



UNIVERSIDAD  
DE  
CÓRDOBA

INSTITUTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES DISTRIBUIDAS

# **DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE TEMPERATURA DE PERSONAS EN AMBIENTES CLIMATIZADOS**

**D. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ LOZANO**

Trabajo para optar al  
Máster en Energías Renovables Distribuidas

Profesores Supervisores:

**DR. JOAQUÍN OLIVARES BUENO**

**DR. MANUEL RUÍZ DE ADANA SANTIAGO**

Córdoba, Junio, 2017

© 2017, Francisco Javier Rodríguez Lozano





UNIVERSIDAD  
DE  
CÓRDOBA

INSTITUTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES DISTRIBUIDAS

# **DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE TEMPERATURA DE PERSONAS EN AMBIENTES CLIMATIZADOS**

**D. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ LOZANO**

Proyecto presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**DR. JOAQUÍN OLIVARES BUENO**

**DR. MANUEL RUÍZ DE ADANA SANTIAGO**

Para completar las exigencias del Máster  
en Energías Renovables Distribuidas

Córdoba, Junio, 2017



## AUTORIZACIÓN DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

D. Joaquín Olivares Bueno, Profesor Contratado Doctor, del Departamento de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica, de la Universidad de Córdoba y D. Manuel Ruíz de Adana Santiago, Titular de Universidad del Departamento de Química, Física y Termodinámica Aplicada de la Universidad de Córdoba, autorizan a D. Francisco Javier Rodríguez Lozano con DNI 80158257-Z, a presentar el trabajo titulado "DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE TEMPERATURA DE PERSONAS EN AMBIENTES CLIMATIZADOS", como Trabajo Fin de Máster del Programa Oficial de Energías Renovables Distribuidas de la Universidad de Córdoba.

El Trabajo Fin de Máster se presenta con carácter de Trabajo De INVESTIGACIÓN.

Asimismo solicitan sea admitido para su defensa en la Convocatoria:	
Curso: 2016/2017	
Ordinaria:      Junio/Julio <input checked="" type="checkbox"/> Septiembre <input type="checkbox"/>	Extraordinaria:      Diciembre <input type="checkbox"/>
<b>Nota:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Convocatoria ordinaria, llamamiento de Julio:<ul style="list-style-type: none"><li>a. Solicitud de defensa de TFM: hasta el 02 de Julio</li><li>b. Exposición y defensa de TFM: entre el 12 y el 16 de Julio</li></ul></li> <li>• Convocatoria Ordinaria, llamamiento de Septiembre:<ul style="list-style-type: none"><li>a. Solicitud de defensa de TFM: hasta el 11 de Septiembre</li><li>b. Exposición y defensa de TFM: entre el 18 y el 22 de Septiembre</li></ul></li> <li>• Convocatoria Extraordinaria, llamamiento de Diciembre:<ul style="list-style-type: none"><li>a. Solicitud de defensa de TFM: hasta el 24 de Noviembre</li><li>b. Exposición y defensa de TFM: entre el 11 y el 15 de Diciembre.</li></ul></li></ul>	



## INFORME DEL DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Como Directores de este Trabajo de Fin de Máster, indicamos algunos aspectos del trabajo que ha desarrollado el alumno Francisco Javier Rodríguez Lozano durante estos meses.

El alumno ha realizado un trabajo intensivo de desarrollo de algoritmos matemáticos de procesamiento de imágenes infrarrojas correspondientes a caras de personas que permitan extraer de las imágenes información morfológica y de temperatura superficial tal y como se describen en este documento.

Durante este periodo el alumno se ha formado en técnicas de procesamiento de imágenes, así como en el tratamiento de matrices de temperatura procedentes de imágenes infrarrojas, en línea con lo requerido por los objetivos del Trabajo de Fin de Máster.

Este trabajo ha servido para alcanzar resultados en el marco de los objetivos planteados en este Trabajo de Fin de Máster. La tutorización del trabajo del alumno a lo largo de estos meses ha sido continuada y consideramos que el alumno ha dedicado tiempo y esfuerzo al desarrollo del presente trabajo.

Por todo ello nuestra valoración global es muy favorable, esperando que el resultado de este trabajo sirva para culminar la formación del alumno en el marco del Máster de Energías Renovables.

