

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

Estudio del diseño de un sistema electrónico para detectar a personas con fiebre mediante el uso de una cámara térmica.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

AUTOR

Marlon Arbel Atoche Galvez

ASESOR:

Donato Andrés Flores Espinoza

Lima, Noviembre, 2020

Resumen

Actualmente el mundo atraviesa una de las peores crisis sanitarias de la historia ocasionada por la pandemia del COVID-19, esta enfermedad tiene entre los síntomas más comunes a la fiebre con un 89.7% de incidencia en los infectados, según estudios de la Organización Mundial de la Salud. Una de las medidas principales para evitar los contagios es la detección de personas con fiebre, los cuales son potenciales contagiados y deben ser aislados. La termografía infrarroja es una técnica eficaz para la detección de personas con fiebre debido a que permite obtener información sobre la temperatura de las personas de forma instantánea, sin contacto y conservando el distanciamiento social.

El presente trabajo de investigación se centra en el estudio sobre el diseño de un sistema electrónico que permita la detección de personas con fiebre de manera continua, basado en estudios realizados sobre sistemas termográficos que fueron efectivos para frenar la pandemia del SAARS y la gripe AH1N1.

Este sistema contempla el uso de la cámara térmica VUMII OFC con la cual se cuenta dentro del laboratorio de sistemas aéreos no tripulados de la PUCP y el uso de una temperatura de referencia externa para la autocalibración del sistema en funcionamiento. Este tipo de arquitectura funciona para sistemas de termografía cuantitativa de bajo coste que no son considerados como equipos médicos, sino son considerados como un sistema de tamizaje.

Tabla de Contenido

1. Capítulo 1: Las cámaras térmicas en la detección de fiebre	7
1.1. Problemática y coyuntura actual	8
1.2. Imágenes térmicas	10
1.2.1 Principio básico	10
1.2.2 Calibración para sistemas de medición temperatura absoluta	11
1.3. Sistemas de detección de fiebre de forma masiva	12
1.4. Justificación.....	15
1.5. Objetivos	16
1.5.1. Objetivo general	16
1.5.2. Objetivos Específicos	17
2. Capítulo 2: Enfoque teórico de la termografía infrarroja.....	18
2.1. Fundamentos de la termografía	18
2.1.1. Radiación infrarroja.....	18
2.1.3. Cuerpo negro	19
2.1.4. Emisividad.....	19
2.2. Formación de las imágenes térmicas.....	20
2.3. Termografía infrarroja: tipos	22
2.4. Cámara térmica	24
2.4.1. Principio de funcionamiento.....	24
2.4.2. Lentes.....	24

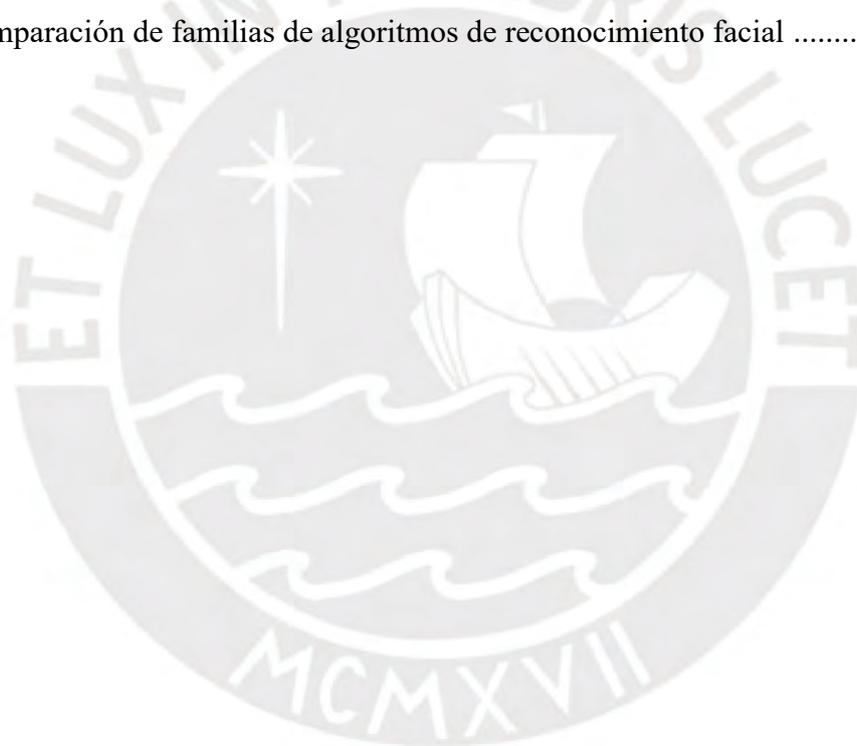
2.4.3. Detector	25
2.4.4. Parámetros de rendimiento de una cámara térmica	26
2.4.5. Tipos de cámaras térmicas.....	27
2.5. Calibración en termografía cuantitativa	28
2.5.1. Temperatura de referencia	29
2.5.2. Radiador de cuerpo negro	30
2.6. Termografía infrarroja aplicada a la detección de fiebre con termografía infrarroja	31
2.6.1. Características de la fiebre.....	31
2.6.2. Detección de rostros	32
2.6.3. Algoritmo Viola - Jones	34
2.6.4. Región de interés para la estimación de la temperatura corporal	35
2.7. Modelo del sistema de detección de fiebre propuesto.....	36
2.7.1. Diagrama general.....	36
2.7.2. Diagrama de bloques funcional	37
Conclusiones.....	39
Recomendaciones y trabajos futuros	40
Referencias bibliográficas.....	41

Índice de figuras

Figura 1: Imagen térmica en escala de colores	10
Figura 2: Emisión IR de un cuerpo negro ideal vs real].....	12
Figura 3: Diagrama de general de un sistema de detección de fiebre	13
Figura 4: Diagrama de bloques del funcionamiento de software del sistema de detección de fiebre	14
Figura 5: Espectro electromagnético con las subdivisiones del espectro infrarrojo	18
Figura 6 : Proceso de formación de una imagen térmica	24
Figura 7 : Diagrama esquemático del funcionamiento de un detector de bolómetros	26
Figura 8: Distribución en filas y columnas de un detector 4x4 a base de microbolómetros	26
Figura 9: Efecto cavidad en un radiador de cuerpo negro.....	30
Figura 10: Temperatura corporal en función del tiempo de una persona con fiebre	31
Figura 11: Las 3 partes principales del algoritmo de detección de objetos de Viola Jones. ..	34
Figura 12: Resultados de la estimación dela temperatura corporal de tres ROI distintos	35
Figura 13: Esquema general del sistema de detección de personas con fiebre propuesto.....	37
Figura 14: Diagrama de bloques de la solución propuesta.....	38

Índice de Tablas

Tabla 1: Subdivisiones del espectro infrarrojo	19
Tabla 2: Comparación entre la termografía cualitativa y cuantitativa.....	23
Tabla 3: Parámetros de rendimiento de una cámara térmica para su caracterización	27
Tabla 4: Comparación de cámaras térmicas comerciales.....	28
Tabla 5: Métodos para calibrar la medición de temperatura con termografía infrarroja	29
Tabla 6: Clasificación de métodos de detección de rostros.....	32
Tabla 7: Comparación de familias de algoritmos de reconocimiento facial	33



Introducción

En la actualidad el mundo entero se encuentra en crisis sanitaria debido a la pandemia del COVID-19. La organización Mundial de la Salud estableció desde el inicio de la pandemia tres cuidados básicos para evitar la propagación de la enfermedad: el correcto uso de mascarillas, constante lavado de manos y el distanciamiento social, sumándole la identificación de personas contagiadas, para su aislamiento inmediato, por medio de pruebas rápidas o moleculares, sin embargo, no todas las personas tienen acceso a una prueba por lo que parte del protocolo de bioseguridad de muchos establecimientos públicos es medir la temperatura de las personas que ingresan para asegurar que no presenten fiebre, pues es el síntoma más común en la enfermedad.

La detección de fiebre está dividida principalmente en dos tipos: medición de temperatura de contacto directo y sin contacto. La medición con contacto suele ser más precisa y confiable, pues evita los errores por las condiciones ambientales, además, los termómetros de contacto son, en general, más económicos; como contraparte tienen un incremento de carga de trabajo, tiempo prolongado de medición y gastos por repuestos o consumibles. Por otro lado, la medición de temperatura sin contacto utiliza la tecnología infrarroja, lo que permite que se realice de forma inmediata, sin necesidad de algún contacto con la piel y puede automatizarse, dentro de las formas de medir temperatura sin contacto se encuentran el uso de termómetros infrarrojos, pirómetros, escáneres y cámaras térmicas.

El objetivo general del trabajo de investigación es plantear un modelo solución sobre el diseño un sistema electrónico que nos permita la detección de personas con fiebre, midiendo la temperatura de las personas sin contacto por medio de una cámara térmica y sirva para identificar posibles casos infectados de COVID-19 en lugares de alta concurrencia como universidades, colegios, mercados, aeropuertos, etc y evitar la propagación del virus.

Capítulo 1: Las cámaras térmicas en la detección de fiebre

1.1. Problemática y coyuntura actual

Actualmente se está viviendo una crisis mundial causada por el brote del COVID-19, esta enfermedad respiratoria demora entre cuatro a siete días en presentar síntomas, razón por la cual es difícil de detectar a tiempo para evitar su contagio. La Organización Mundial de la Salud declaró como pandemia al COVID-19 el 11 de marzo del 2020, cuando se tenían más de 118 000 casos en 114 países, y 4291 muertos [1]. Al día 25 de mayo se cuentan con más de 5 millones de casos en todo el mundo [2]. En Perú se confirmó el primer caso el 6 de marzo [3] y para el 25 de mayo se tienen más de 120 mil casos confirmados [4], entrando en la lista de países con más infectados del mundo, a pesar que se tomaron muchas medidas que restringen la libre movilización para evitar los contagios.

La Organización Mundial de la Salud, en un estudio realizado en febrero del 2020 sobre 55924 personas confirmadas de COVID-19, en la ciudad de origen, Wuhan – China, indica que los principales síntomas de la enfermedad son fiebre, con 87.9%, tos seca con 67.7% y fatiga con 38.1% [5].

La pandemia ha obligado que todos los países tomen medidas que van desde cerrar las fronteras hasta paralizar totalmente a su población poniéndolos en cuarentena para frenar la tasa de contagios, afectando a todos los sectores económicos. La Organización de las Naciones Unidas informa que para el 11 de Mayo el 100% de los destinos en el mundo mantiene restricciones de viaje [6].

Análisis y estudios sobre enfermedades similares como el SARS, en 2003, y la influenza A/H1N1, en 2009, concuerdan que las medidas que tienen por objeto identificar los posibles casos de contagio en lugares de alta concurrencia de personas son muy importantes para frenar

la tasa de contagios. La fiebre es uno de los síntomas característicos de estas enfermedades, la cual es posible de detectar rápidamente utilizando métodos de chequeo masivo como los sistemas de detección térmico infrarrojo, (ITDS) por sus siglas en inglés “*Infrared Thermal Detection Systems*”. Estos sistemas son capaces de hacer un chequeo no invasivo y a tiempo real de temperatura corporal en las personas de forma masiva, esto gracias a los principios físicos de la termografía infrarroja [7] [8].

