cuerpo negro que absorbe la radiación IR que le llega, incrementando la temperatura acorde con dicha radiación, denominado este componente termopar de radiación. De tal forma que, al incidir un flujo de radiación IR, ϕ_{rad} , sobre la unión se va a crear una diferencia de potencial que es proporcional a la temperatura a la que se encuentra el cuerpo de

medida. En la Figura 1-4 se muestra la conexión entre la absorción y los dos materiales diferentes.

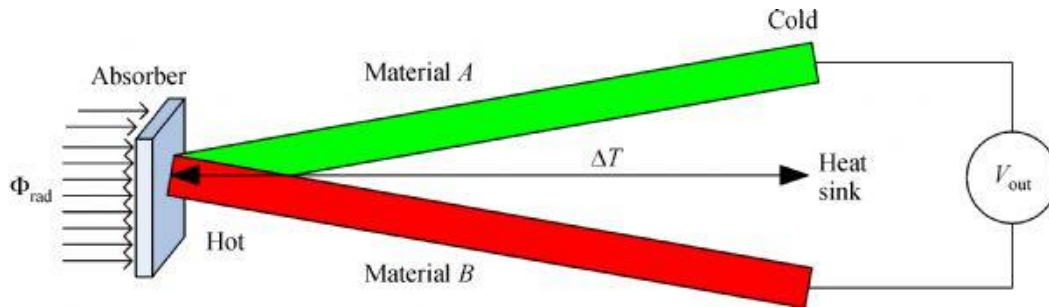


Figura 1-4. Principio de funcionamiento del sensor termoelectrico. Se genera un voltaje de salida V_{out} cuando un flujo de radiación IR (Φ_{rad}) irradia en el sensor [19].

El efecto Seebeck genera una diferencia de potencial entre ambas uniones (la fría y la caliente) viene dado por (1.12).

$$V_{out} = (\alpha_a - \alpha_b) \cdot \Delta T \quad (1.12)$$

Donde α_a y α_b son los coeficientes de Seebeck para los materiales termoelectricos A y B respectivamente, expresados comúnmente en $\mu V/K$.

Como la termopila es un conjunto de termopares conectados en serie, el voltaje generado por el detector IR de la termopila es directamente proporcional al número de termopares, N.

$$V_{out} = N \cdot (\alpha_a - \alpha_b) \cdot \Delta T = (\alpha_a - \alpha_b) \cdot \Delta T_{total} \quad (1.13)$$

Donde ΔT_{total} es la suma de las diferencias de temperatura entre los diferentes termopares.

1.3.2.2 Bolómetro

El bolómetro [16]-[17]-[18] es un dispositivo que se basa en el cambio de una resistencia eléctrica, R, que se produce en ciertos materiales cuando se ve sometido ante variaciones térmicas. Estas resistencias son conocidas como termistores, que pueden ser de tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) o PTC (Positive Temperature Coefficient), que se diferencian en que sus valores aumentan o disminuyen ante un cambio de la temperatura.

Cuando el bolómetro absorbe la radiación IR del cuerpo, se produce un incremento de su temperatura, y esto causa un cambio de resistencia en la estructura. La resistencia del material que forma este dispositivo varía con la temperatura (1.14).

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (1.14)$$

Donde R_0 es la resistencia del material a la temperatura de referencia T_0 , que puede ser la temperatura ambiente o la criogénica, y α es el coeficiente de temperatura de la resistencia dada por (1.15).

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (1.15)$$

Donde dR/dT es la sensibilidad del instrumento. Posteriormente, las variaciones en la resistencia deben ser medidas con la circuitería apropiada, como podría ser un puente de Wheatstone.

En el caso del sensor de imágenes térmicas es un sensor micro-bolómetro, que típicamente se construyen usando óxido de vanadio (VOx), que es un material eléctricamente conductor, o de silicio amorfo (a-Si). Opera de la misma forma que el bolómetro cuando incide radiación infrarroja de onda larga (LWIR) sobre el sensor. Un ejemplo de la estructura del micro-bolómetro se muestra en la Figura 1-5.

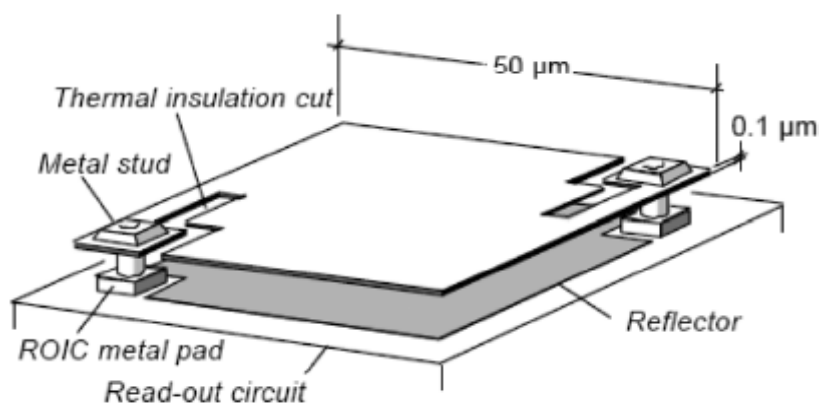


Figura 1-5. Ejemplo de la estructura de un micro-bolómetro [18].

Una vez introducidos los principios de funcionamiento de los sensores IR, los fundamentos físicos en los que se apoya y el tipo de sensor que es el termómetro IR y la cámara IR, se pasa a los fundamentos electrónicos en los que se basa la comunicación entre los sensores y la plataforma Raspberry Pi para el control y la visualización de las operaciones.

1.4 Protocolos de comunicación entre los sensores IR y la Raspberry Pi

Ya que los circuitos integrados suelen implementar una operación de sensado o procesado de la información (o ambas, si el sensor se integra con un procesador digital) con el fin de realizar una función concreta, suele ser necesario comunicar dos o más dispositivos entre ellos, garantizando la integridad de la información, ya que la pérdida o degradación de esta podría suponer el mal funcionamiento del sistema completo.

Para que esto sea posible se utilizan dos protocolos de comunicación, el protocolo denominado *Inter-Integrated Circuit* (I2C) [21]-[24]-[14] y el *Serial Peripheral Interface* (SPI) [22]-[25]-[26] para garantizar la comunicación entre la placa Raspberry Pi y los sensores IR. El termómetro IR que se utilizará, usa la comunicación I2C, mientras que la cámara IR emplea el protocolo I2C como interfaz de control y la comunicación SPI para enviar la señal de video.

1.4.1 Protocolo de comunicación I2C

En este protocolo se utilizan dos líneas de comunicación. Una denominada *Serial Data* (SDA), que es la línea de datos serie semidireccional gobernada por el emisor y otra de reloj, *Serial Clock* (SCL), que es la señal de sincronía. Esta última línea es la vía por donde viaja la señal de reloj, la cual sirve para coordinar las acciones de varios circuitos.

Los dispositivos conectados a través del protocolo I2C pueden actuar como *master device* o dispositivo maestro (MD), o como *slave device* o dispositivo esclavo (SD).

El dispositivo que actúa como MD es siempre el que maneja la línea de reloj SCL. Por otro lado, los SDs son los dispositivos que responden al MD. Un SD no puede iniciar una transferencia de datos a través del bus I2C, debido a que solo el MD puede realizar dicha acción. Generalmente, suele haber un único MD y varios SDs.

En el caso de este trabajo, la Raspberry Pi actúa como el MD y los SDs son el termómetro de infrarrojo sin contacto y la cámara infrarroja.

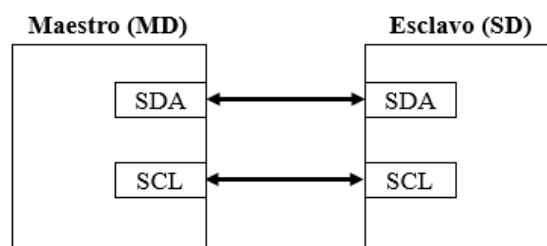


Figura 1-6. Líneas de comunicación entre el dispositivo maestro (MD) y el esclavo (SD).

Este protocolo envía información a través de una sola vía de comunicación y es enviada bit por bit de forma síncrona, lo cual significa que el envío de bits por la vía de comunicación SDA está sincronizado por una señal de reloj que comparten tanto el MD como los SDs a través de la línea SCL, como se muestra en el esquema de la Figura 1-6.

Con I2C la información viaja en mensajes, que van divididos en tramas de datos. De tal forma que, la primera de ellas transporta la binaria del SD al que va dirigido el mensaje, y una o más tramas que llevan la información del mensaje. Los SDs nunca inician la transferencia. Pero, tanto el MD como el SD puede transferir datos a través de este protocolo de comunicación, siendo la transferencia siempre controlada por el MD.

A continuación, se detalla el tipo de información que se intercambia entre el maestro y el esclavo en el protocolo I2C, mostrándose un esquema de los pasos realizados en la Figura 1-7.

Mensaje								
Start	7 o 10 Bits	Bit para Leer/ escribir	Bit para reconocer ACK/ NACK	8 Bits	Bit para reconocer ACK/ NACK	8 Bits	Bit para reconocer ACK/ NACK	Stop
Condición de inicio	Dirección			Transporte información		Transporte información		Condición de paro

Figura 1-7. Pasos realizados para la transmisión de la información entre el MD y el SD.

1. Se envía una señal para informar de que empieza la comunicación. En reposo, las líneas SDA y SCL permanecen a nivel alto. De forma natural, SDA solo cambia cuando SCL está a nivel bajo. La condición de inicio es que SDA cambie a nivel bajo antes de SCL, como se muestra en Figura 1-8.

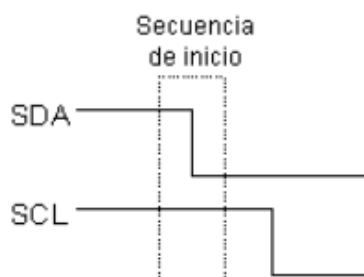


Figura 1-8. Condición de inicio de la comunicación entre el MD y el SD.

2. Los primeros 7 o 10 bits del mensaje hacen referencia a la dirección del SD al que el MD manda el dato. Esta sección es enviada a cada SD y va a identificar al SD con el que el MD se quiere comunicar. Así pues, cada SD compara la dirección recibida por el MD con la suya propia.
3. El siguiente bit (R/W) indica si se trata de escritura (0, el MD envía información al SD) o lectura (1, el MD solicita información al SD).
4. Seguidamente, el SD confirma la transmisión correcta de datos (acknowledge). En el instante en el que se envía la trama, si fue recibida con éxito, se retorna un byte ACK al remitente. En otro caso, si la información no fue entregada correctamente, se retorna un bit NACK (no-acknowledge), de forma que se envían los paquetes de datos recibiendo un ACK por cada byte.
5. Si el dato que se quiere transmitir es mayor de 8 bits, se repite el proceso con los ACK's correspondientes hasta que finalice su transferencia.
6. Por último, para concluir la transmisión de la información, el MD envía al SD la condición de paro (Stop) con un nivel alto en la vía SDA, cuando cambia el estado de SCL a Alto.

1.4.2 Protocolo de comunicación SPI

El protocolo de comunicación SPI es el utilizado por la cámara IR y la Raspberry Pi para enviar su flujo de vídeo.

En este protocolo se utilizan 4 líneas de comunicación (Figura 1-9). Siendo un protocolo MD-SD que permite controlar varios periféricos con un único bus. Las cuatro señales utilizadas para la comunicación se describen a continuación.