Córdoba, a 12 de Junio de 2017

El Director

El Director

Fdo: D. Joaquín Olivares Bueno

Fdo: D. Manuel Ruíz de Adana Santiago





## PROPUESTA DE TRIBUNAL PARA EL TRABAJO FIN DE MASTER

<b>Profesores: D. Joaquín Olivares Bueno</b> <b>D. Manuel Ruíz de Adana Santiago</b> <b>Email: el1olbuj@uco.es</b> <b>qf1rusam@uco.es</b>	
<b>Departamentos: Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica.</b> <b>Química, Física y Termodinámica Aplicada.</b>	
Como tutores del Trabajo Fin de Máster especificado a continuación, se propone a la Comisión Académica del Máster los siguientes miembros para el Tribunal de dicho trabajo: <b>Título del TFM: Detección automática de temperatura de personas en ambientes climatizados.</b>	
<b>Autor: Francisco Javier Rodríguez Lozano.</b>	
<b>Perfil: Investigador.</b>	
<b>TRIBUNAL PROPUESTO</b>	
<b>Profesores del máster</b>	
1	María Pilar Dorado Pérez.
2	Sara Pinzi.
3	Adolfo Peña Acevedo.
<b>Profesores externos al máster</b>	
4	José Manuel Palomares Muñoz.
5	Juan Carlos Gámez Granados.
Córdoba, a 12 de Junio de 2017. Los Tutores del TFM:	
Fdo: D. Joaquín Olivares Bueno                      Fdo: D. Manuel Ruíz de Adana Santiago	
<b>Normativa de referencia:</b> Artículo 9 de la <b>NORMATIVA ACADÉMICA BÁSICA PARA EL DESARROLLO DE LOS MÁSTERES OFICIALES</b> Aprobada por Consejo de Gobierno de 2 de marzo de 2007 y modificaciones posteriores. <i>“Los trabajos de fin de Máster serán expuestos y defendidos en acto público ante un tribunal para su evaluación y calificación. Este tribunal será aprobado por la Comisión de Estudios de Postgrado, a propuesta del Consejo Académico del Máster y estará compuesto por tres o cinco miembros doctores, de los que al menos uno de ellos será externo al Máster, no formando parte del mismo, los profesores que hayan dirigido los trabajos objeto de evaluación. Si por alguna causa debidamente justificada, un director de trabajo de fin de Máster debiera formar parte del tribunal de estos trabajos, será sustituido en el proceso de evaluación del trabajo dirigido. parte del tribunal de estos trabajos, será sustituido en el proceso de evaluación del trabajo dirigido”.</i>	



## DEDICATORIA

*Dedicado en memoria de mi padrino  
Jacinto Pérez Ventura y de mi abuelo  
Pedro Lozano Moreno.*

*Dedicado también a mis padres por su  
apoyo y disposición en todo momento.*



## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía con referencia: P11-TIC-7462.

Expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de proyecto Joaquín y Manuel, por sus ánimos, su dedicación y su comprensión.

A mis compañeros y amigos del grupo de Investigación Prinia de la Universidad de Córdoba.

Gracias a todos.



## INDICE GENERAL

Pág.

AUTORIZACIÓN DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER .....	i
INFORME DEL DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER .....	iii
PROPUESTA DE TRIBUNAL PARA EL TRABAJO FIN DE MASTER.....	v
DEDICATORIA .....	vii
AGRADECIMIENTOS .....	ix
INDICE DE TABLAS .....	xv
INDICE DE FIGURAS.....	xvii
RESUMEN .....	xix
ABSTRACT.....	xxi
NOMENCLATURAS.....	xxiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 El estado actual de la tecnología .....	1
1.2 La eficiencia energética y el consumo energético .....	2
1.3 Objetivos propuestos por Europa .....	2
1.4 Marco donde se encuentra el presente proyecto.....	3
2 ESTADO DEL ARTE .....	5
3 OBJETIVOS .....	9
4 METODOLOGÍA.....	11
4.1 Planteamiento del problema .....	11
4.2 Método propuesto.....	13
4.2.1 Adquisición de imágenes .....	13
4.2.2 Umbralización de imágenes .....	14
4.2.3 Binarización .....	15