La cámara térmica es el componente principal de un sistema de termografía infrarroja, existen distintos tipos de cámaras dependiendo de la aplicación o técnica de termografía a utilizar, las cuales van a ser explicadas a detalle más adelante. Para lograr detectar personas con fiebre, se necesita tener la temperatura absoluta de cada pixel de la imagen entregada por la cámara para luego obtener la temperatura corporal de cada persona en el cuadro de la imagen. El problema está en que las cámaras térmicas entregan temperaturas relativas (proporcional a toda la radiación que incide sobre el lente) [9], y además que no todos los cuerpos emiten la misma radiación a la misma temperatura debido al valor de su emisividad [10], por eso se necesita calibrar constantemente la cámara, con una temperatura conocida [11], para obtener un valor confiable de la temperatura absoluta con el mínimo valor de incertidumbre.

El objetivo general de este trabajo de investigación es estudiar el diseño de un sistema electrónico que nos permita detectar a personas con fiebre mediante una cámara térmica para detectar posibles casos infectados de COVID-19 en lugares de alta concurrencia como universidades, colegios, mercados, aeropuertos, etc. para aislarlos rápidamente y evitar la propagación del virus, sabiendo que una persona infectada puede contagiar entre cinco a siete personas si no se toman medidas de identificación y aislamiento [12]. Este sistema implica utilizar un mecanismo de calibración para la cámara térmica.

1.2. Imágenes térmicas

1.2.1 Principio básico

El principio básico que utiliza la termografía infrarroja es que todo cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto (0 K o -273 °C) emite energía térmica por radiación dentro del espectro infrarrojo. Las cámaras térmicas enfocan y detectan la energía infrarroja emitida por los objetos y convierten los datos en una imagen en escala de grises o de colores con una paleta de colores especial, donde cada color representa un nivel de temperatura [13] [11].

En una imagen térmica con una escala de colores, la temperatura de cada píxel se basa en el total de radiación captada del área cubierta. Los diferentes valores de temperatura se mapean con diferentes colores, lo que permite una representación visual de la temperatura del objeto. Por lo general, los colores más brillantes, por ejemplo, el rojo, el naranja y el amarillo, representan temperaturas más cálidas, lo que indica la emisión de más calor y radiación infrarroja. Los colores más oscuros, por ejemplo, los morados y el azul oscuro, representan temperaturas más frías, que indican la emisión de menos calor y radiación infrarroja [13]. En la figura 1 se muestra una imagen térmica con la escala de colores correspondiente a su temperatura.

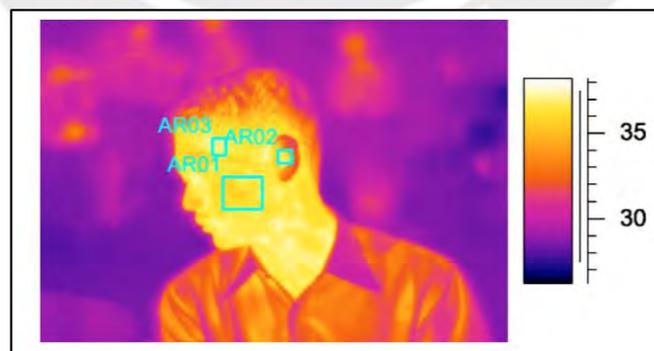


Figura 1: Imagen térmica en escala de colores [14]

Originalmente fueron diseñadas para aplicaciones militares, pero en las últimas décadas se han diseñado diversos tipos de cámaras térmicas para una amplia gama de aplicaciones en

rubros como agricultura, construcción, detección de gases, manufactura, medicina veterinaria, medicina humana, seguimiento o vigilancia de personas, visión nocturna, etc. y sumando a los avances tecnológicos ingeniería de materiales y en electrónica se ha logrado reducir considerablemente sus precios logrando a que más personas puedan adquirir cámaras térmicas para proyectos de bajo costo [15].

1.2.2 Calibración para sistemas de medición temperatura absoluta

Las cámaras térmicas entregan un valor de la radiación obtenida como señal individual para cada pixel de la imagen; pero, estos valores corresponden a temperaturas relativas los cuales deben ser corregidos para obtener una medición de temperatura absoluta confiable. Son muy complejas para obtener valores de temperatura absoluta con bajos valores de incertidumbre, pues se tiene que tener en cuenta parámetros como: las características de su señal de radiación, el efecto del tamaño de la fuente, la linealidad de la respuesta del detector o bolómetro para cada píxel, el efecto de enfoque/distancia, la respuesta de la señal a los cambios de la temperatura ambiente, etc. Estudios en termografía demuestran que la mejor forma de realizar un sistema de medición de temperatura absoluta es calibrar la cámara térmica con una fuente de radiación con emisividad o temperatura conocida. La emisividad es el valor de proporción de radiación térmica realmente emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura con respecto a la que capta una cámara térmica. La mayoría de sistemas comerciales utilizan cuerpos negros (o *blackbody*) como fuente de calibración ya que poseen valores de emisividad entre 0.95 a 0.99, esto permite estimar un valor de temperatura muy cercano a la realidad [16] [9]. En la figura 2a se ve la emisión de radiación infrarroja de un cuerpo negro con emisividad igual a 1, la cual permite obtener un valor de temperatura aparente igual a la realidad, en la figura 2b se ve un material normal el cual tiene un valor de emisividad menor a 1 y el porcentaje de emisión infrarroja es menor lo que no permite tener un valor de temperatura real [16].

Lo que hacen los sistemas de medición de temperatura corporal comerciales de empresas como Hik Vision, FLIR, Dahua, etc. es tener al cuerpo negro dentro del campo de visión de la cámara y utilizar los píxeles, en donde se encuentra, como referencia para corregir los valores de temperatura aparente obtenidos inicialmente por la cámara; así obtienen la temperatura en todos los puntos de la imagen con una incertidumbre de entre 0.2 °C a 0.5 °C [17].

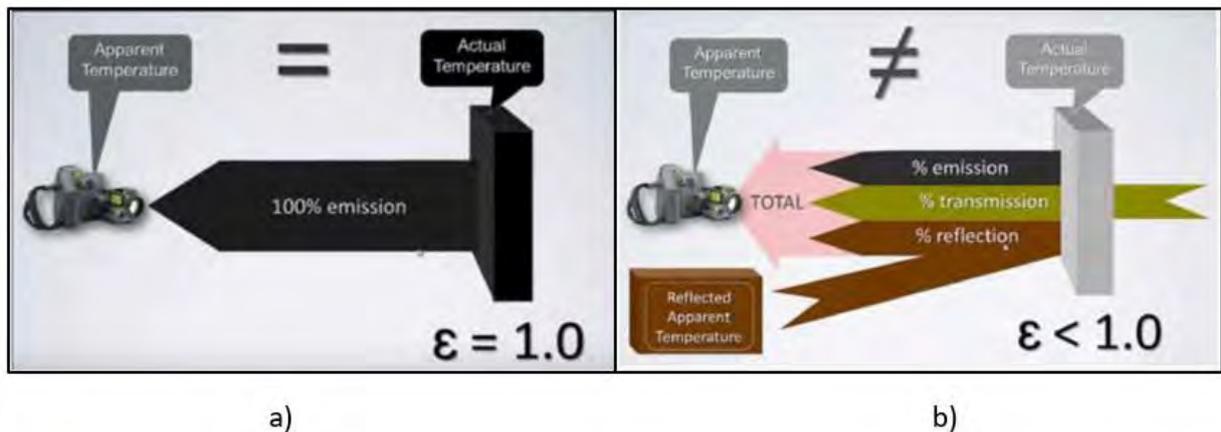


Figura 2: a. Emisión IR de un cuerpo negro ideal; b. Emisión IR de un cuerpo real con porcentajes de reflexión y transmisión [10]

1.3. Sistemas de detección de fiebre de forma masiva

Desde el brote de la pandemia del SARS en 2003 se iniciaron diversos estudios para identificar a las personas contagiadas de manera rápida, uno de estos estudios fue en la termografía infrarroja que desde la fecha ha tenido muchos avances significativos los cuales dieron como resultado a la amplia gama de soluciones de detección rápida, a tiempo real y de forma masiva como los sistemas de detección por termografía infrarroja (ITDS - Infrared Thermal Detector System) [8], [18]. La presencia de fiebre en las personas es el principal síntoma de la mayoría de enfermedades respiratorias ocasionadas por virus, en el COVID-19 el 87.9% de los infectados presentan fiebre [5], por eso los sistemas de detección de contagios evalúan si una persona tiene fiebre, pues esto representa un muy posible caso positivo y debe ser aislado para frenar los contagios. Una persona infectada puede contagiar entre cinco a siete personas [12] pero en lugares públicos esta cifra se eleva, por consecuente los sistemas de

detección masiva de fiebre están diseñados para ubicarse en lugares de alto tránsito como colegios, hospitales, aeropuertos, etc. y deben estar calibrados para obtener una lectura de temperatura confiable.

Los sistemas en mención integran software y hardware con métodos de calibración automática para tener un nivel alto de confiabilidad. Los principales componentes de hardware son: cámara térmica para obtener la información, una computadora para procesar las imágenes, un monitor para mostrar a tiempo real las medidas hechas, un sistema de calibración como punto de referencia de una temperatura conocida, generalmente es un cuerpo negro de alta emisividad, y una alarma que avise al detectar personas con fiebre. La figura 3 muestra un sistema de detección con sus principales componentes descritos. El software utilizado debe ser capaz de reconocer los rostros de todas las personas en el campo de visión de la cámara, identificar la región de importancia (la cual se utiliza para obtener el valor más cercano de temperatura corporal), hacer el cálculo de la temperatura de cada persona de acuerdo a los parámetros establecidos, además de calibrar constantemente los valores de temperatura de cada pixel con el punto de referencia y finalmente mostrar los valores en el monitor de forma continua y a tiempo real; para estas tareas la mayoría de *software* utilizan algoritmos de inteligencia artificial y *deep-learning* para optimizar el rendimiento del procesador y aumentar la efectividad del sistema [16] [19] [20] [22].

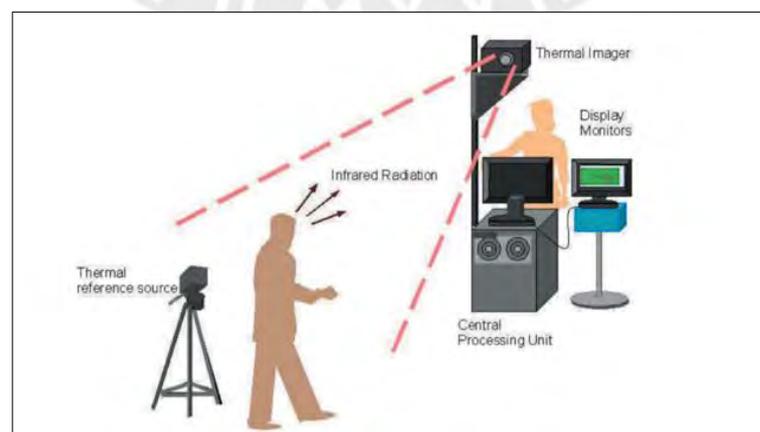


Figura 3: Diagrama de *general* de un sistema de detección de fiebre [23].

La figura 4 muestra el diagrama de bloques que engloba al funcionamiento de casi todos los sistemas actuales comerciales y de bajo costo, donde nos presenta que primero se detectan las imágenes con la cámara térmica para luego utilizar un modelo de reconocimiento facial con patrones guardados en una base de datos, luego determinar la región de interés de donde se va a sacar el valor exacto de temperatura corporal y luego calcular la temperatura medida para mostrar de manera continua y a tiempo real para determinar si la persona presenta fiebre o no.