- **SCLK** (*Serial Clock - Reloj Serial*): es la señal de reloj que genera el MD empleada para sincronizar la transferencia de los datos.
- **MOSI** (*Master Output Slave Input – Salida del Maestro Entrada del Esclavo*): esta línea es utilizada para la transferencia de la información del MD al SD. De tal forma que, en el caso de haber varios esclavos, todos deben estar conectados para que el maestro se comunique con todos a través de una única línea.
- **MISO** (*Master Input Slave Output – Entrada del Maestro Salida del Esclavo*): línea para la transmisión de datos del SD al MD. En el caso de varios SDs, todos ellos deben estar conectados a la misma línea para que el MD reciba toda la información a través de una sola señal.

- **CS (Chip Selector – Selector de Chip):** es la línea de selección del SD gestionada por el MD. El MD utiliza esta línea para seleccionar el SD con el que se quiere comunicar, ya que cada SD tiene su propia entrada, pero el MD tiene una salida para todos ellos.

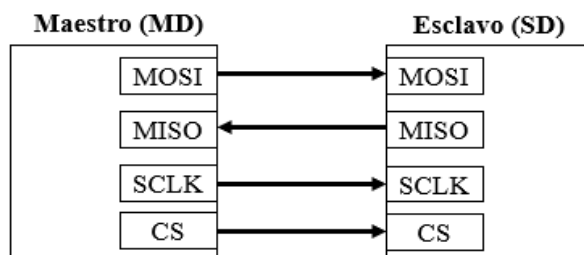


Figura 1-9. Líneas de comunicación entre el dispositivo maestro (MD) y el esclavo (SD) SPI

A continuación, se describe cómo se realiza la transmisión de la información entre el SD y el MD, mostrándose un ejemplo en la Figura 1-10.

1. Inicialmente el MD tiene todas las líneas CS en estado alto. De modo que pone a nivel bajo la línea CS del correspondiente SD con el que el MD quiere intercambiar información, manteniendo las salidas de los demás SDs a nivel alto.
2. El MD activa la señal de reloj (SCLK) simétrica y con una frecuencia que se ajuste a la velocidad de transmisión deseada.
3. El MD escribirá un bit en cada ciclo de reloj en la línea MOSI, y leerá un bit de la MISO. Mientras que, simultáneamente el SD escribirá un bit en cada ciclo de reloj en la línea MISO, y leerá un bit de la MOSI.
4. En el momento en el que todos los bits hayan sido transferidos en ambos sentidos, el MD deshabilita el reloj de comunicación.
5. Por último, el MD pondrá la línea CS a nivel alto para indicar que la transferencia de información con el SD ha finalizado.

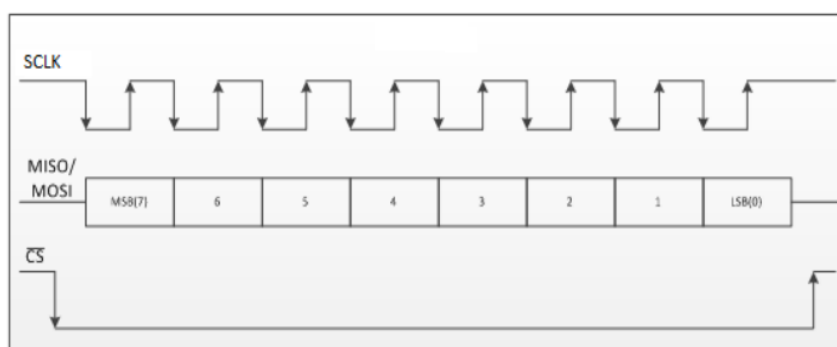


Figura 1-10. Ejemplo de transmisión de información SPI

Capítulo 2

Descripción del sistema

En este capítulo describe el sistema formado por la Raspberry Pi y los dos sensores infrarrojos que se disponen a calibrar, así como su conexionado y una descripción detallada de cada sensor.

2.1 Diagrama de bloques

El sistema que se utiliza para la parte de la calibración de los sensores IR de imágenes y de temperatura se muestra en Figura 2-1, donde se observa cómo es el flujo de datos entre los diferentes elementos que forman el sistema. La plataforma Raspberry Pi [23], modelo 3 B+ es el dispositivo principal que se encarga de controlar y leer los sensores, el termómetro IR Melexis [14] y la cámara IR FLIR Lepton [15], para procesar la información y representarla por pantalla. La placa está conectada a la fuente de alimentación a través de un puerto micro-USB que a su vez les suministra la energía necesaria a los sensores para su funcionamiento. Para poder visualizar y controlar el sistema es necesario un monitor que está enlazado a la placa mediante un cable HDMI que tiene su propia fuente de alimentación, un ratón de ordenador y un teclado conectados a través de los puertos USB de la placa.

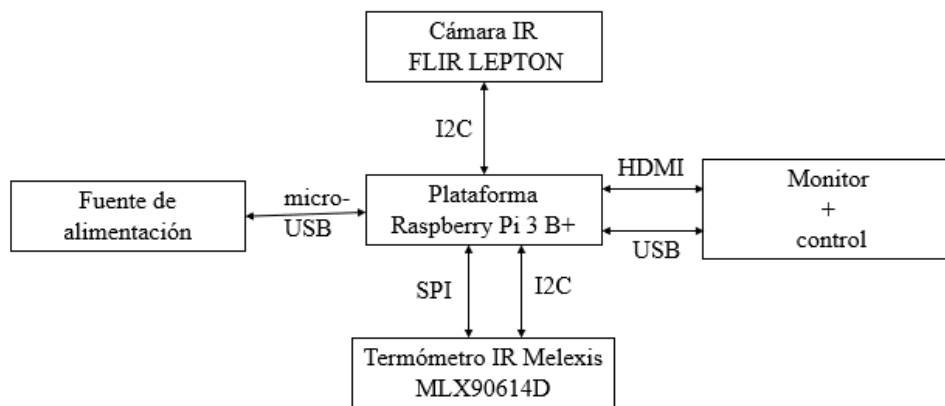


Figura 2-1. Diagrama de bloques entre los componentes del sistema.

2.2 Sensor de temperatura IR

El sensor de temperatura infrarrojo comercial que se calibra para poder conocer la conversión entre niveles de radiación y temperatura es el termómetro IR Melexis modelo MLX90614D (*InfraRed thermometer for noncontact temperature measurements*) [14]. Este dispositivo está diseñado para conectarlo a un procesador, que en este caso es la placa de desarrollo Raspberry Pi (CP, *computer board o placa computadora*) [23] para medir la temperatura de un objeto a distancia.



Figura 2-2. Termómetro IR MLX90614D

El termómetro (IRT) en cada medida proporciona tanto la temperatura de la superficie del objeto (T_o) a medir como la temperatura ambiente (T_a). Tiene una precisión (la estándar según el fabricante [14]) de 0,5 °C (o la versión médica de 0,2 °C, en un rango limitado de temperatura que tiene que estar alrededor de la del cuerpo humano) para un rango de

funcionamiento entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura ambiente, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura del objeto, con una resolución de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, un nivel de ruido en la medida de $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ RMS y un tiempo de respuesta o establecimiento (*settling time*) de $0,65$ segundos. El dispositivo incorpora un filtrado para el ruido de medida, un convertidor analógico-digital (*Analogic-to-Digital Converter*, ADC) de 17 bits y un procesador digital de señales (*Digital Signal Processor*, DSP) incorporado en la unidad de procesamiento digital MLX90302.

El protocolo de comunicación empleado entre el termómetro IR y la plataforma Raspberry Pi es el BUS I2C (Sección 1.4.1). En este caso, el IRT solo puede actuar como dispositivo esclavo (SD) y la placa Raspberry Pi como dispositivo maestro (MD). La línea de comunicación SDA proporciona en todo momento la información de la temperatura del objeto al MD cuando es solicitada por el usuario.

2.3 Sensor de imágenes IR

El sensor de imágenes infrarrojas que se emplea para el control y clasificación de las anomalías vasculares en los niños es la cámara infrarroja FLIR LEPTON modelo 2.5 [15], 80×60 , la cual es instalada en la placa Raspberry Pi. Este dispositivo está diseñado para la captación de la radiación infrarroja de onda larga (de $8\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$) produciendo una imagen térmica uniforme.

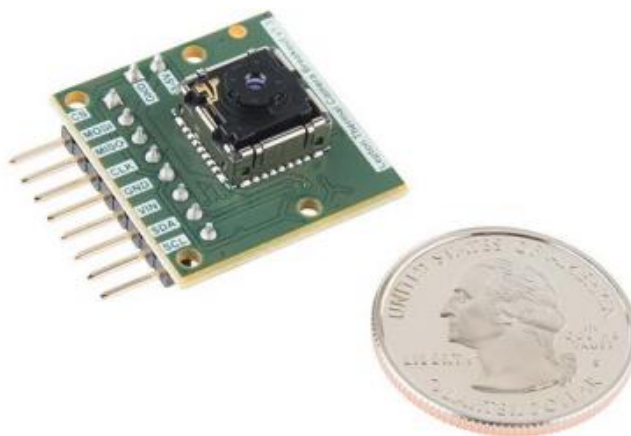


Figura 2-3. Sensor de imágenes IR FLIR LEPTON [22].

Esta cámara IR (IRC) proporciona una imagen independientemente de la temperatura de la IRC en forma de matriz de celdas, puntos o píxeles de dimensión 80×60 con información sobre la radiación IR captada en cada celda o punto por la cámara. El tamaño de cada píxel es $17\text{ }\mu\text{m}$ y el rango de temperatura óptimo está entre -10 y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. El dispositivo tiene un campo de visión (FOV, *field of view*) horizontal de 51 ° , mientras que el diagonal es de $63,5\text{ }^{\circ}$. En la

Tabla 2-1 se muestran otras especificaciones adicionales del sensor [15].

Tabla 2-1. Especificaciones adicionales de la cámara IR.

Frecuencia de imagen efectiva	8,6 Hz
Sensibilidad térmica	<50 mK (0,050 °C)
Rango dinámico de escena (típico a temperatura ambiente)	Modo de ganancia alta: De -10 a 140 °C Modo de ganancia baja: De -10 a 450 °C
Precisión radiométrica (Típica a temperatura ambiente)	Ganancia alta: Mayor de ± 5 °C o 5 % Ganancia baja: Mayor de ± 10 °C o 10 %
Disipación de potencia (típico a temperatura ambiente)	150 mW (funcionamiento), 650 mW (durante obturación), 4 mW (en espera)
Dimensiones del paquete	11,5 × 12,7 × 6,835 mm
Peso	0,9 g

En la Figura 2-3 se puede apreciar el tamaño pequeño del sensor IR comparándolo con una moneda. Esto hace posible la construcción de un sistema compacto y ligero con necesidad de menos consumo y tiene una mayor amplitud de aplicaciones.

Para la comunicación entre el sensor IR y la plataforma Raspberry Pi (RP) se emplean dos protocolos de comunicación (I2C y SPI). Siendo siempre en cada uno de ellos la cámara IR el dispositivo esclavo (SD) y la placa RP el dispositivo maestro (MD). Esto hace posible modificar su configuración sin necesidad de interrumpir la toma de imágenes a través de dos protocolos distintos.

El bus I2C proporciona un interfaz de mando y control, mientras que el SPI permite la transferencia eficiente y verificable de video. En el caso del canal SPI, la línea MOSI no es utilizada debido a que solo se va a transferir información del MD al SD, por tanto, debe ser conectada a GND o puesta a nivel bajo. De forma que el esquema de las vías de comunicación entre el sensor IR y la RP se muestra en Figura 2-4.