4.2.4	Cálculo de elipses .....	15
4.2.5	Rotación y corte de elipses .....	16
4.2.6	Detección de ojos.....	18
4.2.6.1	Personas con gafas.....	18
4.2.6.2	Personas sin gafas.....	20
4.2.7	Obtención de la región de interés .....	21
4.2.7.1	Hallar M1' basado en las cejas de una persona.....	22
4.2.7.2	Hallar M1' por aproximación.....	23
4.2.8	Obtención de la temperatura media y corrección de temperaturas .....	24
4.3	Diseño de experimentos .....	25
4.3.1	Instrumentos y equipos utilizados .....	25
4.3.2	Experimentos sobre distancias y tiempo de calentamiento.....	26
4.3.3	Experimentos sobre calibración de temperaturas .....	27
4.3.4	Experimentos sobre morfología y obtención de temperatura .....	29
4.3.4.1	Caso de estudio 1: Persona sin barba y sin gafas.....	30
4.3.4.2	Caso de estudio 2: Persona sin barba y con gafas.....	31
4.3.4.3	Caso de estudio 3: Persona con barba y sin gafas.....	31
4.3.4.4	Caso de estudio 4: Persona con barba y con gafas.....	31
4.3.4.5	Caso de estudio 5: Persona con objeto oclusivo. ....	32
5	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	33
5.1	Resultados de experimentos sobre distancias y tiempo de calentamiento. ....	33
5.2	Resultados de experimentos sobre calibración de temperaturas. ....	34
5.3	Resultados de experimentos sobre morfología y obtención de temperatura. ....	37
5.3.1	Resultados del caso de estudio 1: Persona sin barba y sin gafas. ....	37
5.3.2	Resultados del caso de estudio 2: Persona sin barba y con gafas. ....	39
5.3.3	Resultados del caso de estudio 3: Persona con barba y sin gafas. ....	41
5.3.4	Resultados del caso de estudio 4: Persona con barba y con gafas. ....	43
5.3.5	Resultados del caso de estudio 5: Persona con objeto oclusivo.....	45
5.4	Limitaciones.....	46
6	CONCLUSIONES .....	47
7	TRABAJOS FUTUROS .....	49
	REFERENCIAS .....	51



ANEXOS .....	53
ANEXO A : DATASHEET OPTRIS PI 160.....	55
ANEXO B : DATASHEET AM2302 DHT22.....	63
ANEXO C : RESULTADOS DE MEDICIONES DE TEMPERATURA DE LOS CASOS DE ESTUDIO .....	75



## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4-1: Instrumentos de medición de temperaturas utilizados.....	26
Tabla 5-1: Experimentos de distancia.....	33
Tabla 5-2: Errores diferentes tasas de refresco.....	35
Tabla 5-3: Casos del experimento 1.....	37
Tabla 5-4: Casos del experimento 2.....	39
Tabla 5-5: Casos del experimento 3.....	41
Tabla 5-6: Casos del experimento 4.....	43
Tabla 5-7: Casos del experimento 5.....	45
Tabla 5-8: Resumen de limitaciones.....	46



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Espectro electromagnético .....	1
Figura 1-2: Etiqueta de eficiencia energética.....	3
Figura 4-1: Esquema tradicional de control de temperatura .....	11
Figura 4-2: Esquema del sistema propuesto .....	12
Figura 4-3: Esquema general del método .....	13
Figura 4-4: Izq: Imagen en escala de grises. Dcha: histograma de la imagen .....	14
Figura 4-5: Izq: Imagen umbralizada. Dcha: Máscara binaria.....	15
Figura 4-6: Rotaciones de una persona en los diferentes ejes.....	16
Figura 4-7: Formación vectores u, v de la elipse .....	17
Figura 4-8: Imagen térmica de persona con gafas .....	18
Figura 4-9: Esquema del algoritmo de K-means .....	19
Figura 4-10: Clústeres iniciales .....	20
Figura 4-11: Izq: Imagen en escala de grises. Dcha: Región de periorbitales .....	20
Figura 4-12: Puntos de interés .....	21
Figura 4-13: Detección de cejas por medio de integrales proyectivas.....	22
Figura 4-14: Región de la frente de la persona .....	23
Figura 4-15: Esquema de experimentación.....	25
Figura 4-16: Esquema de experimentación para determinar distancia del sensor .....	27