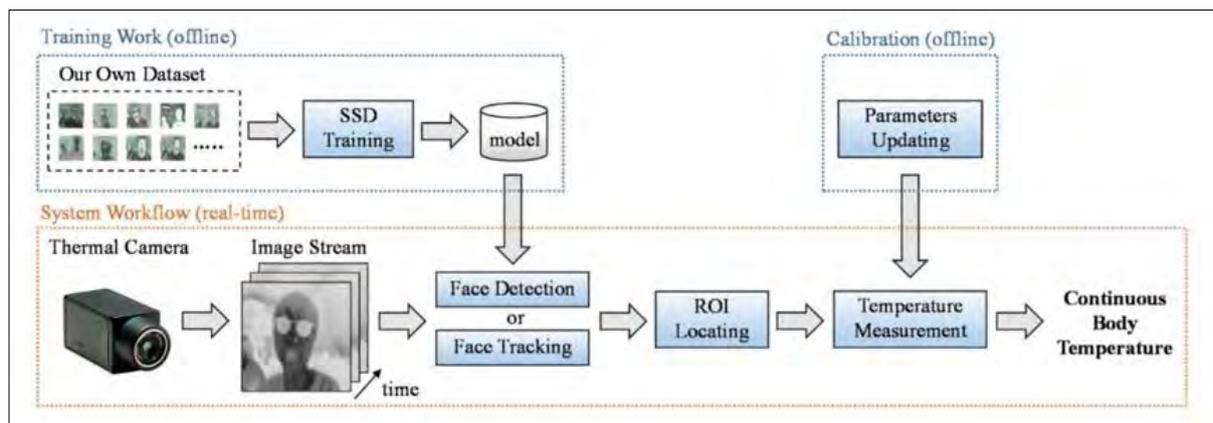


Figura 4: Diagrama de bloques del funcionamiento de software del sistema de detección de fiebre [22].

La región de interés ROI, por sus siglas en inglés *Region of Interest*, es la parte más importante de la imagen, pues es de donde se va a extraer la información que determina la temperatura de las personas, esta debe ser correctamente definida para no tener valores erróneos; la mayoría de ITDS utilizan como región de interés a la frente del rostro, por su simple identificación, sin embargo, hay investigaciones [24] que indican al utilizar los píxeles de la frente no garantizan una detección de fiebre adecuada ya que solo se mediría la temperatura de la superficie de la piel, y que la mejor opción es utilizar las temperaturas máximas extraídas de lugares en la cara que están envueltos por redes arteriales de alta densidad como la boca (arteria facial), alrededor del ojo (arterias faciales y oftálmicas), frente y oído externo (arteria temporal superficial).

Estudios realizados en 2010 [8] y 2015 [18] en Singapur sobre tres sistemas comerciales para medir temperatura en lugares públicos han obtenido resultados bastante favorables en sistemas que utilizan calibración automática con cuerpos negros, pues les sirve al sistema para tener una temperatura de referencia “conocida” y poder calcular los valores de temperatura absoluta, también mencionan que con el avance de la tecnología y desarrollo de técnicas de inteligencia artificial y *deep-learning* estos sistemas serían los indicados para la aplicación en mención; mientras que los sistemas que utiliza termómetros infrarrojos de mano no son muy confiables para este tipo de aplicación debido a su baja sensibilidad y su alta incertidumbre ya que podría permitir acceso a personas con fiebre.

En la actualidad, debido a la pandemia del COVID-19, los principales fabricantes de cámaras térmicas comerciales como Dahua [17] y Hik Vision [25] han desarrollado sistemas robustos, totalmente integrados y muy simples de usar, los cuales utilizan cuerpos negros para su calibración, tienen la capacidad de medir la temperatura de más de 30 personas al mismo tiempo en el campo de visión y tienen una incertidumbre de 0.3°C.

1.4. Justificación

El COVID-19 es una enfermedad muy infecciosa, pues una persona infectada puede contagiar de 5 a 7 personas y en un lugar de alta concurrencia este número se eleva considerablemente. Para frenar la tasa de contagios se debe identificar a las personas con la enfermedad para aislarlas de inmediato, el segundo método más efectivo para identificarlos, luego de las pruebas rápida y molecular, es la detección de fiebre, porque el 87.9% de las personas positivas la manifiestan en algún periodo de la enfermedad. La termografía infrarroja es el método más adecuado para detectar personas con fiebre, pues permite obtener información sobre la temperatura de las personas sin necesidad de tener contacto, respetando el distanciamiento social, a tiempo real y a varias personas a la vez, lo cual evita la aglomeración y permite la detección rápida de posibles infectados.

Sin embargo, las cámaras térmicas entregan valores de temperatura relativos, los cuales no son útiles para este tipo de aplicación de termografía infrarroja. Para tener una medida de temperatura absoluta confiable y a tiempo real se necesita calibrar la cámara térmica constantemente. El método más común, es utilizar un punto de referencia, con una temperatura conocida, dentro del campo de visión y utilizar esa medida para el procesamiento de la imagen, dando como resultado un valor de temperatura para cada pixel, con una incertidumbre aceptable.

Para realizar esta tesis, en el laboratorio de Vehículos Aéreos no Tripulados, se cuenta con los siguientes componentes que permitirán realizar el diseño e implementación de un sistema de detección de fiebre:

a. Cámara térmica

Marca: Vumii

Modelo: Block Vumii open frame camera (OFC)

Resolución: 640x480 pixeles de 17um

Lentes: 8.5 mm de distancia focal

Salida: NTSC

b. Sensores de temperatura con y sin contacto

c. Libre disponibilidad de algoritmos de reconocimiento facial

El propósito es tener una alternativa más que contribuya a frenar la expansión de la enfermedad, desarrollando un sistema de detección de personas con fiebre, que son posibles infectados de COVID-19, en lugares de alta concurrencia considerados focos infecciosos como: mercados, centros comerciales, aeropuertos, universidades, etc. en la etapa de reactivación de las actividades comunes para evitar un segundo brote de la enfermedad.

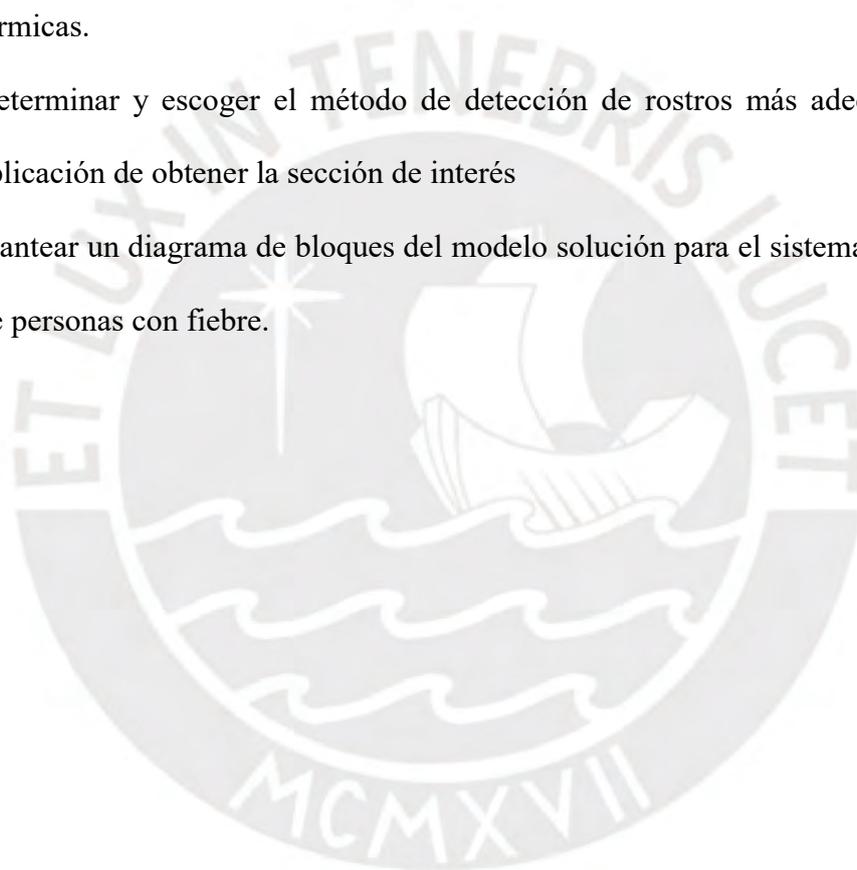
1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Plantear el diseño de un modelo solución para el diseño de un sistema electrónico capaz de identificar a personas con fiebre mediante una cámara termica.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el principio de funcionamiento y uso de una cámara térmica.
- Estudiar y analizar los fundamentos teóricos que permiten obtener temperatura por medio de la termografía infrarroja.
- Determinar el método de calibración de medida de temperatura en imágenes térmicas para la aplicación.
- Estudio del algoritmo de Viola Jones para la detección de rostros en imágenes térmicas.
- Determinar y escoger el método de detección de rostros más adecuado para la aplicación de obtener la sección de interés
- Plantear un diagrama de bloques del modelo solución para el sistema de detección de personas con fiebre.



2. Capítulo 2: Enfoque teórico de la termografía infrarroja

2.1. Fundamentos de la termografía

2.1.1. Radiación infrarroja

Todo cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto (0 K) emite un tipo de radiación electromagnética conocida como radiación infrarroja o radiación térmica. Se forma debido a que, a nivel microscópico, las cargas eléctricas de los átomos que conforman al material se encuentran en vibración debido a su temperatura y esto genera una onda electromagnética dentro del espectro infrarrojo [26].

En el espectro electromagnético, las ondas referentes a la radiación infrarroja se encuentran entre la luz visible y las microondas con longitudes de onda que van desde 0.7 hasta 1,000 μm , como se puede ver en la figura 5. La división del espectro infrarrojo se muestra en la tabla 1. Las de cámaras térmicas captan la radiación de un delimitado rango de longitudes de onda que puede ser de onda larga (LWIR) u onda media (MWIR), ya que los cuerpos que tienen temperaturas entre $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ emiten radiación dentro de esos espectros. [15].

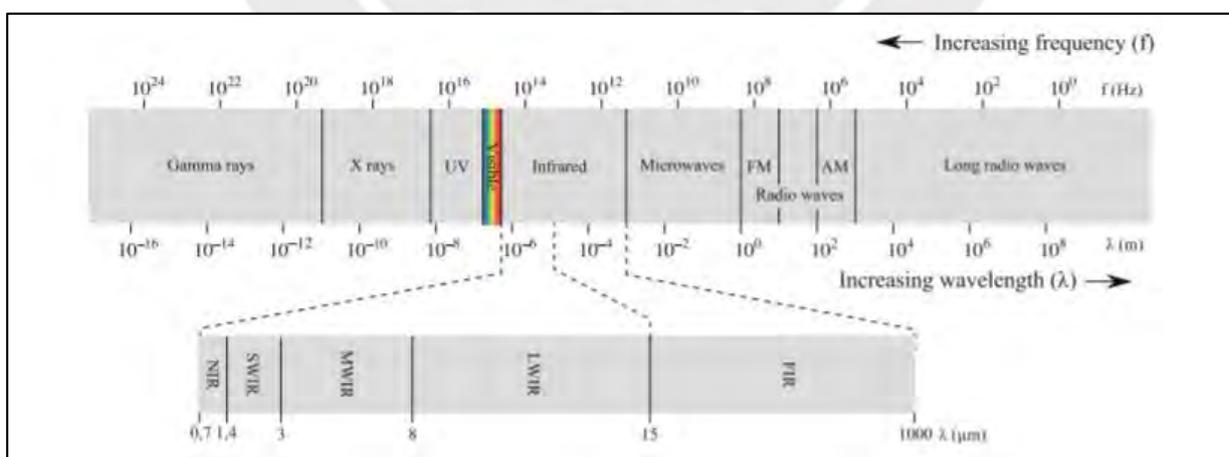


Figura 5: Espectro electromagnético con las subdivisiones del espectro infrarrojo [15]

Tabla 1: Subdivisiones del espectro infrarrojo [15]

Nombre de la subdivisión	Abreviación	Rango de longitud de onda (μm)
Infrarrojo cercano (<i>Near-infrared</i>)	NIR	0.7 – 1.4
Infrarrojo de onda corta (<i>Short-wavelength infrared</i>)	SWIR	1.4 – 3
Infrarrojo de onda media (<i>Mid-wavelength infrared</i>)	MWIR	3 – 8
Infrarrojo de onda larga (<i>Long-wavelength infrared</i>)	LWIR	8 – 15
Infrarrojo lejano (<i>Far-infrared</i>)	FIR	15 – 1,000

2.1.3. Cuerpo negro

Como todos los cuerpos tienen la capacidad de emitir radiación térmica y puede reflejarse en la superficie de un material cercano. Un cuerpo negro es aquel que no refleja ninguna porción de radiación incidente a dicho cuerpo, es decir, absorbe toda radiación térmica que incide en él y solo emite la radiación generada por él mismo [26].