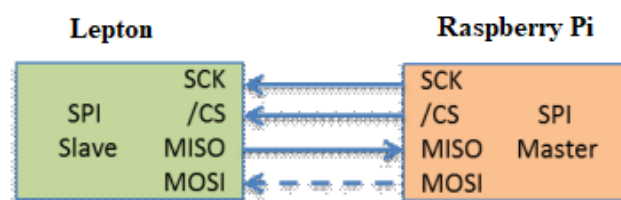


Figura 2-4. Líneas de comunicación empleadas entre la cámara IR y la Raspberry Pi [22].

2.4 Conexión entre los sensores IR y la plataforma Raspberry Pi

En esta sección se va a explicar el conexionado físico entre los sensores IR y la plataforma Raspberry Pi (RP) a través de sus protocolos de comunicación.

La plataforma Raspberry Pi [23] contiene unos pines en la parte lateral, que son unos conectores de entrada-salida de propósito general (GPIO). Es un puerto de 26 pines con dos filas de 13 conectores espaciados 2,54 mm. La numeración de estos pines está dividida en dos filas, la fila inferior toma los números impares y la superior los pares como se puede apreciar en la Figura 2-5. De tal forma que se conectan los sensores IR a los pines específicos para establecer su comunicación con la RP a través de sus respectivos protocolos.

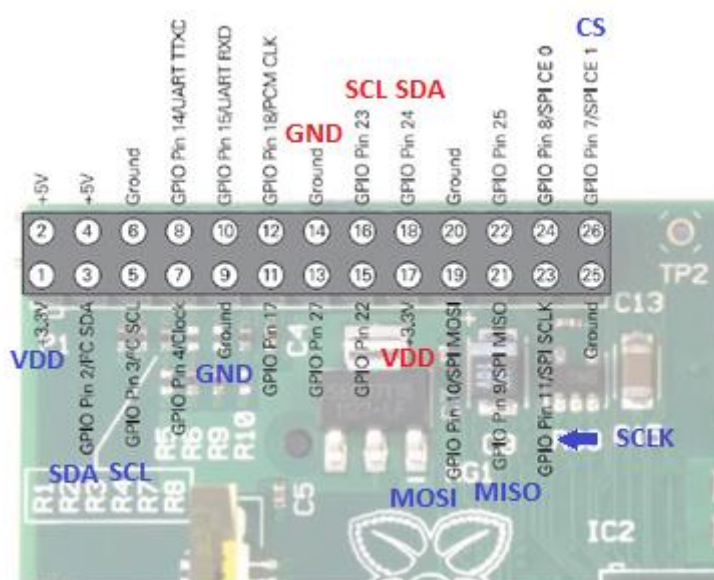


Figura 2-5. El piout de la Raspberry Pi. Señaladas las conexiones con el termómetro IR en rojo y la unión con la cámara IR en azul.

El protocolo de comunicación entre los sensores IR y la plataforma Raspberry Pi es I2C. El bus I2C se puede acceder sobre los pines 16 y 18, los cuales proporcionan la señal SDA y la señal SCL respectivamente. Además, este sensor se alimenta desde la Raspberry Pi mediante los pines GND (14) y 3.3 V (17) como se observa en Figura 2-5.

El esquema del montaje entre el termómetro MLX90614D y la placa es el que se muestra en la Figura 2-6.

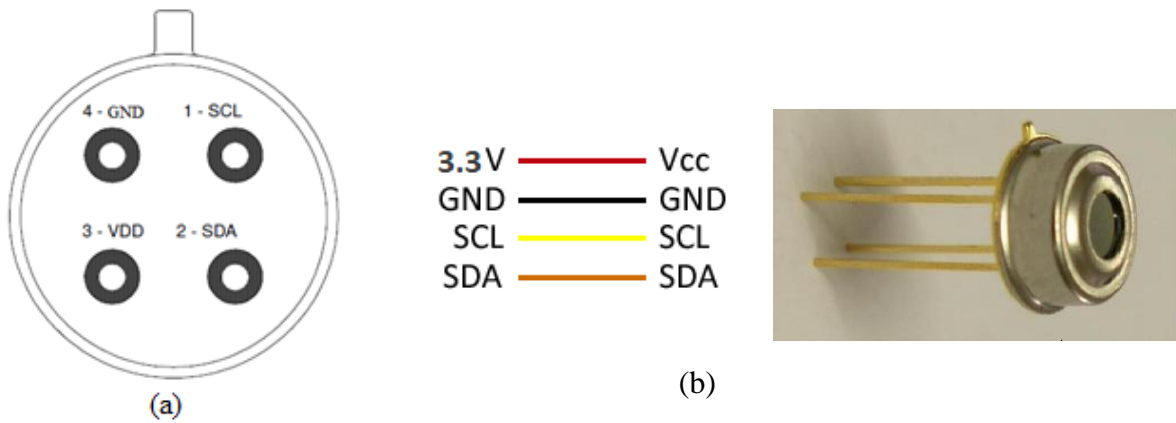


Figura 2-6. Esquema montaje termómetro IR Melexis MLX90614D. En (a) se observa la vista trasera del termómetro, la cual proporciona la descripción de sus pines. En (b) se muestra una imagen del termómetro IR [14].

Por otro lado, la cámara IR utiliza la comunicación SPI para enviar la señal de video y usa el protocolo de comunicación I2C como interfaz de control.

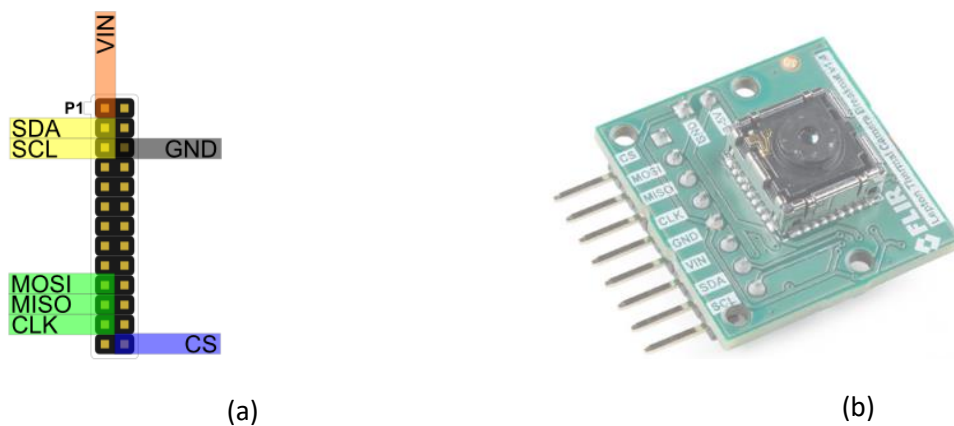


Figura 2-7. Esquema montaje cámara infrarroja Flir Lepton 2.5. En (a) se visualizan los pines que hay que interconectar para la comunicación con la Raspberry Pi y en (b) una imagen de la cámara IR [25].

El sensor IR se alimenta a través de la placa mediante los pines GND (pin 9) y 3.3V (pin 1). Para la parte de la comunicación I2C, se conecta los pines del sensor SCL y SDA a los pines de la Raspberry Pi correspondientes, 3 y 5 respectivamente. Por otro lado, para que se lleve a cabo la comunicación SPI se une el pin MOSI al pin 19 de la placa, el MISO al 21, el SCLK al 23 y el CS al 26, como se muestra en las Figura 2-5 y Figura 2-7.

Capítulo 3

Caracterización experimental y calibrado

En el presente capítulo se desarrolla la caracterización experimental y calibrado de los sensores infrarrojos, con el fin de establecer una relación entre las salidas del termómetro infrarrojo y del sensor térmico de imágenes.

Se dispone de un termómetro infrarrojo (IRT) que se va a usar como patrón o base de medidas de referencia. Este es el Extech IR200 (*Non-Contact Forehead InfraRed Thermometer*) [20], y se va a indicar como IRT1. Este termómetro está diseñado para explorar grupos de individuos o monitorear a un individuo por alta temperatura corporal de forma rápida y sin contacto. Este IRT dispone de dos modos posibles para realizar la medición, el cual se puede seleccionar moviendo el interruptor Cuerpo/Superficie a la posición deseada, siendo el tiempo de medida para ambas funciones de 0,5 segundos. Este termómetro IR Extech IR200 utilizado de referencia se puede ver en Figura 3-1.



Figura 3-1. Termómetro de referencia, Extech IR200 [20].

En el modo “cuerpo” (para medir la temperatura corporal) el IRT tiene una exactitud de 0,3°C cuando se miden temperaturas de la piel entre 32 y 42,5 °C. De tal forma que si la temperatura sobrepasa alguno de estos dos límites el aparato lo indica. El otro modo, “superficie”, se utiliza para la medición de temperaturas de la superficie sin contacto de 0 a 60

°C con una precisión de 0,8 °C. Para que la medición sea óptima, hay que situar el IRT a una distancia entre 5 y 15 cm de la superficie cuya temperatura se quiere medir, proporcionando una resolución de 0,1 °C. En el caso en el que el IRT cambie de ubicación y hubiese un cambio térmico en el ambiente, se debe esperar al menos 20 minutos para que se produzca el equilibrio térmico necesario para la toma de medidas precisas.

Se tiene un segundo IRT, el MLX90614D (*Infra Red thermometer for noncontact temperature measurements*) [14], que se va a indicar en lo que sigue como IRT2 y sus especificaciones se encuentran en la Sección 2.2.

Tanto IRT1 como IRT2 vienen calibrados de fábrica según indican sus respectivos fabricantes. Sin embargo, es necesario calibrar el termómetro de infrarrojo para realizar las medidas con la mayor precisión posible y para minimizar los errores que se cometen.

Como tercer sensor infrarrojo se dispone de una cámara infrarroja (IRC), Flir modelo Lepton 2.5, 80 x 60 [15], cuyas especificaciones se encuentran en la Sección 2.3.

El objetivo es combinar las medidas proporcionadas por IRC (IRCM) con las medidas del IRT2 (T_o y T_a) para estimar la temperatura de cada píxel de la matriz de puntos obtenida por la IRC.

Para calibrar el IRT2 en el rango de temperaturas acotado al funcionamiento del IRT1, se hace un estudio experimental, obteniendo la función de ajuste, así como la estimación del error de medida.

Una vez calibrada la IRT2, el sistema compuesto por la IRC y la Raspberry Pi con el IRT2 (junto con el programa desarrollado en lenguaje C que se ejecuta en la memoria EEPROM de la PB) se pueden utilizar para estimar la temperatura de cada celda en la que se divide una imagen de la que la IRC ha tomado una medida, y así se puede usar ésta como ayuda de detección de anomalías vasculares en niños.

3.1 Montaje y condiciones de la calibración

Las condiciones y los instrumentos utilizados para la calibración del sensor infrarrojo de temperatura se muestran en la Figura 3-2, describiendo por separado la función de cada elemento empleado para su calibración.