Figura 4-17: Esquema de experimentación para calibración de temperaturas .....	27
Figura 4-18: Izq: Vista general del proceso de calibración. Dcha: Anillo de termistores en el patrón de calibración.....	28
Figura 4-19: Ejemplo de datos de temperaturas y ajuste.....	28
Figura 4-20: Esquema para experimentos sobre la morfología y obtención de temperatura..	30
Figura 5-1: Ejemplo de resultado de prolongación del cable y de mal calentamiento .....	33
Figura 5-2: Calibración para 0.1 fps.....	34
Figura 5-3: Calibración para 1 fps.....	35
Figura 7-1: Esquema de montaje para el sistema en quirófano .....	49

## RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster presenta un sistema para la segmentación automática de la frente de una persona para la recolección de temperaturas e interpretación de las mismas, que podrán ser tratados y estudiados en posteriores trabajos, como por ejemplo su inclusión en una unidad de control de climatización. La temperatura de la frente es conocida por estar altamente correlada con la temperatura corporal de una persona. El sistema de adquisición tiene la característica de ser no intrusivo y no influir ni modificar el comportamiento cotidiano de las actividades diarias de las personas. El sistema propuesto ha sido desarrollado para ser invariante en la medida de lo posible a diferentes cambios en la morfología de la cara de una persona, en la posición de la cabeza, y en la aparición de objetos externos. El método utilizado en el sistema propuesto ha sido optimizado en términos de tiempo de procesamiento. Además el presente sistema puede ser utilizado en otras aplicaciones en términos de tiempo real.

Palabras Claves: Frente, Procesamiento de imágenes, Clustering, Detección de cara, Imágenes termográficas.





## **ABSTRACT**

This work presents a method for automatic segmentation of the person's forehead to obtain temperatures from this area and to analyze the data which could be used in future works. For instance, including this information inside of an air control unit. Temperature at the forehead is known to be highly correlated to the internal body temperature. Furthermore, the system has the feature to not be intrusive and not changing the daily habits of the people. The proposed system has been developed to be invariant to different changes in relation to the shape and position of the human face, and even in presence of external objects. The present method has been optimized in terms of time processing. Thus, it can be used in applications with real-time constraints.

Keywords: Forehead, Image processing, Clustering, Face Detection, Thermographic Image.



## NOMENCLATURAS

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$t$	Tasa de refresco de la cámara térmica	Imágenes/segundos
$fps$	Fotogramas/imágenes por segundo.	Imágenes/segundos
$P_{xy}$	Punto de la matriz de la cámara térmica con coordenadas X e Y.	Adimensional
$P'_{xy}$	Punto de una imagen en escala de grises con coordenadas X e Y.	Adimensional
$min$	Valor mínimo de la matriz de datos devuelta por la cámara térmica.	Adimensional
$max$	Valor máximo de la matriz de datos devuelta por la cámara térmica	Adimensional
$M$	Umbral para la eliminación del fondo de una imagen.	Adimensional
$P''_{xy}$	Punto de una imagen umbralizada con coordenadas X e Y.	Adimensional
$P'''_{xy}$	Punto de una imagen binarizada con coordenadas X e Y.	Adimensional
$x_0$	Coordenada X del centro de una elipse.	Adimensional
$y_0$	Coordenada Y del centro de una elipse.	Adimensional
$a$	Semieje mayor de una elipse.	Adimensional
$b$	Semieje menor de una elipse.	Adimensional
$\beta$	Ángulo de rotación entre dos vectores directores. Utilizado también como el ángulo de rotación de una elipse.	°
$u$	vector formado desde el punto central de la elipse hasta el punto del semieje más largo de dicha elipse	Adimensional
$u_1$	Componente del vector u. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$u_2$	Componente del vector u. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$v$	vector formado por el centro de la elipse y el eje de ordenadas del sistema cartesiano	Adimensional
$v_1$	Componente del vector v. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$v_2$	Componente del vector v. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$x$	Coordenada X del punto de una elipse.	Adimensional
$y$	Coordenada Y del punto de una elipse.	Adimensional
$x'$	Coordenada X del punto de una elipse rotada.	Adimensional
$y'$	Coordenada Y del punto de una elipse rotada.	Adimensional
$C1$	Clúster devuelto por el algoritmo K-means. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$C2$	Clúster devuelto por el algoritmo K-means. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$P1$	Clúster inicial para el algoritmo K-means. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$P2$	Clúster inicial para el algoritmo K-means. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$V1$	Vértice superior izquierdo de la región de la frente. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$V2$	Vértice superior derecho de la región de la frente. Con coordenadas X e Y.	Adimensional