Los cuerpos negros son ideales y cumplen con las siguientes características [15] [26]:

1. Absorbe toda la radiación incidente, independientemente de la longitud de onda y la dirección.
2. Para una temperatura y longitud de onda dada, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro.
3. La radiación emitida depende de la longitud de onda, pero no depende de la dirección, es decir, se comporta como un radiador lambertiano¹.

2.1.4. Emisividad

Es una característica del material muy importante a tomar en cuenta en todo sistema de termografía. Existen varias definiciones de la emisividad, las cuales se adecuan a una

¹ Radiador lambertiano: fuente de radiación por difusión, en todas las direcciones.

aplicación de radiación distinta, sin embargo, todas tienen como base la siguiente premisa: la emisividad de un objeto es la relación de la cantidad de radiación realmente emitida desde su superficie y la emitida por un cuerpo negro al mismo la temperatura [26].

Esta definición también puede ser interpretada como la proporción de radiación que una superficie puede absorber por lo que está claro que $0 < \varepsilon_o < 1$, teniendo como referencia que un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él [26] [27].

2.2. Formación de las imágenes térmicas

Para poder formar una imagen térmica, se debe saber que estas imágenes representan a una distribución de la temperatura del campo de visión de la cámara, para formarlas se debe tener en cuenta las siguientes relaciones matemáticas:

La ley de radiación de Plank (Eq 1) relaciona la energía emitida por un material (E_b) con su temperatura absoluta (T) y la longitud de onda asociada (λ), donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y k la constante de Boltzmann [11].

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]} \quad \text{Eq. 1}$$

El cuerpo negro sirve como referencia cuando hablamos de radiación térmica, por eso a través de la segunda ley de la Termodinámica se puede llegar a una relación entre el poder emisivo de un cuerpo negro y la cuarta potencia de su temperatura, de esta manera la potencia emitida por un cuerpo negro viene dada por la ecuación de Stefan-Boltzmann (Eq. 2) [11].

$$W_{CN}(T) = \int_0^\infty E_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Eq. 2}$$

La proporción de radiación emitida por un cuerpo real (CR), respecto a la del cuerpo negro (CN) viene dada por la ecuación 3 y representa a la emisividad total, en donde $\varepsilon(\lambda)$ es la emisividad espectral, propia de cada material.

$$\varepsilon(T) = \frac{W_{CR}}{W_{CN}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) E_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_b(\lambda, T) d\lambda} \quad \text{Eq. 3}$$

Como las cámaras solo capturan radiación dentro de un intervalo de longitudes de onda definido $[\lambda_1 - \lambda_2]$, se debe calcular la potencia irradiada dentro de la banda espectral definida. La relación entre la porción de radiación del cuerpo negro acotada entre 0 y una longitud de onda es función del producto λT , el cual se demuestra por la Ley de desplazamiento de Wein (Eq. 4), la cual indica que existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el pico de longitud de onda (λ_{max}).

$$\lambda_{max} T = 2897.8 \mu m \cdot K \quad \text{Eq. 4}$$

Por lo tanto, la ecuación 3 se debe acotar al rango de longitud de onda establecido por la cámara, esto se puede expresar como la diferencia de funciones cuyas variables son el producto de la temperatura por las respectivas longitudes de onda máxima definida por la Ley de desplazamiento de Wein.

$$\frac{W_{CN_{\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T}}}{W_{CN}} = \frac{\int_0^{\lambda_2 T} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right]} d\lambda T}{\sigma T^4} - \frac{\int_0^{\lambda_1 T} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right]} d\lambda T}{\sigma T^4} \quad \text{Eq. 5}$$

Según la Rodríguez, en “Termografía Activa Parte 1”, se puede definir a la ecuación 5 como una función que depende de la temperatura y las longitudes de onda límites $H(T, \lambda_1, \lambda_2)$. Los resultados de esta función se pueden obtener experimentalmente y han sido tabulados por diferentes autores obteniéndose una referencia para cada rango de longitudes de onda [11].

Teniendo en cuenta la ecuación 5 y la ecuación 3, la potencia emitida por un determinado objeto de emisividad ε_o y captada por una cámara térmica es:

$$W_{CR_o} = \varepsilon_o H W_{CN_o} \quad \text{Eq. 6}$$

Además, como un cuerpo real refleja radiación proveniente de objetos cercanos, la potencia reflejada por el objeto en estudio viene dada por la ecuación 7.

$$W_{CRR} = (1 - \varepsilon_o)HW_{CNR} \quad \text{Eq. 7}$$

La potencia de radiación total incidente en la cámara correspondiente a cada pixel de la imagen (W_p) viene dada por la suma de la potencia emitida por el objeto (W_o) más la potencia reflejada por el objeto (W_R), en donde cada subíndice (o) hace referencia al objeto y el subíndice (R) hace referencia a los objetos reflejados.

$$W_p = CH(W_o + W_R) = CH(\varepsilon_o\sigma T_o^4 + (1 - \varepsilon_o)\varepsilon_R\sigma T_R^4) \quad \text{Eq. 8}$$

Se introduce una constante C, la cual corresponde a las pérdidas ópticas dadas por los lentes de la cámara, al factor de conversión y pérdidas generadas por el detector.

Despejando la temperatura del objeto, nos queda:

$$T_o = \sqrt[4]{\frac{W_p - (1 - \varepsilon_o)\varepsilon_R\sigma T_R^4}{\varepsilon_o\sigma}} \quad \text{Eq. 9}$$

Finalmente, cada temperatura se acumula en una matriz mxn para formar la imagen térmica donde cada pixel corresponde a un valor de temperatura dado por la Eq. 10

$$[M_{m \times n}] = \begin{bmatrix} T_{o(0,0)} & \cdots & T_{o(0,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{o(m,0)} & \cdots & T_{o(m,n)} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10}$$

2.3. Termografía infrarroja: tipos

La termografía infrarroja es la técnica que aprovecha las propiedades de la radiación térmica para entregar información sobre las temperaturas dentro de un campo de visión determinado por una cámara térmica. Se divide en dos grandes grupos: cualitativa y cuantitativa, por el tipo

de información que se desea obtener, y en activa o pasiva, por la forma en la que se obtienen los datos.

La termografía activa hace uso de alguna fuente de energía que ayuda a estimular a un cuerpo para que este pueda emitir radiación infrarroja y la cámara térmica la capte, mientras que la termografía pasiva solamente capta la radiación que los objetos pueden emitir [28].

En cuanto al tipo de información que se obtiene se divide en termografía cualitativa y termografía cuantitativa, la tabla 2 presenta una comparación entre tipos de termografía [11] [15].

Tabla 2: Comparación entre la termografía cualitativa y cuantitativa [11], [15], [28].

	TERMOGRAFÍA CUALITATIVA	TERMOGRAFÍA CUANTITATIVA
INFORMACIÓN OBTENIDA	Imágenes térmicas	Imágenes térmicas Medidas de temperatura
TEMPERATURA POR PIXEL	Temperatura relativa	Temperatura absoluta
CALIBRACIÓN	No es necesario	Si es necesario
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad: permite tomar imágenes sin necesidad de luz. • Ingeniería: permite obtener información de estructuras rotas, anomalías, resistencia de un material, mantenimiento de equipos, etc. • Electricidad y electrónica: permite obtener información sobre posibles fugas de corriente, desgaste de componentes, etc. • Medicina: permite identificar tumores, detectar cuerpos extraños, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bioquímica: permite obtener temperaturas exactas en pruebas de laboratorio no invasivas. • Medicina, permite detectar temperaturas en pacientes sin necesidad de contacto. • Industrial, permite realizar pruebas de estándares de calidad correspondientes a las temperaturas límites de un producto sin necesidad de contacto.

2.4. Cámara térmica

La cámara térmica, es el componente fundamental de todo sistema de termografía infrarroja. Cuenta con tres partes fundamentales: lentes, detector y procesador, las cuales van a ser descritas a continuación.

2.4.1. Principio de funcionamiento

El proceso de formación de una imagen térmica se puede observar en la figura 6, en donde se ve que la radiación emitida por un objeto primero incide sobre los lentes, luego es focalizada hacia el detector que convierte la radiación térmica en una señal eléctrica que puede ser medida y cuantificada, finalmente el procesador lee las señales del detector y forma una imagen térmica en función a la intensidad de radiación que emite el objeto [13], [26].

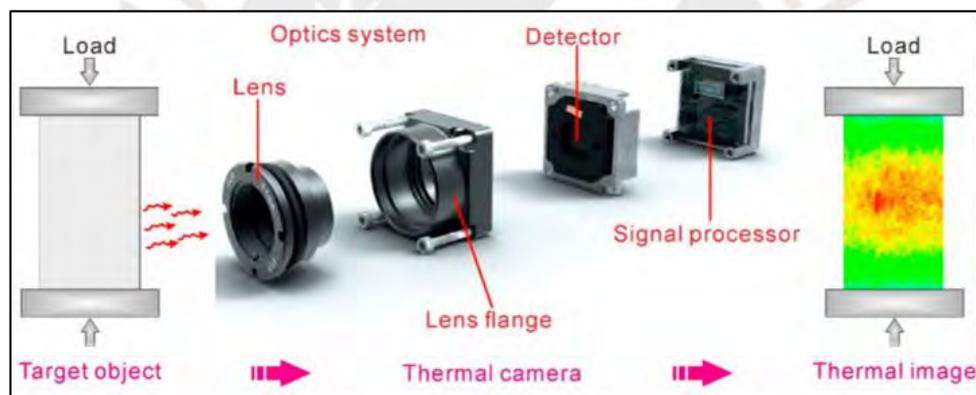


Figura 6 : Proceso de formación de una imagen térmica [13]

2.4.2. Lentes

Las lentes juegan un papel muy importante en el proceso de formación de las imágenes térmicas, pues son el primer contacto de la radiación y deben focalizarla hacia los detectores de la cámara. Debido a que el vidrio, que se usa para las lentes de cámaras fotográficas, tiene un porcentaje de transmitancia muy bajo para las ondas electromagnéticas del espectro infrarrojo, el material de las lentes térmicas en su mayoría es de Germanio ya que este material no genera mucha reflexión a la radiación térmica [26].