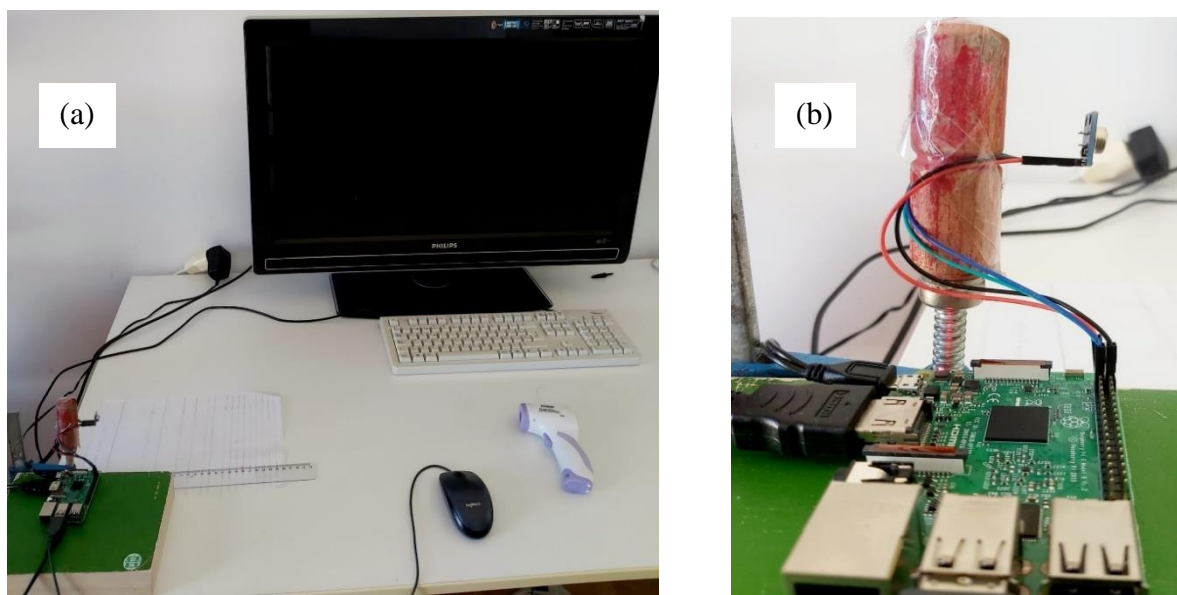


Figura 3-2. Condiciones de medición para la calibración del termómetro IR, donde aparecen todos los instrumentos utilizados.

- Herramienta para la fijación del termómetro a una posición que se muestra en la Figura 3-2 (b).
- Regla para poder saber a qué distancia se está realizando la medición y una superficie vertical para mantener el termómetro apuntando hacia la zona de medida.
- El termómetro IR Melexis MLX90614D conectado a la Raspberry Pi mediante el protocolo de comunicación I2C. La interconexión entre estos elementos se muestra más detalladamente en la Figura 3-3.

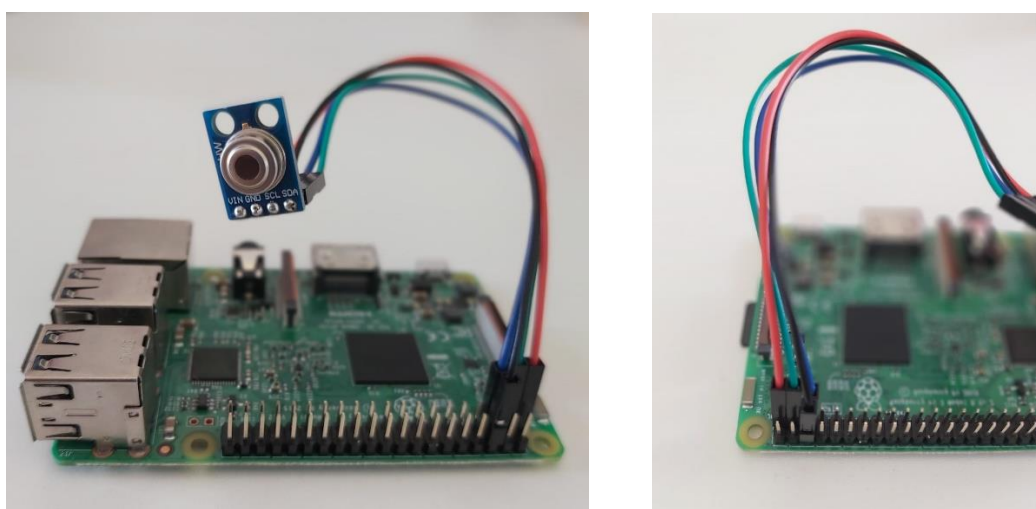


Figura 3-3. Interconexión entre el termómetro IR y la Raspberry Pi.

- Las Raspberry Pi conectada al monitor mediante un cable HDMI, con un ratón y un teclado para poder manejar los comandos, enlazados por USB y conectado todo a una fuente de alimentación a través del puerto micro-USB.

3.2 Procedimiento calibración termómetro IR

Se expone en este apartado el procedimiento seguido para realizar la toma de datos de la calibración del termómetro IR Melexis MLX90614D (IRT2).

Para realizar adecuadamente la medición de las temperaturas con los dos termómetros IR que se utilizan (IRT1 y IRT2), hay que tener en cuenta que estén bien orientados hacia la superficie que se quiere medir, sin estar cerca de ningún objeto/dispositivo que pudiera alterar la temperatura de dicha superficie.

Inicialmente, se elige una superficie de temperatura uniforme, por ejemplo, la cara palmar o dorsal de la mano, sobre la que se toma la temperatura.

Se realizan mediciones de la superficie para diferentes distancias, a fin de obtener el rango óptimo de distancia de medición del IRT2; de forma que suministre los valores de temperatura adecuados en ese rango tras haber finalizado la calibración.

Tras haber elegido una superficie adecuada, se realiza una medición de la temperatura con el IRT2, el cual proporciona tanto T_{a2} (temperatura ambiente medida por IRT2) como T_{o2} (temperatura superficie medida por IRT2) a una distancia dada. En el instante posterior a esta medición, se toma la temperatura de la misma superficie con el IRT1 (T_{o1}), que muestra únicamente la temperatura del objeto que apunta. Por tanto, se realiza también con el IRT1 la toma de la temperatura ambiente (T_{a1}).

Una vez conocidos los dos pares de datos (T_{a2} , T_{o2}) y (T_{a1} , T_{o1}), se calcula la diferencia entre T_{o2} y T_{o1} , obteniéndose el error cometido en la medición de la superficie por IRT2 con respecto al IRT1 (la referencia para la calibración). Del mismo modo, se realiza la diferencia entre T_{a2} y T_{a1} para conocer el error cometido por IRT2 en la medida de la temperatura ambiente.

Este procedimiento se repite 6 veces para cada distancia de medición. El número de repeticiones para la obtención de la temperatura para una misma distancia se ha elegido observando el comportamiento poco dispersivo de dichos valores (Figura 3-4 y Figura 3-5). Por otro lado, la distancia solo es necesario variarla para realizar la medida de las temperaturas

con IRT2, debido a que IRT1 realiza la toma de la temperatura de manera óptima en el rango 5-15 cm.

Interesa guardar una distancia prudencial a la piel del paciente, apuntar bien con el termómetro y estar dentro del rango de distancias que recomienda el fabricante [14]. Por ello, se ha elegido calibrar el IRT2 en un rango entre 6 y 30 cm (tomando valores enteros). Por tanto, cada la obtención de 6 pares de medidas por cada termómetro IR, se varía la distancia. De esta forma se adquieren 25 pares de errores (error de la T_{a2} y de la T_{o2}).

El objetivo de esta calibración es ver cómo varía el error cometido por IRT2 al medir las T_{a2} (temperatura ambiente medida por el sensor IR) y T_{o2} (temperatura de la superficie proporcionada por el sensor IR) con la distancia de medición. Dicho comportamiento se observa para T_{o2} en la Figura 3-4 y para T_{a2} en la Figura 3-5. En ambas figuras se ha representado el valor absoluto del error frente a la distancia.

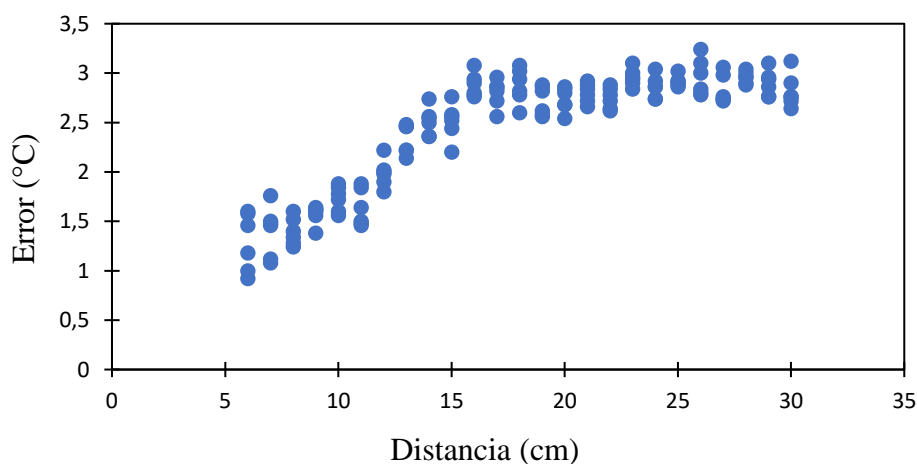


Figura 3-4. Representación gráfica del error de la temperatura de la superficie medida por IRT2 (termómetro IR) respecto IRT1 (termómetro de referencia).

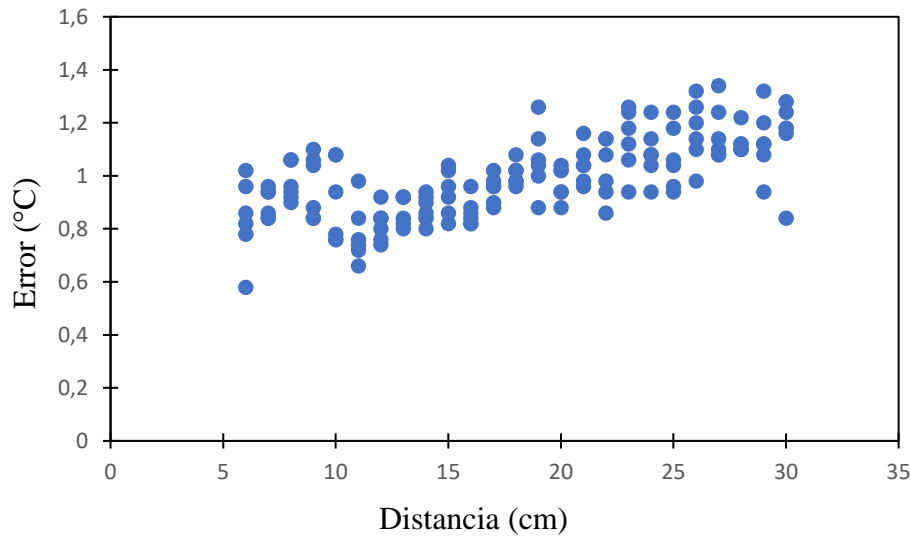


Figura 3-5. Representación gráfica de la variación del error de la temperatura del ambiente medida por IRT2 (termómetro IR) respecto IRT1 (termómetro de referencia) frente a la distancia de medición.