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
V3	Vértice inferior izquierdo de la región de la frente. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
V4	Vértice inferior derecho de la región de la frente. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
M1	Valor central de los puntos C1 y C2. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
M2	Punto superior donde corta el semieje de la mitad superior de una elipse. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
M1'	Valor central de los puntos C1 y C2 recalculado para su ajuste con la morfología de la cara. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
M2'	Punto superior donde corta el semieje de la mitad superior de una elipse, recalculado para la obtención de una región de la frente más extensa. Con coordenadas X e Y.	Adimensional
$T_{sin.}$	Temperatura medida por la cámara térmica sin corregir.	°C
$Q_{emitida}$	Flujo de calor de un objeto.	W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Emisividad de un material.	Adimensional
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann. Con Valor 5.67 E-8.	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$A_s$	Área de una superficie	m <sup>2</sup>
$T_s$	Temperatura superficial de un objeto.	K
$Q_{emitida}'$	Flujo de calor de un objeto.	W/m <sup>2</sup>
$T_{cor}$	Temperatura medida por la cámara térmica corregida.	°C
$\varepsilon'$	Emisividad de un material	Adimensional
$T_{arduino}$	Temperatura devuelta por un anillo de 5 termistores a través de Arduino.	°C
$T_{region}$	Temperatura media de una región de 9x9 puntos en el interior del anillo de termistores de <i>Tarduino</i> .	°C
$T_{punto}$	Temperatura de un punto en el interior del anillo de termistores de <i>Tarduino</i> .	°C
$TR_{corregida}$	Temperatura media de una región de 9x9 píxeles en el interior del anillo de termistores de <i>Tarduino</i> con un ajuste de valores.	°C
$TP_{corregida}$	Temperatura de un punto en el interior del anillo de termistores de <i>Tarduino</i> con un ajuste de valores.	°C
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio.	Adimensional
$n$	Número de elementos.	Adimensional
$\hat{y}_i$	Valor de un dato estimado.	Adimensional
$y_i$	Valor de un dato verdadero.	Adimensional

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 El estado actual de la tecnología

En las últimas décadas, la parte de la informática que se dedica al estudio de la visión artificial ha dado pasos agigantados, y es tal la importancia que se le está dando en los últimos años que incluso se hace esencial en otros ámbitos fuera de la informática como por ejemplo en análisis de situaciones cotidianas, análisis de procesos industriales o en sistemas más críticos y de mayor envergadura como en medicina.

Hemos sido testigos de cómo poco a poco la visión artificial evolucionaba por momentos, ya no sólo limitándose su uso en las tradicionales cámaras monocromo o en color. Sino que en el campo de la termografía también se ha hecho un hueco, debido a el avance de los sensores de visión de infrarrojos.

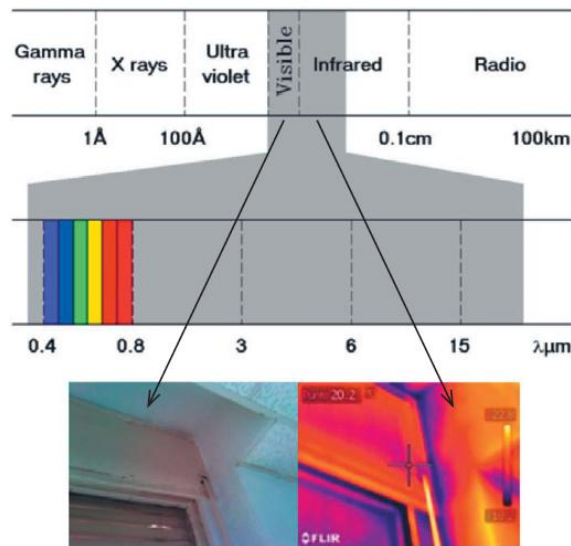


Figura 1-1: Espectro electromagnético.