Los parámetros FOV (Field of View) y IFOV (Instantaneous Field of View), los cuales nos indican el campo de visión general de la imagen y el campo de visión de un pixel como resolución espacial respectivamente, son definidos por las lentes y si se requiere una imagen muy precisa o con un acercamiento grande se necesitan lentes con un diámetro más grande lo que puede encarecer el sistema ya que el germanio posee un precio relativamente alto en el mercado [15].

2.4.3. Detector

Funciona como transductor, convierte la radiación en una señal eléctrica para su posterior procesamiento. Es el componente principal de una cámara y la calidad del transductor, en gran medida, determina el rendimiento y calidad de las imágenes térmicas [26].

Existen dos tipos de detectores: los detectores de fotones y los detectores térmicos. Los primeros convierten la radiación absorbida directamente en un cambio de la distribución electrónica de energía debido al cambio de concentración de portadores de carga libre; mientras que los segundos utilizan la radiación térmica para producir un cambio correspondiente en alguna propiedad física del material, por ejemplo, la resistencia eléctrica dependiente de la temperatura en un bolómetro [15], [26].

Los detectores de fotones generalmente trabajan en la banda de onda media (MWIR) en donde el contraste térmico es alto y lo muy sensible a pequeñas diferencias de temperatura [15]. También permite una mayor velocidad de cuadro que los detectores térmicos; sin embargo, necesitan de ser enfriado a una temperatura inferior a 77 K para reducir el ruido térmico.

Los detectores térmicos trabajan en la banda de onda larga (LWIR), no necesitan ser enfriados, lo cual hace que las cámaras que reduzcan considerablemente su tamaño y precio. Existen dos tipos de detectores térmicos: los termoelectrónicos, que generan una diferencia de

potencial correspondiente a la radiación, y los bolómetros, que cambian su resistencia eléctrica y se utiliza en un circuito para medir voltaje o corriente que depende de la radiación incidente. En la figura 7 se puede ver el diagrama de funcionamiento general de un bolómetro con un circuito de señal de salida básico.

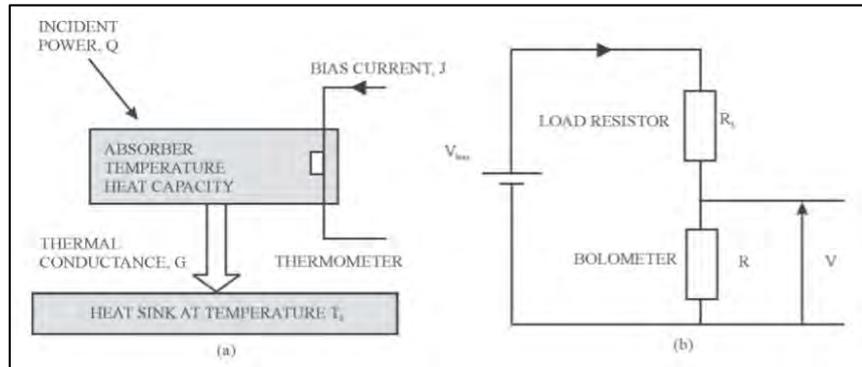


Figura 7 : (a) Diagrama esquemático del funcionamiento de un detector de bolómetros y (b) el circuito de salida de la señal eléctrica para ser procesada [29].

En una cámara térmica, que utiliza detectores formado por microbolómetros, se usan la misma cantidad de bolómetros como pixeles de la imagen que forma, en la figura 8 se muestra un arreglo de bolómetros en un detector de 16 pixeles (4x4). Por lo tanto, cada bolómetro funciona de forma independiente para cada pixel [29].

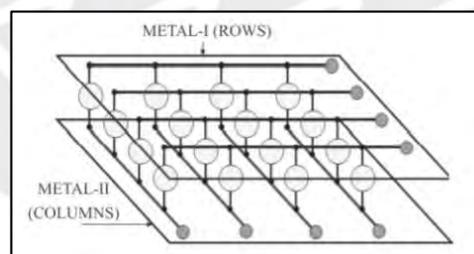


Figura 8: Distribución en filas y columnas de un detector 4x4 a base de microbolómetros [29]

2.4.4. Parámetros de rendimiento de una cámara térmica

El rendimiento de un sistema termográfico se describe mediante una serie de parámetros tales como la respuesta térmica, el ruido electrónico de los detectores, la resolución geométrica, la precisión, el rango espectral, la velocidad de cuadro, el tiempo de integración, etc. La resolución de temperatura viene dada por el NETD y la resolución espacial por el IFOV, ambos

son parámetros objetivos de rendimiento muy importantes, pues nos definen la calidad de la imagen.

Conocer los parámetros de rendimiento de la tabla 3 permite escoger adecuadamente la cámara térmica para la aplicación que se desea, basándose en los requerimientos técnicos, además, permite poder interpretar los resultados correctamente.

Tabla 3: Parámetros de rendimiento de una cámara térmica para su caracterización [26]

Nombre	Descripción	Unidad	Significado	Valoración
Exactitud de temperatura	Error absoluto en la medida de temperatura de un cuerpo negro	K, °C, °F	Exactitud absoluta de la medición	Menor mejor
NETD (Noise equivalent temperature difference)	Mínima diferencia de temperatura equivalente al ruido (SNR =1)	K, °C, °F	Resolución de temperatura	Menor mejor
FOV (Field of view) Campo de visión	La extensión angular de los campos de objetos observables por la cámara	Grados (°)	Campo de detección del objeto	Depende de la aplicación
IFOV (Instantaneous Field of View)	Extensión angular del objeto que emite radiación en un pixel. El valor representado en mrad corresponde al tamaño del punto visible [mm] de un píxel a una distancia de 1m.	mrad	Resolución espacial	Menor mejor
Velocidad de cuadro	Frecuencia a la que se producen imágenes consecutivas únicas	Hz, 1/s	Resolución de tiempo	Mayor mejor
Tiempo de integración	Periodo de integración de la señal	S	Resolución de tiempo, sensibilidad	Menor mejor
MTF (modulation transfer function) Función de transferencia de modulación	Transformada de Fourier de la respuesta de la cámara cuando se ve una fuente puntual	-	Resolución espacial	-
MDTD (mínimum detectable temperature difference)	Mínima diferencia de temperatura a la que un objeto cuadrado o circular puede ser detectado por un observador, dependiendo del tamaño del objeto	K, °C, °F (dependien do del tamaño del objeto)	Detección de objetos pequeños con bajas temperaturas de diferencia	Menor mejor

2.4.5. Tipos de cámaras térmicas

Se puede clasificar a las cámaras térmicas según el tipo de detector que usan, en: Cámaras con detector de fotones o enfriadas y cámaras con detector térmico o no enfriadas.

Las cámaras que utilizan detector de fotones trabajan en el espectro de onda media (MWIR) y necesitan de un sistema de refrigeración para evitar el ruido térmico lo que hace que tengan un tamaño y peso elevado; mientras que las cámaras con detector térmico o microbolómetros trabajan en el espectro de onda larga (LWIR) y no necesitan de refrigeración. Las cámaras enfriadas son más precisas, tienen una velocidad de cuadro mayor que las cámaras no enfriadas y por lo general son más costosas[26], [29]. En la tabla 4 se muestra una comparación entre tres cámaras térmicas, una enfriada y dos no enfriadas.

Tabla 4: Comparación de cámaras térmicas comerciales.

	InfraTec ImageIR® 9400	FLIR A65	Vumii Open Frame OFC
Tipo de detector	Detector de fotones	Microbolómetro	Microbolómetro
Rango espectral (μm)	2 – 5.7	8 -14	7.5 – 14.5
Rango de temperatura	[-40 – 2000] °C	[-25 - 135] °C	
Tamaño de píxel / Resolución	10 μm (1,280 × 1,024)	15 μm (640x480)	17 μm (640x480)
Sensibilidad térmica / NETD	< 0.03 K	< 0.05 K	< 0.07 K
Enfriamiento	Si	No	No
Dimensiones (mm)	235 × 120 × 160	200 × 100 × 90	71 x 51 x 84
Peso (Kg)	4.000	0.200	0.358

2.5. Calibración en termografía cuantitativa

Como vimos en la sección 2.3, la termografía cualitativa nos entrega la temperatura absoluta, y para conseguir una medida de temperatura muy cercana a la realidad se debe calibrar el sistema. Existen varias formas de calibrarlo como por ejemplo conocer todos las variables de la ecuación 9, la cual nos indica la temperatura por píxel, sin embargo, esta podría volverse muy difícil de realizar, debido a que no siempre se conocen los valores de todas variables de la ecuación [11].

Otro método usado en la termografía, es utilizar el valor de la emisividad del material para encontrar una relación aproximada de su temperatura y la radiación captada por el detector [21], el problema está en que no siempre se conoce el valor de la emisividad del material, para

esto, en la tabla 5 se describen algunos métodos para cambiar la emisividad de la superficie del cuerpo a medir [26].

Tabla 5: Métodos para calibrar la medición de temperatura con termografía infrarroja [26]

Método	Equipo necesario	Idea detrás del método	Ventajas	Desventajas
Colocar cinta adhesiva sobre un cuerpo	Cinta adhesiva	Emisividad de la cinta conocida por pruebas de laboratorio	No destructiva Removible	No muy buen contacto térmico para superficies rugosas
Colocar pintura, líquido corrector, etc.	Pintura	Emisividad de la pintura conocida por pruebas de laboratorio	No destructiva, buen rendimiento para superficies rugosas.	Pintura difícil de remover
Termopar de contacto	Termopar	Medición de temperatura puntual con la sonda de contacto	No destructiva	Consumo de tiempo para estabilizar la medición.
Perforación de agujeros	Taladro eléctrico	Crecimiento de emisividad conocido por el efecto de cavidad	Se consigue una emisividad muy alta	Destructiva, independientemente de la superficie o estructura del objeto

2.5.1. Temperatura de referencia

Los sistemas de detección de fiebre por termografía infrarroja comerciales utilizan un método de calibración distinto a los mencionados anteriormente, pues añaden una fuente de temperatura de referencia dentro del campo de visión para tener un punto de partida. Las imágenes térmicas entregadas por la cámara indican una diferencia de temperatura entre cada píxel, pero no se sabe si el valor es el real. La referencia sirve para mover todas las temperaturas medidas, manteniendo sus diferencias, a la temperatura que les corresponde [9], [21], [22], [26].

La fuente de referencia debe ser un material conocido y también se debe conocer su temperatura, por lo que se usa otro tipo de sensor de temperatura para tener la medida real, luego, en la unidad de control del sistema térmico se identifican los píxeles de la referencia y se hace un arreglo en las temperaturas. [23]–[25].

2.5.2. Radiador de cuerpo negro

Un tipo de fuente de temperatura de referencia es el radiador de cuerpo negro, el cual autorregula su temperatura, tiene una intensidad de radiación lo suficientemente fuerte para ser identificada por la cámara, cuenta con un sistema de comunicación y se conoce su emisividad, la cual tiene valores desde 0.9500 hasta 0.9999 lo que permite aproximarlos como un cuerpo negro ideal [26], [27].

El tener una aproximación a un cuerpo negro, a pesar de tener materiales de emisividad mucho menor, se consigue por el efecto cavidad, el cual es descrito con más detalle por la figura 9. El efecto cavidad permite reducir al máximo posible la potencia de las ondas de radiación térmica que inciden sobre él, debilitando las ondas cada vez que son reflejadas por las paredes de la cavidad interior; así, se consigue que la potencia reflejada resultante sea muy reducida como para considerar que se trata de un cuerpo negro [19], [23].