Hay diferentes factores que pueden alterar las medidas como pueden ser los dispositivos electrónicos cerca del termómetro, ya que proporcionan radiación adicional que modifican el dato. A pesar de que se intentó alejar lo máximo posible el termómetro de dichos aparatos, hay limitaciones debido a la longitud de los cables que interconectan los elementos del dispositivo global (Raspberry Pi, termómetro IR, monitor, fuente de alimentación). Por tanto, tanto la Raspberry Pi como el monitor proporcionan un calor adicional que puede afectar los valores de las temperaturas obtenidas por IRT2. Además, también hay que tener en cuenta el nivel de ruido en cada medida como especifica cada fabricante

En las siguientes secciones se explica los posibles métodos para calibrar la temperatura de la superficie y la del ambiente de trabajo, obtenidas por el termómetro infrarrojo MLX90614D.

3.2.1 Calibración de la temperatura de la superficie medida por el termómetro IR MLX90614D

Si se observa el comportamiento que sigue el error de la temperatura de la superficie medida por el termómetro IR en la Figura 3-4, se puede apreciar que la dispersión de los valores para una misma medida no es muy grande, ya que el valor máximo es 0,68 °C. Por tanto, si se hace una media aritmética de todos los errores adquiridos para cada distancia se obtiene la siguiente gráfica que se muestra en la Figura 3-6.

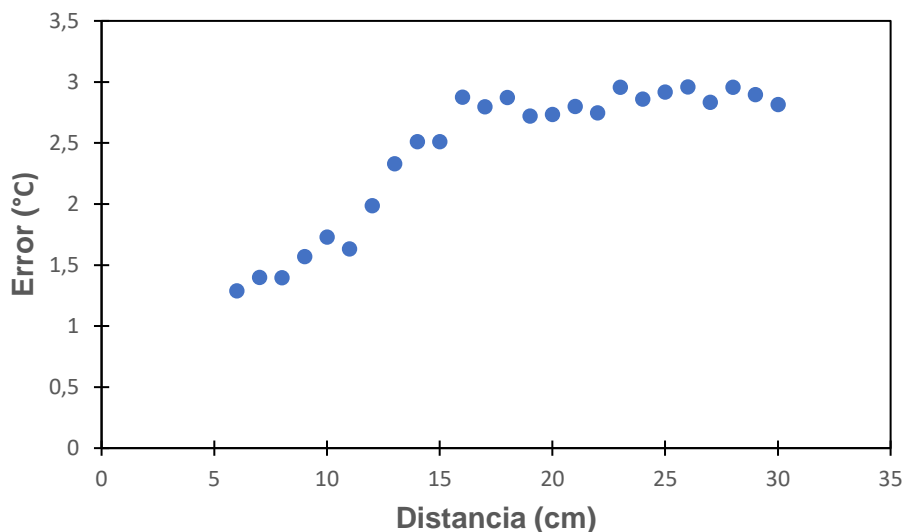


Figura 3-6. Representación gráfica del error medio para cada distancia de la temperatura de la superficie medida por IRT2 (termómetro IR) respecto IRT1 (termómetro de referencia).

El primer método para la obtención de la temperatura de la superficie correctamente por el IRT consiste en tener en cuenta el error medio para cada distancia experimentalmente. De esta forma, el usuario que utiliza dicho termómetro sabe el error para una distancia de valores enteros entre 6 y 30 cm.

El IRT2 obtiene una temperatura de la superficie menor que el IRT1, es decir, para saber la T_{o2} correcta hay que sumarle el error cometido por IRT2 en la medición.

Por otra parte, el segundo método posible para tener la medida de T_{o2} calibrada es realizar un ajuste de los datos experimentales mediante una curva. La mejor curva de ajuste se calcula con la función “polyfit” del programa *Matlab*, obteniéndose una de segundo orden como la que se muestra en la figura Figura 3-7.

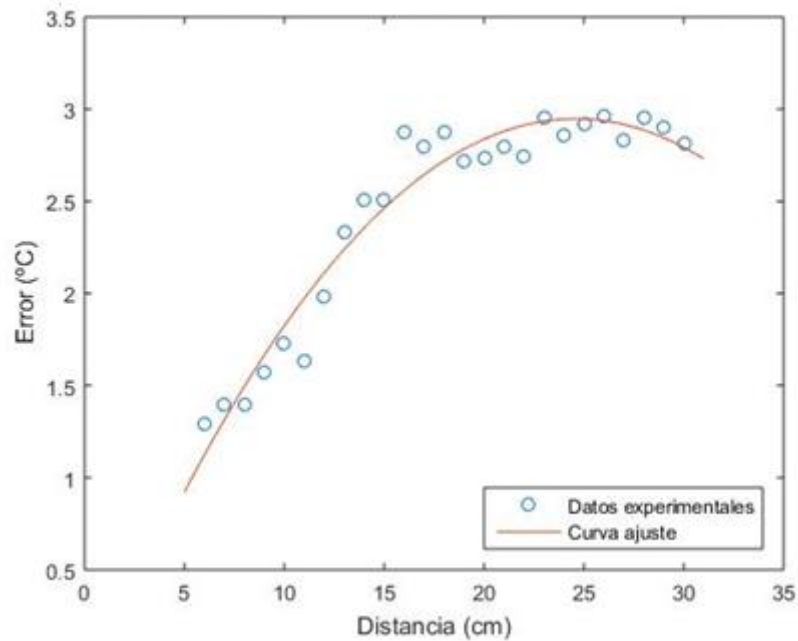


Figura 3-7. Representación gráfica del error medio para cada distancia de la temperatura de la superficie medida por IRT2 (termómetro IR) respecto IRT1 (termómetro de referencia). Aparecen los datos tomados para la calibración dados por puntos y la curva de mejor ajuste.

La ecuación de la curva de mejor ajuste encontrada es (3.1), cuyos coeficientes se encuentran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Valores de los coeficientes de la curva de ajuste

Coefficientes del polinomio	Valor (°C / cm ²)
p_2	$-0.53 \cdot 10^{-2}$
p_1	0.26
p_0	-0.24

$$Error = p_2 \cdot d^2 + p_1 \cdot d + p_0 \quad (3.1)$$

El coeficiente de determinación es $R^2 = 0,95$, lo cual indica que los valores experimentales obtenidos de la variación error con la distancia se ajustan adecuadamente a la curva de ajuste encontrada. Por tanto, este método es viable para poder conocer el error de la temperatura que comete IRT2 en la medición para cada distancia.

En el caso de este segundo método se tiene una aplicación más amplia en el rango de distancias de medición, debido a que ya no existe la restricción de tener que elegir un entero entre 6 y 30 cm. El usuario puede medir a cualquier distancia que esté dentro del rango óptimo (6-30 cm) y la curva (3.1) le proporciona el error cometido por el termómetro IR MLX90614D.

3.2.2 Calibración de la temperatura del ambiente medida por el termómetro IR MLX90614D

El termómetro IR también proporciona el valor de la temperatura del ambiente en el que se está realizando la medición. Aunque dicho valor es fácil de adquirir con otros termómetros comerciales, se va a calibrar para que proporcione ambas temperaturas adecuadamente.

La dispersión obtenida del error para cada distancia de medición de la temperatura ambiente que se observa en la Figura 3-5 es muy pequeña, ya que el máximo del valor absoluto del error es 0,44 °C. Por ello, se realiza una media aritmética de dicho error para cada distancia.

En la Figura 3-8 se observa el comportamiento del error medio de la temperatura del entorno frente a la distancia de medición. Si se realiza un ajuste lineal o cuadrático de dichos datos se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0,7476$ para el caso lineal y $R^2 = 0,7763$ para la regresión de segundo orden, lo cual indica que ninguna de estas curvas explica correctamente la tendencia seguida por los datos. Otra alternativa para encontrar una curva de orden superior que se ajuste a estos valores sería utilizar la función “polyfit” de Matlab, pero como la desviación estándar del conjunto de datos es 0,12 °C, es decir, hay poca dispersión de los valores, se ha optado por la realización de una media aritmética de todos los valores de los errores para todas las distancias y se obtiene un error común para cualquier distancia de medición. Dicho valor es 0,99 °C, que es el que se le tiene que restar a T_{a2} para que esté calibrada la medida.

La temperatura T_{a1} (temperatura ambiente que proporciona el termómetro de referencia) es menor que la T_{a2} (temperatura ambiente medida con el termómetro IR), esto puede ser debido a la propia radiación que emite el cuerpo/superficie cuya temperatura también se está midiendo, o por el calor adicional que proporciona los dispositivos electrónicos tal y como se explicó en la Sección 3.2.1 (en la calibración de la temperatura de la superficie).

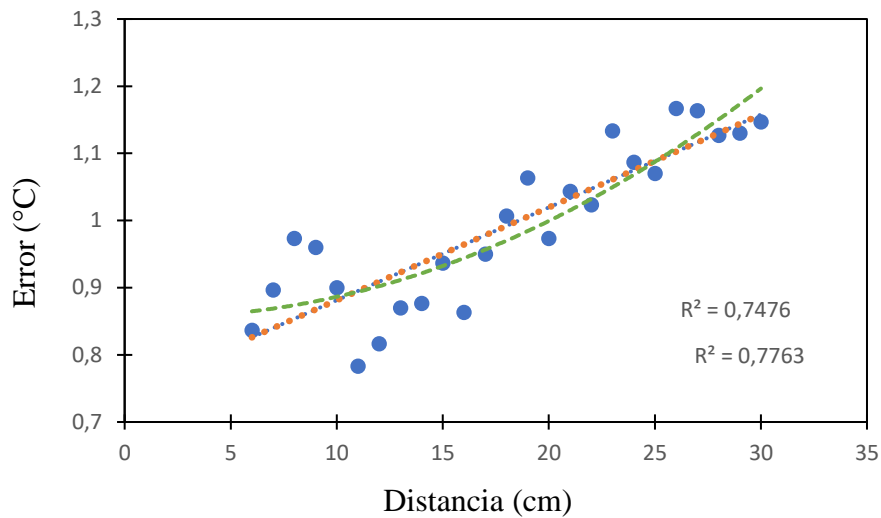


Figura 3-8. Representación gráfica del error medio para cada distancia de la temperatura ambiente medida por IRT2 (termómetro IR) respecto IRT1 (termómetro de referencia). Los puntos representan los errores medios de la temperatura para cada distancia, la recta azul es la línea del ajuste lineal de los datos y, la curva verde, el ajuste de segundo grado.

3.3 Calibración sensor imágenes infrarrojas Flir Lepton 2.5

Uno de los propósitos de la calibración de este termómetro es poder conocer la temperatura en cada punto de la superficie y poder asignarle un valor de temperatura a cada píxel de la imagen que proporciona la cámara infrarroja.

Para cumplir con dicho objetivo se realiza un programa en lenguaje C que calibra la imagen infrarroja. Según FLIR [15] hay una dependencia lineal entre las salidas del sensor que representan radiación en la banda del infrarrojo lejano (LWIR) y la temperatura. Entonces, el procedimiento en este trabajo para calibrar el sensor de imagen IR es el siguiente:

1. Se solicita al usuario que coloque la cámara sobre una superficie plana y la distancia a la que va a realizar la medición.
2. Con el termómetro se mide la temperatura corregida a una distancia fija en dos puntos diferentes del cuerpo con temperatura uniforme. Se denota como T1 y T2 la temperatura de cada punto. Un ejemplo sería realizarlo por ambos lados de la mano, en la cara palmar y dorsal.

3. Se mide el promedio de los niveles infrarrojo con el sensor de imagen IR en los mismos puntos y a la misma distancia. Se denota como IM1 y IM2 a los niveles de radiación promedio de cada punto. Se obtienen dos duplas (IM1, T1) y (IM2, T2).
4. Como hay una dependencia lineal entre los valores de radiación infrarroja medido por la cámara y la temperatura medida por el termómetro, los niveles de radiación se traducen en niveles de temperatura mediante la expresión (3.2).

$$IM = a \cdot T + b \quad (3.2)$$

Donde a y b son constantes a determinar experimentalmente, de manera que con los dos puntos medidos (IM1, T1) y (IM2, T2) se pueden obtener sus valores mediante (3.3) y (3.4) respectivamente.

$$a = \frac{T1 - T2}{IM1 - IM2} \quad (3.3)$$

$$b = IM1 - a \cdot T1 \quad (3.4)$$

5. La imagen infrarroja se calibra asignándole un valor de temperatura a cada píxel. Dicha imagen se almacena como una matriz IM de datos MxN, que en este caso tiene una dimensión de 80x60. Cada elemento de esta matriz representa un valor de radiación en una posición de la matriz de pixeles del sensor.
Se lee cada elemento de dicha matriz y se asigna un valor de temperatura a partir de la expresión (3.5).

$$T(i, j) = \frac{IM(i, j) - b}{a} \quad (3.5)$$

Donde a y b son las constantes calculadas anteriormente y IM(i,j) es el valor de radiación del pixel que corresponde al pixel de la posición i,j.

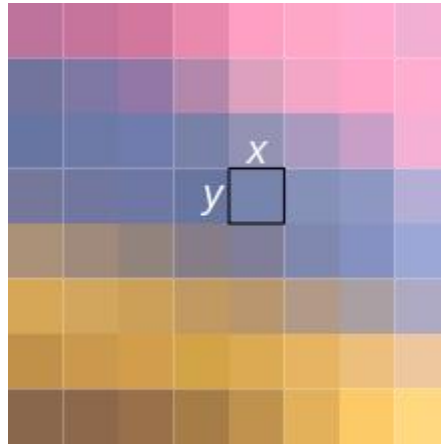


Figura 3-9. Posición (x,y) de la matriz.

Si la Figura 3-9 fuera la matriz que representa la imagen infrarroja, $IM(i,j)$ proporcionaría la radiación de la posición (x,y) . Mediante la relación lineal (3.5) se puede conocer la temperatura que le corresponde a esa posición y a cualquiera de la matriz. Por tanto, es posible conocer la temperatura en cualquier punto de la superficie deseada a partir de sus valores de radiación, construyendo un mapa 2D de temperatura que ayuda a la detección de variaciones térmicas de la superficie deseada.

Capítulo 4

Descripción del programa en lenguaje C

En este capítulo se presentarán las explicaciones de los programas construidos para la obtención de la temperatura de la superficie calibrada y conocer la dependencia radiación/temperatura.

4.1 Descripción del programa realizado en lenguaje C de la medición calibrada del termómetro IR

En esta sección se describe las diferentes operaciones que realiza el programa efectuado en lenguaje C, y ejecutado en la plataforma Raspberry Pi para la obtención de las temperaturas corregidas de la superficie y del ambiente medidas por el termómetro IR MLX90614D [14].

1. Se solicita al usuario que elija la forma que desea calibrar el termómetro, apareciéndole por pantalla dos opciones:
 - 1.1 Utilizando la curva de ajuste encontrada a partir de los datos experimentales. La distancia óptima para realizar la medida de la temperatura está entre 6 y 30 cm, dentro de ese rango el usuario puede hacer la medición a la distancia que desee.
 - 1.2 Utilizando los datos experimentales del error para cada distancia, especificándole que el rango de distancia posible para la medición está limitado, siendo solo posible valores enteros entre 6-30cm.
2. Según la opción que escoja el usuario se distinguen dos procedimientos.
 - 2.2 Opción curva de ajuste.
 - 2.2.1 Se solicita al usuario que introduzca la distancia a la que desea realizar la medición de la temperatura de la superficie en el rango 6-30 cm.
 - 2.2.2 Mediante la curva de ajuste que relaciona el error cometido en la medición de la temperatura en función de la distancia, se calcula el error correspondiente a través de la ecuación (3.1).

2.3 Opción uso de datos experimentales.

2.3.1 Se solicita al usuario que introduzca un valor entero de la distancia a la que desea realizar la medición de la temperatura de la superficie en el rango 6-30 cm.

2.3.2 Se conoce por los datos experimentales el error que comete el termómetro IR a dicha distancia. De tal forma que le devuelve al usuario dicho valor.

3. Empieza a funcionar el termómetro y muestra por pantalla al usuario la temperatura de la superficie y del ambiente en el que se está realizando la medición corregidas.

4.2 Descripción del programa realizado en lenguaje C de la medición calibrada de la cámara IR

Lo ideal habría sido realizar un programa en C con los pasos especificados en la Sección 3.3 (calibración sensor imágenes infrarrojas). Sin embargo, debido a la situación de estado de alarma en la que se ha encontrado el país por el COVID-19 durante el desarrollo de este trabajo, no se ha podido disponer del sensor que proporciona las imágenes infrarrojas.

Por lo tanto, al no poseer la cámara infrarroja, no se tiene forma de conocer los valores de radiación IM1 y IM2 de las superficies que aparecen en la Sección 3.3.

La imagen que genera la cámara térmica es un vector de 80x60 elementos en formato unit16, que es un formato propio de C donde cada elemento del vector es un entero sin signo codificado con 16 bits.

En consecuencia, como alternativa a esta falta de información para poder conocer la dependencia lineal entre los niveles de radiación y temperatura, se ha construido dos matrices aleatorias de dimensión 80x60. Estas matrices contienen números aleatorios entre 0 y 2^{16} debido al formato de la imagen que proporciona la cámara (unit16).

Los pasos del programa creado para la calibración son los siguientes.

1. Se informa al usuario que en cada medición tiene que estar apuntando con el dispositivo hacia la superficie de medida, y que para la realización de la conversión de los niveles de radiación en temperatura es necesario elegir dos superficies diferentes planas con temperatura uniforme.
2. Se realiza el mismo procedimiento que para la calibración del termómetro IR hasta que se obtiene la temperatura corregida T1 de la primera superficie.

3. Se pregunta al usuario si quiere continuar con la calibración para la toma de la temperatura de la segunda superficie. Además, se le informa que la distancia de medición de este segundo cuerpo no puede variar respecto a la medida del primero.
4. El termómetro funciona y proporciona T2, que va a estar corregida y con el mismo error que T1, ya que la medición de las dos superficies se realiza a la misma distancia.
5. Se crea una función adicional que construye una matriz de dimensión 160x120 con números aleatorios entre 0 y 2^{16} , que es la denominada “matriz” en el código.
6. Se construyen dos matrices aleatorias 80x60 (“matriz1” y “matriz2”) a partir de la matriz principal 160x120 para poder asegurar que estos dos arrays no son idénticos. De tal forma que, matriz1 contiene la primera mitad de la matriz principal y, la matriz2, la segunda mitad.
7. Una vez conocido matriz1 y matriz2, que sería la información que suministraría la cámara IR a partir de las imágenes de las superficies de medición, se calcula el valor medio de cada matriz (IM1 y IM2) y se tiene las dos ternas (T1, IM1) y (T2, IM2).
8. Se calculan los coeficientes de la recta (a mediante (3.6) y b a través de (3.7)) de la dependencia lineal que siguen los valores de radiación infrarroja suministrados por la cámara y la temperatura medida por el termómetro ($IM = a \cdot T + b$).

$$a = \frac{T1 - T2}{IM1 - IM2} \quad (3.6)$$

$$b = IM1 - a \cdot T1 \quad (3.7)$$

9. Finalmente, la relación encontrada para la conversión de los valores de temperatura y niveles de radiación, cuya ecuación (3.8), es proporcionada al usuario.

$$IM = a \cdot T + b \quad (3.8)$$

Por tanto, al averiguar cuál es la relación existente entre los valores radiación y la temperatura, se puede conocer la temperatura absoluta de cada píxel de la imagen (que se corresponde con cada elemento de la matriz 80x60). Dicha conversión permite identificar la temperatura de cada punto de la superficie de estudio, generando imágenes termográficas (objetivo del trabajo).

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

En este último capítulo se exponen las diferentes conclusiones obtenidas tras la realización de este TFG, las posibles líneas de continuación y las diversas aplicaciones en las que se pueden utilizar el sistema de sensores infrarrojos.

Se ha sintetizado un sistema para la obtención de la temperatura de una determinada zona de la piel formado por un sensor IR de temperatura y un sensor IR de imagen.

El termómetro IR se ha calibrado utilizando como referencia un termómetro IR comercial destinado a la medición de la temperatura corporal sin contacto. Tras la realización de esta calibración se han obtenido dos formas posibles de conseguir la temperatura corregida del cuerpo de medición, es decir, mediante los datos experimentales tomados para la calibración o a través de la curva de mejor ajuste de dichos datos. Siendo este último método más eficiente, debido a que el usuario puede obtener la temperatura corregida del cuerpo a cualquier distancia sin restricciones en el rango óptimo de medición (6-30 cm).

Como la cámara IR detecta la radiación emitida por el cuerpo en la banda del infrarrojo, pero no la temperatura, se ha establecido una relación entre ambos valores para poder conocer la temperatura de cada punto de la imagen que proporciona el sensor IR de imágenes, obteniendo un mapa 2D de temperatura que permite detectar las variaciones térmicas en la zona de la piel deseada.

Sin embargo, no se ha podido disponer de la cámara IR debido al estado de alarma del país por el COVID-19. Por tanto, como alternativa se han simulado las matrices 80x60 que suministraría dicha cámara para poder obtener la dependencia lineal que tienen los niveles de radiación y temperatura según el fabricante [15].

Un trabajo que quedaría por hacer sería montar la cámara IR junto con el termómetro en la plataforma Raspberry Pi, para poder probar su utilidad en el hospital Virgen del Rocío de Sevilla, en el Área de Dermatología Pediátrica [13] con el fin de la detección y diagnóstico de manera temprana de anomalías vasculares en niños.

Por otro lado, una de las principales ventajas del sistema es el reducido coste debido a la baja resolución del sensor IR en comparación con otros métodos como la resonancia magnética o la ecografía Doppler para la detección de anomalías vasculares. Resulta que no es necesaria una mayor resolución del sensor de imágenes IR debido a que incluso con señales ruidosas o defectuosas se puede extraer información relevante que ayuda a la identificación de las anomalías vasculares.

Este sistema permite el procesamiento de las imágenes en tiempo real, y con ello conocer la temperatura de cada punto de la imagen en el mismo momento de una primera consulta médica. Es una forma eficiente y rápida de detección de las variaciones térmicas en la piel que provocan las anomalías vasculares, que es la principal aplicación de este sistema. Esto hace posible el diagnóstico de los pacientes en la primera consulta y el control de forma temprana, sin la necesidad de someterse a ningún mecanismo que requiera mayores costes, tiempo y material, teniendo en cuenta que un diagnóstico temprano es fundamental en determinadas enfermedades y anomalías.

Este sistema sería útil como ayuda para la detección y diagnóstico de problemas relacionados con variaciones térmicas en la piel, ya que permite además conocer la distribución del calor en las distintas zonas en las que se realiza la medición, siendo posible identificar, por ejemplo, problemas circulatorios.

Dicho sistema también se plantea como alternativa para la monitorización de temperatura debido al brote de COVID-19, ya que, si se incluyen algoritmos de detección facial, podrían suponer un sistema económico y eficaz para evitar posibles contagios entre personas que presenten síntomas. Al estar compuesto por cámaras, hace posible el reconocimiento facial para la identificación y el seguimiento de posibles personas sintomáticas. De esta forma, con las salidas del sensor de imágenes se puede controlar los espacios públicos o lugares vulnerables creando entornos más seguros gracias al rastreo y reconocimiento de posibles afectados por el COVID-19.