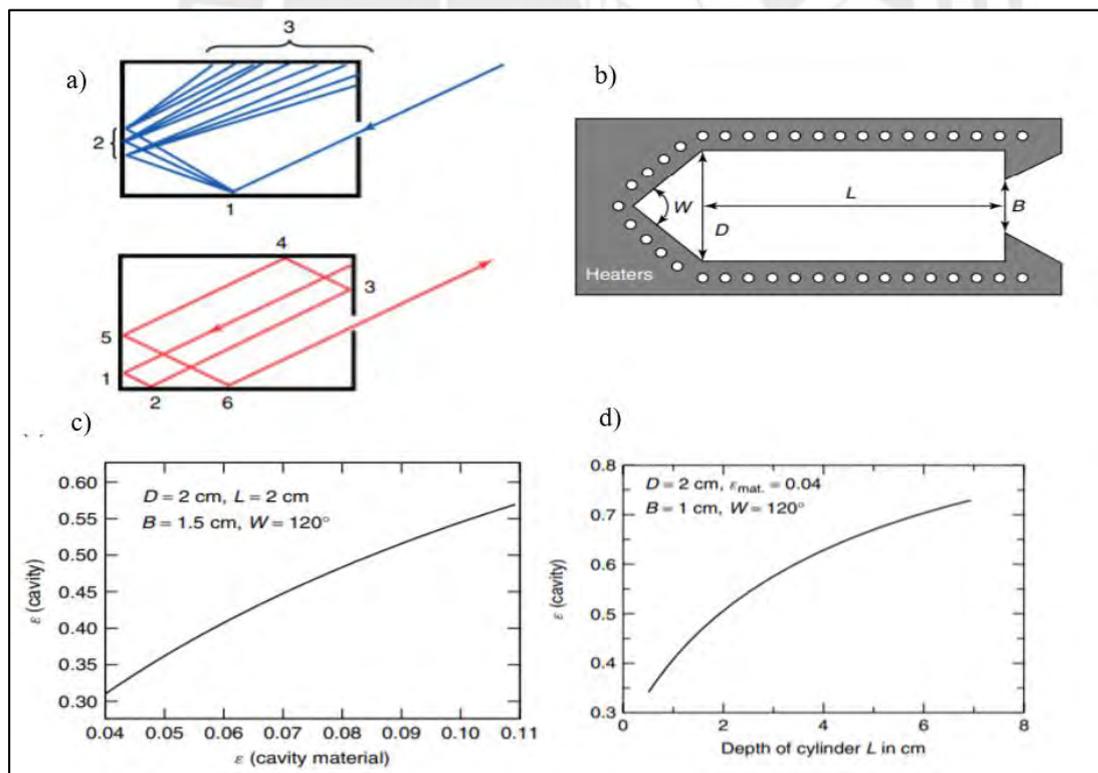


Figura 9: Efecto cavidad en un radiador de cuerpo negro. (a) Los rayos infrarrojos, en azul la trayectoria que un rayo puede dar debido a las reflexiones, dando como resultado el rayo rojo, (b) el modelo físico de un tipo de cavidad. (c) Los resultados de la medida de emisividad del modelo de radiador en función a la emisividad de la superficie de la cavidad y (d) en función de la profundidad L . [26]

2.6. Termografía infrarroja aplicada a la detección de fiebre con termografía infrarroja

Uno de los campos de aplicación de la termografía cuantitativa es la medicina en donde permite detectar enfermedades como el cáncer de mama, detectar tumores, detectar la presencia de fiebre y alguna otra anomalía. A continuación se describen los conceptos a tener en cuenta para aplicar la termografía cuantitativa en la detección de fiebre.

2.6.1. Características de la fiebre

Se conoce como fiebre al aumento de la temperatura corporal por encima de la temperatura normal ($36\text{ }^{\circ}\text{C}$), funciona como mecanismo de defensa ante la presencia de alguna enfermedad. Se entiende como temperatura corporal a la temperatura de la sangre y es regulada por el hipotálamo el cual utiliza hormonas (tiroxina y epinefrina) y al sistema nervioso (actividad muscular, vasodilatación y vasoconstricción) [23], [24].

La OMS considera fiebre cuando una persona presenta una temperatura corporal superior a $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la figura 10 podemos ver el ciclo de temperatura de una persona con fiebre desde su inicio hasta el final, al inicio aumenta gradualmente hasta llegar a una meseta y al final tiene una bajada similar [5].

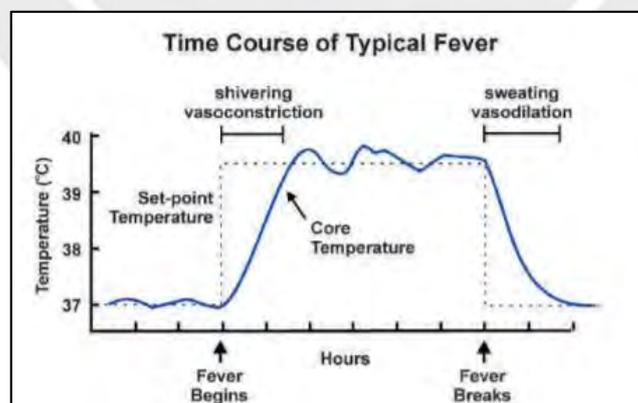


Figura 10: Temperatura corporal en función del tiempo de una persona con fiebre [23]

Los sistemas de detección de fiebre por termografía infrarroja, en primera instancia captan la temperatura de la piel, la cual puede ser muy diferente a la temperatura de la sangre debido a las condiciones ambientales, además, cuando se inicia el periodo de fiebre pueden

generar falsos negativos debido a la subida de temperatura gradual como se ve en la figura 10, de igual forma al terminar el periodo puede generar falsos positivos [23].

2.6.2. Detección de rostros

Para detectar la fiebre se debe hacer una estimación de la temperatura corporal y el rostro es una de las zonas del cuerpo en donde la piel tiene una temperatura muy parecida a la temperatura de la sangre [24]. Para poder usar los pixeles correspondientes al rostro de las personas a evaluar, se debe detectar, por software, el rostro de la persona dentro de la imagen térmica [22], [23].

Existe una infinidad de algoritmos que se usan para detectar rostros, cada programador puede añadirle una funcionalidad distinta dependiendo a la aplicación que se va a utilizar. Los algoritmos de detección de rostros se pueden dividir clasificar según el método con el cual logran la detección, en la tabla 6 se encuentra la descripción de los cuatro grupos según el tipo de método [30], [31].

Tabla 6: Clasificación de métodos de detección de rostros

Tipo de método	Descripción
Métodos Basados en conocimiento	Usan reglas predeterminadas basadas en el conocimiento humano para la detección del rostro
Métodos de enfoque a la invariabilidad característica	Tienen como objetivo encontrar rasgos de la estructura facial resistentes al enfoque o iluminación
Método de comparación de plantillas	Utilizan plantillas de rostros pregrabadas para determinar la presencia
Métodos basados en la apariencia	Aprenden los modelos de rostros a partir de un conjunto de imágenes de rostros en formación

También, los algoritmos de reconocimiento facial se clasifican en dos familias: algoritmos basados en plantillas rígidas y algoritmos basados en métodos de partes deformables [30].

Los algoritmos basados en plantillas tienen una base de datos con el cual comparan la imagen para encontrar un rostro dentro de ella, se pueden clasificar en algoritmos por variación de *boosting* o en algoritmos de redes neuronales convolucionales. El *boosting* es un método de aprendizaje que ayuda a mejorar el rendimiento de clasificadores y tienen bajo costo computacional [32], [33].

Los algoritmos basados en métodos de partes deformables, tratan de buscar partes del rostro como ojos, nariz, etc. y luego buscan una relación entre ellos para identificar si es un rostro o no. Existen dos tipos, los que utilizan supervisores fuertes y débiles, los cuales se diferencian en el tamaño del cuadro que se analiza por vez y del margen de error que se asume, por lo general este tipo de algoritmos tienen un alto gasto computacional.

En la tabla 7 se muestra una comparación entre los tipos de algoritmos mencionados. Se observa que los algoritmos basados en boosting que utilizan filtros clasificadores simples se pueden usar en aplicaciones a tiempo real, el algoritmo Viola Jones es un ejemplo de ello [30].

Tabla 7: Comparación de familias de algoritmos de reconocimiento facial [30]

Familia de métodos	de	Efecto de Acotación	Datos de entrenamiento	Tiempo de entrenamiento	Tiempo de prueba
Basados en Boosting	Simple filtros característicos Haar	Medio	Largo	Medio / Largo	Tiempo real
	Características de canal	Medio	Largo	Medio / Largo	Cercano a tiempo real
DPMs (Deformable Part-based Model)	Supervisión débil	Medio	Medio	Medio	Cercano a tiempo real
	Supervisión fuerte	Largo	Medio	Medio	Cercano a tiempo real
CNN (Convolutional Neural Network)	Red neuronal convolucional profunda – (DCNN)	Medio	Largo	Largo	Cercano a tiempo real

2.6.3. Algoritmo Viola - Jones

El algoritmo Viola-Jones es considerado como uno de los métodos de detección de rostro más potentes en la actualidad, a pesar que fue publicado en el 2001. Este algoritmo es capaz de detectar rostros a tiempo real y con el mínimo gasto computacional posible lo que hace muy fácil de usar en aplicaciones con procesadores pequeños. Se debe mencionar que si bien es muy utilizado en la detección de rostros, este algoritmo sirve para detectar cualquier otro tipo de objeto, dependiendo de la base de datos de referencia [30], [34].

Es famoso por que introdujo un método que consta de 3 partes simples para la detección de objetos, las cuales se muestran en la figura 11. La primera es una representación de la imagen llamada imagen integral, la cual es un procesamiento intermedio en donde cada pixel (x,y) de la imagen es la suma del recuadro de pixeles superior izquierdo, lo que permite un posterior procesamiento mucho más rápido y sin un costo computacional considerable. La segunda parte, se trata de un proceso de aprendizaje basado en Adaboost² que selecciona un pequeño número de características visuales críticas de un conjunto mayor y produce un clasificador extremadamente eficiente, usando filtros de segmentación Haar. Finalmente, la tercera parte viene dada por la combinación de clasificadores simples en cascada que permite descartar rápidamente las regiones de fondo de la imagen y, al mismo tiempo, dedicar más cálculos a regiones en donde podría estar el objeto a detectar [30], [34].

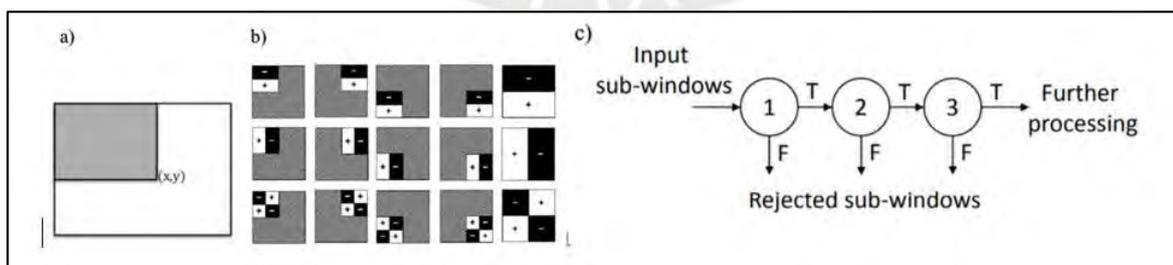


Figura 11: Las 3 partes principales del algoritmo de detección de objetos de Viola Jones, donde a) es la imagen integral, b) los filtros de segmentación Haar y c) los clasificadores en cascada [34].