Por lo tanto, entre los posibles trabajos futuros se pueden destacar:

- Incorporación de un sistema de refrigeración/ventilación que permita un tiempo de uso continuado más prolongado del sistema, dado que la plataforma Raspberry Pi debe apagarse tras un tiempo de utilización continuado debido a su calentamiento.
- Incorporación a la cadena de procesado de un software de reconocimiento facial que, mediante inteligencia artificial (IA), sea capaz de clasificar a las personas que aparezcan en el plano visual como posibles contagiados.
- Diseño de un sistema de detección mediante IA de enfermedades cardiovasculares, permitiendo al usuario un diagnóstico asistido.

Referencias

- [1] R.Eisberg y R. Resnick. (1988). *Física Cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. México: Limusa.
- [2] A. Rogalski. (2011). *Infrared Detectors*. New York: CRC Press.
- [3] W. Minkina and S.Dudzik. (2009). *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties*. Poland: Wiley
- [4] V. Leboucher, "IR revolution 360 infrared panoramic camera the ultimate solution for perimeter security," *44th Annual 2010 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*, San Jose, CA, 2010, pp. 425-428, doi: 10.1109/CCST.2010.5678699.
- [5] S. Meghana, T. V. Nikhil, R. Murali, S. Sanjana, R. Vidhya and K. J. Mohammed, "Design and implementation of surveillance robot for outdoor security," *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, 2017, pp. 1679-1682, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256885.
- [6] N.A Diakides and J.D. Bronzino (editors). (2007). *Medical Infrared Imaging*. New York: CRC Press.
- [7] A. Saxena and G. Willital, "Infrared thermography: Experience from a decade of pediatric imaging," *European Journal of Pediatrics*, vol. 167, no. 1, pp. 757–764, August 2008.
- [8] J. Hardwicke and O. Titley, "Thermographic assessment of a vascular malformation of the hand: A new imaging modality," *Journal of Clinical Imaging Science*, vol. 6, no. 1, pp. 6–9, March 2016.
- [9] S. Schneider, I. Kohli, I. Hamzavi, M. Council, A. Rossi, and D. Ozog, "Emerging imaging technologies in dermatology: Part I: Basic principles," *Journal american academy dermatology*, vol. 80, no. 40, pp. 1114–1120, April 2019.
- [10] M. García-Romero, A. Chakkittakandiyil, and E. Pope, "The role of infrared thermography in evaluation of proliferative infantile hemangiomas. Results of a pilot," *International Journal of Dermatology*, vol. 53, no. 3, pp. 216–217, May 2014.

- [11] J. Mohammed, A. Balma-Mena, A. Chakkittakandiyil, F. Matea, and E. Pope, "Infrared thermography to assess proliferation and involution of infantile hemangiomas: A prospective cohort study," *JAMA Dermatology*, vol. 150, no. 9, pp. 964–969, June 2014.
- [12] S. Sierre y D. Teplisky . (2016). Diagnóstico y tratamiento de las malformaciones vasculares en niños. Estado actual y estado del arte. Mayo 2020, de *Revista intervencionismo*.
- [13] J.A. Leñero-Bardallo, J. Ceballos-Cáceres, A. Rodríguez-Vázquez and J. Bernabé-Wittel. A customizable thermographic imaging system for medical image acquisition and processing, *White paper*, June 2020.
- [14] "Melexis MLX90614 IR thermometer specifications". Abril 2020. Sitio Web: <https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can>
- [15] "FLIR Lepton 2.5 IR camera datasheet". Mayo 2020. Sitio Web: https://lepton.flir.com/wp-content/uploads/2015/06/lepton-2pt5-datasheet-0_4195.pdf
- [16] R. A. Wood, C. J. Han, and P. W. Kruse, "Integrated uncooled infrared detector imaging arrays," in Proc. IEEE 5th Tech. Digest Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Jun. 22–25, 1992, pp. 132–135.
- [17] D. Ostrower. "Optical Thermal Imaging-replacing microbolometer technology and achieving universal deployment". *RedShift Systems, INC. III-Vs Review*, Volume 19, Issue 6. 2006, Pages 24-27, ISSN 0961-1290. [https://doi.org/10.1016/S0961-1290\(06\)71764-1](https://doi.org/10.1016/S0961-1290(06)71764-1).
- [18] C. Posch, D. Matolin, R. Wohlgenannt, T. Maier and M. Litzenberger, "A Microbolometer Asynchronous Dynamic Vision Sensor for LWIR," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 6, pp. 654-664, June 2009, doi: 10.1109/JSEN.2009.2020658.
- [19] D. Xu, B. Xiong and Y. Wang, "Micromachined Thermopile IR Detector Module With High Performance," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 3, pp. 149-151, Feb.1, 2011.
- [20] "Extech IR 200 specifications". Marzo 2020. Sitio Web: <http://www.extech.com/products/IR200>
- [21] Basics, C. (2017). "Basics of the I2C communication protocol". Marzo 2020. Sitio Web: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>

- [22] “FLIR Lepton Engineering Datasheet”. Mayo 2020. Sitio Web:
<https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lepton-engineering-datasheet.pdf>
- [23] “Raspberry Pi guía del usuario”. 2ª Edición. Abril 2020. Sitio Web:
<https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=77879&start=25>
- [24] Morales, M. (2017). “Fundamentos I2C-Aprende.-T-Bem”. Abril 2020. Sitio Web:
<https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos/>
- [25] Poole, N. “FLIR Lepton Hookup Guide”. Abril de 2020. Sitio Web:
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/flir-lepton-hookup-guide/all>
- [26] Basics, C. (2018). “Basics of the SPI Communication Protocol”. Marzo 2020. Sitio Web:
<https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/>

Anexo A

Códigos de programas en lenguaje C

A1. Rutina para la obtención de la temperatura de un cuerpo calibrada tras la medición con el termómetro IR

```
#include <stdio.h>
#include <bcm2835.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>
#include <string.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <unistd.h>
#include <time.h>
#define AVG 1 //averaging samples
#include <math.h>

/* Se hace elegir al usuario que escoja la forma de obtener el error
cometido por el termómetro a la hora de medir la temperatura, entre los
dos casos: caso 1: mediante la curva de ajuste, caso 2: mediante los
datos experimentales obtenidos en la toma de datos*/

int main (int argc, char **argv)
{
    int opcion,distancia;
    float error,d,hace,p2,p1,p0;
    /*Se crea un vector que contiene el error de la temperatura
suministrada
por el termómetro para cada distancia entre 6-30 cm (números
enteros).
Son los datos obtenidos en la calibración*/
    float error_medida[25]={1.29, 1.40, 1.40, 1.57, 1.73, 1.63, 1.99, 2.33,
2.51, 2.51, 2.88, 2.80, 2.87, 2.72, 2.73, 2.80, 2.75, 2.96, 2.86, 2.92,
2.96, 2.83, 2.96, 2.90, 2.82};

    opcion = 0;
    distancia = 0;
```

```

do
{
    printf("\n\n Elección del método de calibración termómetro \n");
    printf("\n 1. Utilizando curva de ajuste (valor de distancia entre
6-30 cm) \n");
    printf("\n 2. Utilizando valores experimentales (valor de distancia
entero entre 6-30 cm) \n");
    printf("\n\n Elija la forma de corrección de la temperatura
medida:");

    scanf("%d",&opcion);

    printf("\n Introduzca la distancia de medición, distancia (cm) =
");
    scanf("%d", &distancia); // se guarda la distancia introducida por
el usuario
    // verificación al usuario de la distancia introducida
    printf("\n\n La distancia de medición introducida es %d
cm\n",distancia);

    // Lee la opción seleccionada por el usuario
    switch (opcion)
    {
        case 1: // Curva de mejor ajuste de los datos de la calibración

            /* Se guarda la distancia introducida como d en el
caso de que esté comprendida entre 6-30 cm.*/
            if (distancia>=6 && distancia<=30)
            {
                hace = 0;
                d = distancia;
            }
            else
            {
                /* Avisa al usuario que la distancia introducida
no es válida y le recuerda el rango válido para
la medición*/
                printf("\nError, la distancia debe estar en el rango
calibrado 6-30 cm\n ");
            }

            // Coeficientes de la curva de ajuste
            p2 = -0.005283;
            p1 = 0.259728;
            p0 = -0.244709;
            error_d = p2*d*d + p1*d + p0; /* Ecuación de la curva de
ajuste que relaciona la distancia con su error en la medición de la
temperatura */

            /*Proporciona al usuario por pantalla el error cometido en
la medida de la temperatura del paciente para la distancia seleccionada*/
            printf("El error cometido en la medición de la
temperatura del paciente es = %04.2f °C\n", error_d);
            break;

        case 2: // Utilización de los datos de la calibración

            if (distancia>=6 && distancia<=30)
            {
                error_d = error_medida[distancia-6]; /*guarda en la variable
error_d el error de la temperatura para la distancia seleccionada*/
            }
        }
    }
}

```

```

        /*Proporciona al usuario por pantalla el error cometido en
la medida de la temperatura del paciente para la distancia seleccionada*/
        printf("El error cometido en la medición de la
temperatura del paciente es = %04.2f °C\n", error);
    }
    else
    {
        printf("\n Error, el valor de la distancia no es válido.
Debe elegir un entero en el rango de calibración (6-30cm)\n");
    }
    break;

default:
    printf("\n Error, la opción introducida no es válida\n");
}

/* Programa que ejecuta el termómetro IR para medir la temperatura
de la superficie y del ambiente calibradas */

unsigned char buf[6];
unsigned char i,reg;
double temp=0,calc=0, skytemp,atemp;
bcm2835_init();
bcm2835_i2c_begin();
bcm2835_i2c_set_baudrate(25000);
// set address
bcm2835_i2c_setSlaveAddress(0x5a);

printf("\n ;El termómetro está funcionando!\n");

calc=0;
reg=7;

for(i=0;i<AVG;i++)
{
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_write (&reg, 1);
    bcm2835_i2c_read_register_rs(&reg,&buf[0],3);
    temp = (double) (((buf[1]) << 8) + buf[0]);
    temp = (temp * 0.02)-0.01;
    temp = temp - 273.15 + error; /* error es el error cometido
en la medición */

    calc+=temp;
    sleep(1);
}

skytemp=calc/AVG; // Proporciona la temperatura del cuerpo calibrada
calc=0;
reg=6;

for(i=0;i<AVG;i++)
{
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_write (&reg, 1);
    bcm2835_i2c_read_register_rs(&reg,&buf[0],3);
    temp = (double) (((buf[1]) << 8) + buf[0]);
    temp = (temp * 0.02)-0.01;
    temp = temp - 273.15 - 0.99;
    calc+=temp;
    sleep(1);
}

```

```

    }

    atemp=calc/AVG; // Proporciona la temperatura ambiente calibrada

    /* Se muestra al usuario la temperatura de la superficie medida y
    la temperatura ambiente */

    printf("Temperatura ambiente = %04.2f °C\n ", atemp);
    printf("Temperatura superficie = %04.2f °C\n ", skytemp);
    printf("\n          \n");
    printf(";Medida realizada con éxito!\n");

    return 0;
}
while (opcion!= 2);
return 0;
}

```

A2. Algoritmo para la obtención de la dependencia lineal entre los valores de los niveles de radiación y temperatura

```

#include <stdio.h>
#include <bcm2835.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>
#include <string.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <unistd.h>
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdio_ext.h>
#define AVG 1 //averaging samples
#include <math.h>
#define M 80 // Número de filas de las matrices que proporcionaría la cámara IR
#define MT 160 // Número de filas de la matriz aleatoria creada para obtener dos matrices aleatorias diferentes (las que proporcionaría la cámara IR)
#define N 60
#define NT 120 // Número de columnas

void introduce (int **matriz);
int main (int argc, char **argv)
{
    int opcion,distancia;
    float error,d,hace,p2,p1,p0;

```



```

    /*Se crea un vector que contiene el error de la temperatura
    suministrada por el termómetro para cada distancia entre 6-30 cm (números
    enteros). Son los datos obtenidos en la calibración*/
    float error_medida[25]={1.29, 1.40, 1.40, 1.57, 1.73, 1.63, 1.99, 2.33,
    2.51, 2.51, 2.88, 2.80, 2.87, 2.72, 2.73, 2.80, 2.75, 2.96, 2.86, 2.92,
    2.96, 2.83, 2.96, 2.90, 2.82};

    /* Primer paso:
    Se hace elegir al usuario que escoja la forma de obtener el error
    cometido por el termómetro a la hora de medir la temperatura:
    caso 1: mediante la curva de ajuste
    caso 2: mediante los datos experimentales */

    printf("\n Obtención de la conversión de los niveles de radiación en
    temperatura\n");
    printf("\n 1° Elija dos superficies planas, diferentes y con
    temperatura uniforme\n");
    printf("\n 2° Coloca el dispositivo apuntando hacia la primera
    superficie a la distancia deseada.\n");
    printf("\n 3° Todas las medidas se realizan a la misma distancia
    \n");

    opcion = 0;
    distancia = 0;

    do
    {
        printf("\n\n Elección del método de calibración termómetro \n");
        printf("\n 1. Utilizando curva de ajuste (valor de distancia entre
    6-30 cm) \n");
        printf("\n 2. Utilizando valores experimentales (valor de distancia
    entero entre 6-30 cm) \n");
        printf("\n\n Elija la forma de corrección de la temperatura
    medida:");

        scanf("%d",&opcion);

        printf("\n Introduzca la distancia de medición, distancia (cm) =
    ");
        scanf("%d", &distancia); // se guarda la distancia introducida por
    el usuario
        // verificación al usuario de la distancia introducida
        printf("\n\n La distancia de medición introducida es %d
    cm\n",distancia);

        // Lee la opción seleccionada por el usuario
        switch (opcion)
        {
            case 1: // Curva de mejor ajuste de los datos de la calibración

                /* Se guarda la distancia introducida como d en el
                caso de que esté comprendida entre 6-30 cm.*/
                if (distancia>=6 && distancia<=30)
                {
                    hace = 0;
                    d = distancia;
                }
                else
                {
                    /* Avisa al usuario que la distancia introducida

```

```

        no es válida y le recuerda el rango válido para la
medición*/
        printf("\nError, la distancia debe estar en el rango
calibrado 6-30 cm\n ");
    }

    // Coeficientes de la curva de ajuste
    p2 = -0.005283;
    p1 = 0.259728;
    p0 = -0.244709;
    error = p2*d*d + p1*d + p0; /* Ecuación de la curva de
ajuste que relaciona la distancia con su error en la medición de la
temperatura */

    /*Proporciona al usuario por pantalla el error cometido en
la medida de la temperatura del paciente para la distancia seleccionada*/
    printf("El error cometido en la medición de la
temperatura del paciente es = %04.2f °C\n", error);
    break;

    case 2: // Utilización de los datos de la calibración

        if (distancia>=6 && distancia<=30)
        {
            error = error_medida[distancia-6]; /*guarda en la variable
errod el error de la temperatura para la distancia seleccionada*/

            /*Proporciona al usuario por pantalla el error cometido en
la medida de la temperatura del paciente para la distancia seleccionada*/
            printf("El error cometido en la medición de la
temperatura del paciente es = %04.2f °C\n", error);
        }
        else
        {
            printf("\n Error, el valor de la distancia no es válido.
Debe elegir un entero en el rango de calibración (6-30cm)\n");
        }
        break;

    default:
        printf("\n Error, la opción introducida no es válida\n");
    }

    /* Una vez conocido el error que se comete en la medición de la
temperatura, empieza a funcionar el termómetro */

    /* Segundo paso:
Se seleccionan dos superficies diferentes con temperatura
uniforme*/

    unsigned char buf[6];
    unsigned char i,reg1,reg2,j;
    double temp=0,calc=0, T1,atemp,T2,calc2,temp2;
    bcm2835_init();
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_set_baudrate(25000);
    // set address
    bcm2835_i2c_setSlaveAddress(0x5a);

    printf("\n ;El termómetro está funcionando!\n");

```

```

// Código que proporciona el termómetro IR

/* Empieza la medición de la primera superficie y de la temperatura
ambiente */

calc=0;
reg1=7;

for(i=0;i<AVG;i++)
{
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_write (&reg1, 1);
    bcm2835_i2c_read_register_rs(&reg1,&buf[0],3);
    temp = (double) (((buf[1]) << 8) + buf[0]);
    temp = (temp * 0.02)-0.01;
    temp = temp - 273.15 + error1; /* error1 es el error cometido
en la medición */

    calc+=temp;
    sleep(1);
}

T1=calc/AVG; /* Proporciona la primera medida de la temperatura de
la superficie 1*/
calc=0;
reg1=6;

for(i=0;i<AVG;i++)
{
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_write (&reg1, 1);
    bcm2835_i2c_read_register_rs(&reg1,&buf[0],3);
    temp = (double) (((buf[1]) << 8) + buf[0]);
    temp = (temp * 0.02)-0.01;
    temp = temp - 273.15 - 0.99;
    calc+=temp;
    sleep(1);
}

atemp=calc/AVG; // Temperatura ambiente

printf("Temperatura ambiente = %04.2f °C\n", atemp);
printf("Temperatura superficie 1 = %04.2f °C \n", T1);

/* Pregunta al usuario si desea continuar con la calibración de
la cámara IR */
// Tiene que elegir otra superficie diferente
char salir;
do
{
    printf(" \n Cambie de superficie y apunte con el dispositivo hacia
ella para la obtención de su temperatura. ¿Desea continuar con la
calibración? (S/N):");
    __fpurge(stdin); // Borra el buffer para que no se encuentre la
tecla intro
    scanf("%c",&salir);
} while(salir != 'S' && salir!='s');

printf("\n El dispositivo está funcionando para la segunda medida
\n");

```

```

/* El termómetro funciona de nuevo para la toma de la temperatura de la
segunda superficie*/

calc=0;
reg2=7;

for(i=0;i<AVG;i++)
{
    bcm2835_i2c_begin();
    bcm2835_i2c_write (&reg2, 1);
    bcm2835_i2c_read_register_rs(&reg2,&buf[0],3);
    temp = (double) (((buf[1]) << 8) + buf[0]);
    temp = (temp * 0.02)-0.01;
    temp = temp - 273.15 + error;
    calc+=temp;
    sleep(1);
}

T2=calc/AVG; // Proporciona la temperatura de la superficie 2 elegida

printf("\n Temperatura superficie 2 = %04.2f °C\n", T2);

printf("\n ;Medidas realizadas con éxito!\n");

/* La matriz 160x120 creada se divide en dos para asegurar que
ambas submatrices son aleatorias pero diferentes
- Matriz 1: contiene la primera mitad de matriz
- Matriz 2: contiene la segunda mitad de matriz */

int **matriz;
int **matriz1;
int **matriz2;

/*Para reservar el espacio de memoria necesaria*/
matriz = reservar();
matriz1 = reservar2();
matriz2 = reservar2();

introduce(matriz); // Se definen los valores de la "matriz"

int elemento_actual1, elemento_actual2, sumatoria1,sumatoria2;
int cantidad_elementos1,cantidad_elementos2;
double IM1,IM2;
int a,b;
for(i=0; i<M; i++)
{
    for (j=0; j<N; j++)
    {
        matriz1[i][j] = matriz[i][j];
    }
}

sumatoria1 = 0;
cantidad_elementos1 = M*N; // filas*columnas

// Se calcula el valor medio de todos los elementos de la matriz 1

for (i = 0; i<M; i++){
    for(j = 0; j<N; j++){
        elemento_actual1 = matriz1[i][j];

```

```

    sumatoria1 = sumatoria1 + elemento_actual1;
}
}

IM1 = sumatoria1/cantidad_elementos1; // Valor medio
printf("Valor medio del nivel de radiación de la superficie 1 es IM1 =
%0.2f\n", IM1);

for(i=0; i<M; i++){
    for (j=0; j<N; j++){
        matriz2[i][j] = matriz[i+M][j+N];
    }
}

sumatoria2 = 0;
cantidad_elementos2 = M*N; // filas*columnas

// Se calcula el valor medio de todos los elementos de la matriz 1

for (i = 0; i<M; i++){
    for(j = 0; j<N; j++){
        elemento_actual2 = matriz2[i][j];
        sumatoria2 = sumatoria2 + elemento_actual2;
    }
}

// Se calcula el promedio

IM2 = sumatoria2/cantidad_elementos2;

printf("\n Valor medio del nivel de radiación de la superficie 2 es IM2
= %0.2f\n", IM2);

/* Al haber una dependencia lineal entre los valores de radiación
medidos con la cámara y la temperatura medida por la temperatura
se calcula dicha recta para ver cómo se traducen los niveles de
radiación en temperatura  $IM = a*T + b*$ 
a = (T1-T2)/(IM1/IM2);
b = IM1-(a*T1);

printf("\n La dependencia lineal entre los valores de radiación y la
temperatura es  $IM = %i*T+%i \backslash n$ ", a,b);

// Se libera la memoria asignada a las matrices
free(matriz);
matriz = NULL;
free(matriz1);
matriz1 = NULL;
free(matriz2);
matriz2 = NULL;

return 0;
}
while (opcion!= 2);
return 0;
}

// Se reserva espacio de memoria para las matrices
int reservar()
{
    int i;

```

```

int **mat;
mat = (int**)malloc(MT*sizeof(int*));
if(mat==NULL)
{
    printf("No se ha podido reservar memoria.\n");
    exit(1);
}

for(i=0; i < MT; i++){
    mat[i] = (int*)malloc(NT*sizeof(int));
    if (mat[i] == NULL)
    {
        printf("No se ha podido reservar memoria.\n");
        exit(1);
    }
}

return mat;
}

int reservar2()
{
    int i;
    int **mat2;
    mat2 = (int**)malloc(M*sizeof(int*));
    if(mat2==NULL){
        printf("No se ha podido reservar memoria.\n");
        exit(1);
    }

    for(i=0; i < M; i++){
        mat2[i] = (int*)malloc(N*sizeof(int));
        if (mat2[i] == NULL)
        {
            printf("No se ha podido reservar memoria.\n");
            exit(1);
        }
    }

    return mat2;
}

/* Creación de una matriz 160x120 que contiene a las dos matrices que
   que sustituye la información proporcionada por el sensor de imágenes IR*/
void introduce(int **mat)
{
    int i,j;
    srand(time(NULL));

    for (i=0; i<MT; i++){
        for (j=0; j<NT; j++){
            mat[i][j] = rand()%16384;
        }
    }
}

```