² Adaboost es la abreviatura de Adaptive Boosting, un meta algoritmo de aprendizaje automático muy utilizado en detección de objetos [30]

2.6.4. Región de interés para la estimación de la temperatura corporal

Como la fiebre es el aumento de la temperatura corporal, es decir, la temperatura de la sangre, no es posible medirla directamente. Al usar la termografía para esto, se deben seleccionar los pixeles correspondientes a las regiones del rostro que nos van a dar la información necesaria para realizar una estimación adecuada. A estos pixeles se les conoce como región de interés (ROI – “Region of Interest”).

Tradicionalmente se utiliza a la frente como ROI, pero se ha demostrado que puede presentar muchos errores debido a las condiciones ambientales ya que no hay arterias centrales cercanas [24]. Se han realizado diversos estudios para determinar la mejor región de interés, donde se han probado distintas regiones del rostro como la boca, cachetes, nariz, ojos y frente, en conjunto todas aportan información para una mejor aproximación. En la figura 12 se muestran los resultados de tres diferentes ROI utilizados, en donde se hizo la comparación con la medida de temperatura del oído con un equipo certificado, arrojando como resultado que al utilizar los pixeles de la frente, boca y cachetes como ROI, se tiene una mejor correlación que los otros métodos [22], [24].

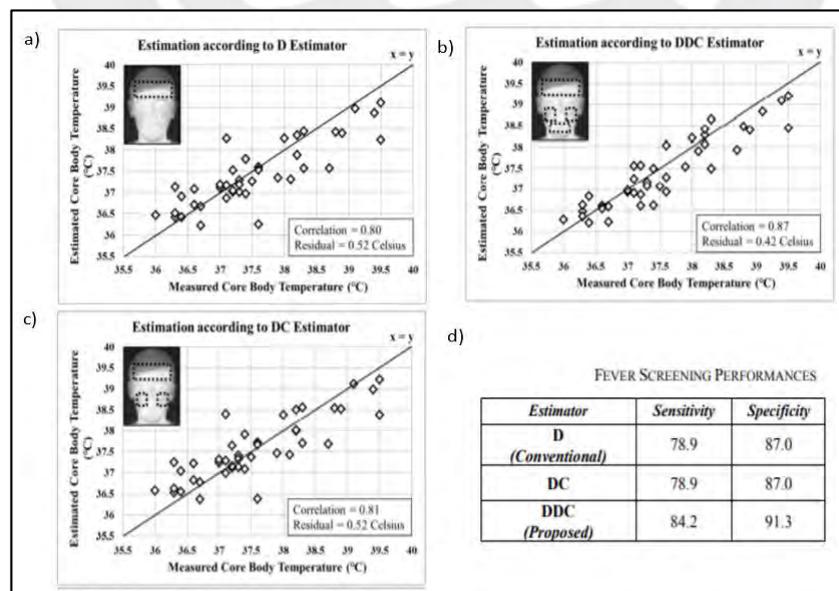


Figura 12: Resultados de la estimación de la temperatura corporal de tres ROI distintos donde a), b) y c) son la muestra la correlación con la temperatura real y d) la tabla de resultados de sensibilidad y especificidad de cada estimador. [24]

2.7. Modelo del sistema de detección de fiebre propuesto

2.7.1. Diagrama general

El sistema de detección de personas con fiebre propuesto cuenta con el diagrama general, como se muestra en la figura 13, en donde están los componentes principales de hardware y los programas básicos necesarios de software.

La cámara térmica es el componente principal y tiene que tener dentro del campo de visión a la persona y a una referencia de temperatura, también debe estar conectada a un convertidor de señal analógica NTSC a una entrada digital con conector USB para la computadora.

La señal de temperatura de referencia viene a ser una medida de temperatura de uno o más puntos dentro del campo de visión de la cámara, para esto se necesita tener una superficie con un valor de emisividad conocido, lo cual vamos a lograr utilizando una pintura de alta emisividad, y un sensor de temperatura con un circuito acondicionador de señal que está por definir.

En cuanto al software, se necesita tener un programa que utilice el video proporcionado por la cámara térmica, detecte el rostro de la persona y en base al rostro obtener una estimación de la temperatura corporal usando el método de extracción de región a interés correspondiente.

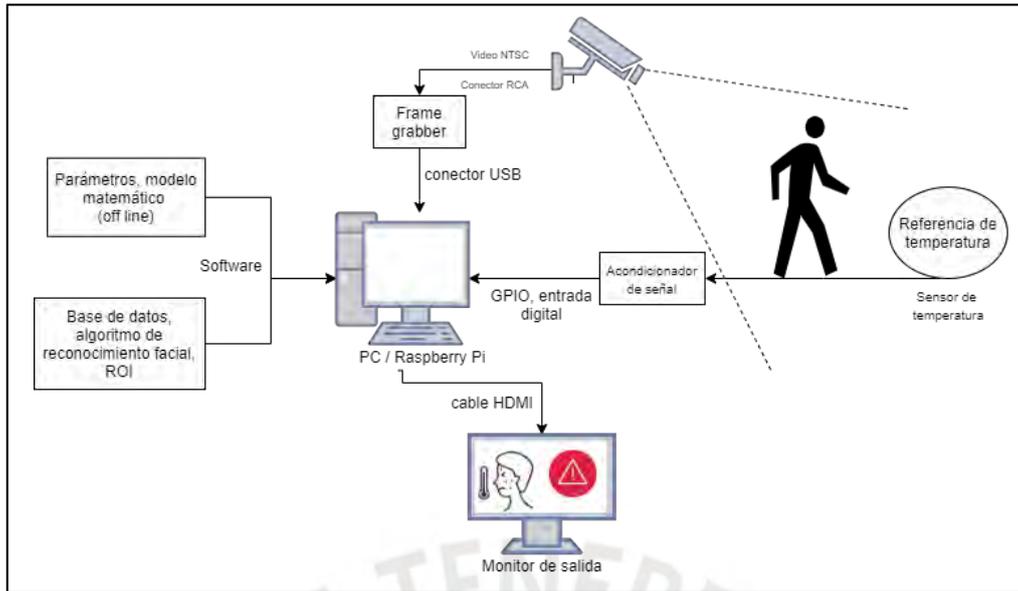


Figura 13: Esquema general del sistema de detección de personas con fiebre propuesto.

2.7.2. Diagrama de bloques funcional

Luego de conocer los conceptos teóricos se realiza el diagrama de bloques funcional básico para la detección de personas con fiebre el cual se muestra en la figura 14, en donde se encuentran los siguientes bloques:

1. Base de datos y modelo de reconocimiento facial: Este bloque corresponde al método a utilizar para la detección del rostro de las personas, en la sección 2.6.2 se explican los métodos existentes de los cuales se va a escoger un método basado en boosting, específicamente un algoritmo con base en el algoritmo de Viola-Jones, descrito en la sección 2.6.3.
2. Región de interés: Corresponde al programa que extrae el ROI descrito en la sección 2.6.4.
3. Temperatura de referencia: Corresponde a la fuente de temperatura de referencia dentro del campo de visión de la cámara descrito en la sección 2.5.
4. Modelo matemático y parámetros de temperatura: Es el modelo que va a seguir el software para realizar la calibración el cual fue descrito en la sección 2.2.

5. Comparación: corresponde al bloque final, el cual va a determinar si la persona tiene fiebre, se debe colocar la temperatura umbral para realizar la comparación.

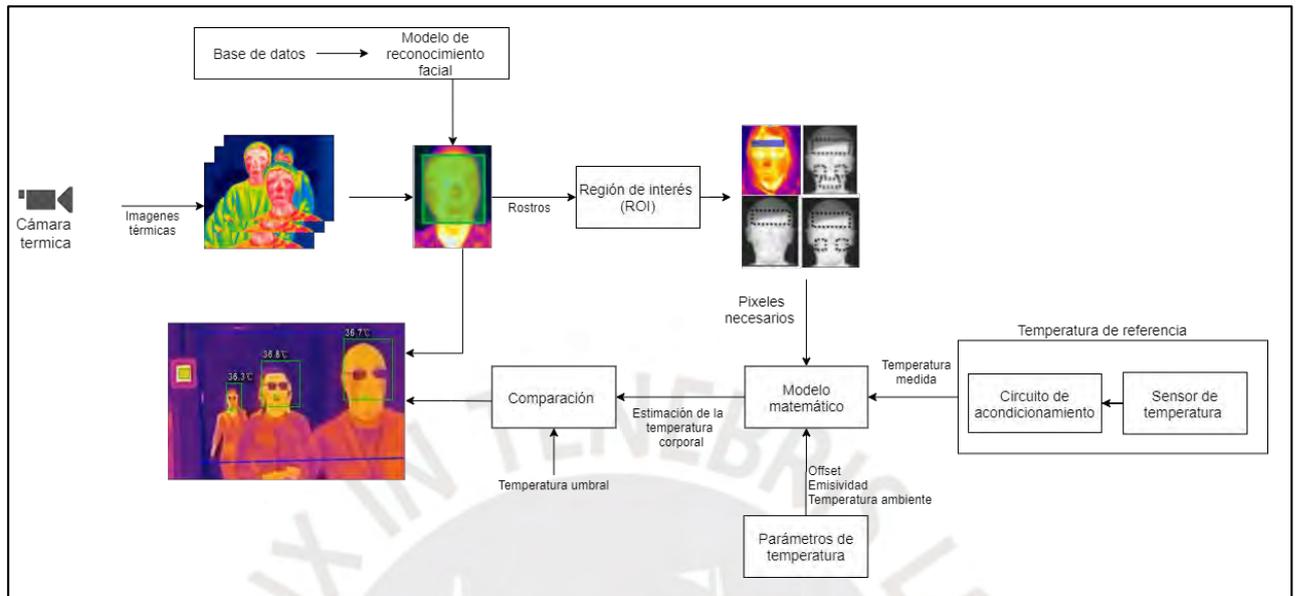


Figura 14: Diagrama de bloques de la solución propuesta.

Conclusiones

- Se puede concluir que la fiebre es el síntoma del COVID-19 que más incidencia tiene en las personas infectadas y además es el único que se puede medir por relacionarse con una magnitud física: la temperatura.
- Se concluye que el método más adecuado para identificar a personas con fiebre en lugares públicos es la termografía cuantitativa ya que entrega imágenes térmicas, calibradas, a tiempo real las cuales sirven determinar si las personas superan la temperatura umbral de la fiebre.
- En base a la revisión del marco teórico, se puede concluir que usar permanentemente una fuente de temperatura externa para calibrar la medida de temperatura de las imágenes térmicas, generadas por la cámara, asegura una correcta medición de temperatura y ayuda a reducir el porcentaje de detección errada.
- Se puede concluir que el algoritmo de Viola-Jones, si bien es una técnica antigua, aún se considera adecuada para implementarse en esta solución debido a que utiliza la detección con la imagen a escala de grises (o térmica), es muy sencilla de usar y genera un costo computacional muy reducido a comparación de otros métodos de detección de rostros.
- La región de interés más adecuada para realizar una correcta estimación de temperatura corporal por medio de termografía infrarroja, es un promedio entre los valores máximos de los píxeles correspondientes a los ojos, boca y frente. Para esto primero se debe hacer una detección de rostros en imágenes térmicas.

Recomendaciones y trabajos futuros

- Se recomienda revisar e investigar estándares internacionales de temperatura para poder validar que las medidas realizadas sean las correctas.
- Se recomienda identificar el valor de emisividad del material de la superficie de la fuente de temperatura de referencia, para se puede usar materiales de bajo coste como cinta o pintura de alta emisividad.
- Se recomienda realizar una caracterización y calibración de la cámara y de los sensores de temperatura a utilizar para conocer la relación de temperatura que tienen.
- Se recomienda utilizar el software Matlab para desarrollar la parte de software del detector de personas con fiebre ya que posee herramientas adecuadas para procesar imágenes.
- Se recomienda realizar la programación del software usando funciones para cada bloque identificado y probarlos por separado antes de unir todo el programa.

Referencias bibliográficas

- [1] Organización Mundial de la Salud, «Alocución de apertura del Director General de la OMS en la rueda de prensa sobre la COVID-19 celebrada el 11 de marzo de 2020», mar. 11, 2020. <https://www.who.int/es/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020> (accedido may 20, 2020).
- [2] Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU), «Coronavirus COVID-19». <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6> (accedido may 20, 2020).
- [3] «Ministra Hinojosa pidió tener confianza en el Sistema de Salud tras confirmarse primer caso de coronavirus en Perú», *INSTITUTO NACIONAL DE SALUD*. <http://web.ins.gob.pe/es/prensa/noticia/ministra-hinojosa-pidio-tener-confianza-en-el-sistema-de-salud-tras-confirmarse> (accedido may 20, 2020).
- [4] «Covid 19 en el Perú - Ministerio del Salud». https://covid19.minsa.gob.pe/sala_situacional.asp (accedido may 20, 2020).
- [5] CNA graphic, «Typical symptoms of COVID-19 - Focus Taiwan». <https://focustaiwan.tw/society/202003025001> (accedido may 20, 2020).
- [6] Organización de las Naciones Unidas, «El turismo está en cuarentena por el coronavirus: el 100% de los países ha impuesto restricciones a los viajes», *Noticias ONU*, may 11, 2020. <https://news.un.org/es/story/2020/05/1474102> (accedido may 12, 2020).
- [7] M. R. Tay, Y. L. Low, X. Zhao, A. R. Cook, y V. J. Lee, «Comparison of Infrared Thermal Detection Systems for mass fever screening in a tropical healthcare setting», *Public Health*, vol. 129, n.º 11, pp. 1471-1478, nov. 2015, doi: 10.1016/j.puhe.2015.07.023.

- [8] A. V. Nguyen *et al.*, «Comparison of 3 Infrared Thermal Detection Systems and Self-Report for Mass Fever Screening», *Emerg Infect Dis*, vol. 16, n.º 11, pp. 1710-1717, nov. 2010, doi: 10.3201/eid1611.100703.
- [9] J. Fischer, «Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement», *Opt. Eng.*, vol. 39, n.º 9, p. 2535, sep. 2000, doi: 10.1117/1.1287832.
- [10] FLIR, «Utilice materiales de bajo coste para aumentar la emisividad del objetivo». <https://www.flir.es/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-target-emissivity/> (accedido may 17, 2020).
- [11] M. Rodríguez Martín, S. Lagüela Lopez, D. Gonzalez Aguilera, y L. Diaz Vilariño, «TERMOGRAFÍA ACTIVA, PARTE 1: ENFOQUE TEÓRICO DE LA CAPTACIÓN INFRARROJA, PROCESAMIENTO DE DATOS Y CLASIFICACION», *DYNAIL*, vol. 90, n.º 3, pp. 456-460, 2015, doi: 10.6036/7556.
- [12] Y. Yan *et al.*, «The First 75 Days of Novel Coronavirus (SARS-CoV-2) Outbreak: Recent Advances, Prevention, and Treatment», *IJERPH*, vol. 17, n.º 7, p. 2323, mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17072323.
- [13] J. Ma, X. Niu, X. Liu, Y. Wang, T. Wen, y J. Zhang, «Thermal Infrared Imagery Integrated with Terrestrial Laser Scanning and Particle Tracking Velocimetry for Characterization of Landslide Model Failure», *Sensors*, vol. 20, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: 10.3390/s20010219.
- [14] E. Y. -K. Ng, «Is thermal scanner losing its bite in mass screening of fever due to SARS?», *Med Phys*, vol. 32, n.º 1, pp. 93-97, ene. 2005, doi: 10.1118/1.1819532.
- [15] R. Gade y T. B. Moeslund, «Thermal cameras and applications: a survey», *Machine Vision and Applications*, vol. 25, n.º 1, pp. 245-262, ene. 2014, doi: 10.1007/s00138-013-0570-5.

- [16] B. Gutschwager, D. Taubert, y J. Hollandt, «Analysis of Reference Sources for the Characterization and Calibration of Infrared Cameras», *Int J Thermophys*, vol. 36, n.º 2-3, pp. 303-314, mar. 2015, doi: 10.1007/s10765-014-1767-1.
- [17] Dahua, «Datasheet HumanBody Temperature Measurement Solution», 2020. https://us.dahuasecurity.com/wp-content/uploads/2020/03/Dahua_Datasheet_HumanBody_TemperatureMeasurement_Solution_v001_003.pdf (accedido may 18, 2020).
- [18] M. R. Tay, Y. L. Low, X. Zhao, A. R. Cook, y V. J. Lee, «Comparison of Infrared Thermal Detection Systems for mass fever screening in a tropical healthcare setting», *Public Health*, vol. 129, n.º 11, pp. 1471-1478, nov. 2015, doi: 10.1016/j.puhe.2015.07.023.
- [19] J. B. Mejia y R. L. Varona, «Calibración de Cámara Termográfica Fluke TI-32», *Scientia et Technica*, vol. 19, n.º 1, pp. 59-66, mar. 2014.
- [20] A. Somboonkaew *et al.*, «Mobile-platform for automatic fever screening system based on infrared forehead temperature», en *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, jul. 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/OECC.2017.8114910.
- [21] A. Jain, D. Sahoo, B. S. R. Sarvani, K. Sukumar, R. Gupta, y A. Boratkar, «Calibration and characterization of a COTS thermal camera for space», en *2016 IEEE Aerospace Conference*, mar. 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/AERO.2016.7500657.
- [22] J.-W. Lin, M.-H. Lu, y Y.-H. Lin, «A Thermal Camera Based Continuous Body Temperature Measurement System», en *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, oct. 2019, pp. 1681-1687, doi: 10.1109/ICCVW.2019.00208.

- [23] Y. H. Tan, C. W. Teo, E. Ong, L. B. Tan, y M. J. Soo, «Development and deployment of infrared fever screening systems», en *Thermosense XXVI*, abr. 2004, vol. 5405, pp. 68-78, doi: 10.1117/12.542993.
- [24] N. Silawan, K. Kusakame, K. J. Kek, y W. S. Kuan, «A Novel Environment-Invariant Core Body Temperature Estimation for High Sensitivity and Specificity Fever Screening», en *2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, jul. 2018, pp. 1612-1615, doi: 10.1109/EMBC.2018.8512541.
- [25] Hik Vision, «Blackbody Scheme for fever screening», 2020. [https://www.hikvision.com/mtsc/uploads/product/accessory/\[Public\]Blackbody_Scheme_For_Fever_Screening\(1\).pdf](https://www.hikvision.com/mtsc/uploads/product/accessory/[Public]Blackbody_Scheme_For_Fever_Screening(1).pdf) (accedido may 18, 2020).
- [26] M. Vollmer y K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [27] R. Schacht, Ch. Gerner, T. Nowak, D. May, B. Wunderle, y B. Michel, «Design and development of a miniaturized black body device for in-situ IR-camera calibration», en *2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Las Vegas, NV, USA, jun. 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITHERM.2010.5501265.
- [28] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela-López, D. González-Aguilera, y L. Díaz-Vilariño, «TERMOGRAFÍA ACTIVA. Parte 2. Desarrollo y aplicaciones en ingeniería e industria», *DYNA - Ingeniería e Industria*, vol. 90, n.º 6, pp. 568-572, dic. 2015, doi: 10.6036/7596.
- [29] R. Bhan, R. Saxena, C. Jalwani, y S. Lomash, «Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques», *DSJ*, vol. 59, n.º 6, pp. 580-589, nov. 2009, doi: 10.14429/dsj.59.1562.

- [30] S. Zafeiriou, C. Zhang, y Z. Zhang, «A survey on face detection in the wild: Past, present and future», *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 138, pp. 1-24, sep. 2015, doi: 10.1016/j.cviu.2015.03.015.
- [31] Š. Mr'cek, J. V'na, M. Drahanský, R. Dvor'k, y S. N. Yanushkevich, «Thermal Face Recognition: A Fusion Approach», en *2012 Third International Conference on Emerging Security Technologies*, sep. 2012, pp. 39-42, doi: 10.1109/EST.2012.24.
- [32] N. C. Oza, «Online bagging and boosting», en *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, oct. 2005, vol. 3, pp. 2340-2345 Vol. 3, doi: 10.1109/ICSMC.2005.1571498.
- [33] C. Dimitrakakis y S. Bengio, «Boosting word error rates», en *Proceedings. (ICASSP '05). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005.*, mar. 2005, vol. 5, p. v/501-v/504 Vol. 5, doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416350.
- [34] P. Viola y M. Jones, «Robust real-time face detection», en *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, jul. 2001, vol. 2, pp. 747-747, doi: 10.1109/ICCV.2001.937709.
- [35] «ISO/TR 13154:2017(en), Medical electrical equipment — Deployment, implementation and operational guidelines for identifying febrile humans using a screening thermograph». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:13154:ed-2:v1:en> (accedido oct. 19, 2020).
- [36] P. Ghassemi, T. J. Pfefer, J. P. Casamento, R. Simpson, y Q. Wang, «Best practices for standardized performance testing of infrared thermographs intended for fever screening», *PLoS ONE*, vol. 13, n.º 9, pp. 1-24, sep. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0203302.
- [37] G. Machin, R. Simpson, y M. Broussely, «Calibration and validation of thermal imagers», *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 6, n.º 2, pp. 133-147, dic. 2009, doi: 10.3166/qirt.6.133-147.

- [38] *Op Amps for Everyone: Design Reference*, 1ST ed. Texas Instruments, 2000.
- [39] «Overview | Analog Circuits | Design Tools & Simulation | TI.com». <https://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/analog-circuits/overview.html> (accedido oct. 22, 2020).
- [40] Instituto Nacional de Metrología de Colombia, «Guía para la calibración de termómetros de radiación», 2019. https://www.inm.gov.co/nueva/wp-content/uploads/2019/12/guia_para_la_calibracion_de_termometros_de_radicacion.pdf (accedido oct. 17, 2020).
- [41] K. Zhang, Z. Zhang, Z. Li, y Y. Qiao, «Joint Face Detection and Alignment Using Multitask Cascaded Convolutional Networks», *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 23, n.º 10, pp. 1499-1503, oct. 2016, doi: 10.1109/LSP.2016.2603342.
- [42] A. Chohra, «Face Detection on Grayscale and Color Images using Combined Cascade of Classifiers», Accedido: oct. 17, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/32819355/Face_Detection_on_Grayscale_and_Color_Images_using_Combined_Cascade_of_Classifiers.
- [43] «Face Detection and Tracking Using Live Video Acquisition - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina». <https://la.mathworks.com/help/vision/ug/face-detection-and-tracking-using-live-video-acquisition.html> (accedido oct. 22, 2020).