Los sensores de infrarrojos utilizados en las cámaras termográficas son capaces de detectar tal y como se observa en la Figura (1-1) la radiación emitida por los objetos en el espectro infrarrojo. El funcionamiento de dichos instrumentos de medida a grandes rasgos consiste en que la óptica del sensor hace converger sobre su detector (pueden ser de dos tipos, detector de estado sólido o detector por microbolómetros) la radiación infrarroja que emite el objeto al cual se está enfocando para su medición y se obtiene una respuesta (cambio de tensión o resistencia eléctrica) que será leída por los elementos electrónicos del sensor. Esa señal electrónica es convertida en un conjunto de datos que necesitan ser procesados para la obtención de un valor de temperatura. En muchos casos este tipo de cámaras suelen ir encapsuladas en un sistema cerrado que hace el procesamiento de los datos y muestra las temperaturas por medio de una pantalla. El funcionamiento, componentes, tipos de detectores, etc se puede consultar en [1], que se trata de un artículo de una

revista que realiza un resumen de los diferentes tipos de tecnología de cámaras térmicas y su funcionamiento.

Hoy en día estos dispositivos aunque no con un coste proporcional al de una cámara tradicional, son capaces de obtener mapas de de temperaturas que forman imágenes térmicas de un tamaño de 120x160 píxeles o incluso más. Están bastante lejos en relación precio/resolución visual a lo que se puede encontrar hoy día en las cámaras tradicionales, pero las resoluciones logradas en los últimos años son suficiente para realizar un análisis de imágenes más exhaustivo que antaño.

Las cámaras térmicas han evolucionado muchísimo hasta tal punto de no necesitar un mantenimiento periódico de los mismos que incurren en costes de refrigerantes y calibraciones. Por otro lado han abierto un amplio abanico de posibilidades de aplicabilidad no restringiéndose sólo a la parte puramente industrial o en laboratorios científicos, sino a medicina, robótica, automoción, extinción contra incendios, entretenimiento, etc.

## **1.2 La eficiencia energética y el consumo energético**

Mundialmente el consumo energético ha ido aumentando a lo largo de los años y sigue en aumento. Esto se debe al crecimiento de la población, y al desarrollo tecnológico principalmente.

Con el paso del tiempo cada vez son más los países que se están dando cuenta que este gran aumento ha traído consigo un uso de las fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles poco sostenible, y cada vez son menos los países exportadores de este tipo de combustibles.

Afortunadamente desde los gobiernos y las políticas entre países se están imponiendo avances estructurales, como es, el uso moderado de los combustibles fósiles por fuente alternativas, como un nuevo impulso en las tecnologías para que tengan un menor consumo. De este modo la eficiencia energética es un aspecto esencial para un crecimiento sostenible y para garantizar la seguridad energética en un futuro, de ahí que la mejora del medio ambiente sea primordial.

Esto conlleva un nuevo enfoque de las medidas de eficiencia energética, debido a que se consideran cada vez más no solo un medio para conseguir un abastecimiento de energía sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la seguridad del suministro y rebajar los gastos de importación, sino también una nuevo enfoque, para fomentar la competitividad de las economías europeas.

## **1.3 Objetivos propuestos por Europa**

Europa destaca la importancia de la eficiencia energética a la hora de disminuir los costes de la energía y reducir la dependencia energética. Fijando así unos niveles mínimos de eficiencia energética, así como normas sobre el etiquetado y el diseño ecológico de los productos, los servicios y las infraestructuras, prueba de ello es la extensión de las etiquetas de consumo energéticos como los de la Figura (1-2), extendido hoy día a las edificaciones.

**CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EXISTENTE** ETIQUETA

**DATOS DEL EDIFICIO**

Normativa vigente: construcción / rehabilitación:  Tipo de edificio:

Dirección:

Municipio:

Referencia catastral:  CP:

C Autónoma:

**ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

Calificación	Consumo de energía kWh / m <sup>2</sup> año	Emisiones kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> año
<b>A</b> más eficiente		
<b>B</b>		
<b>C</b>		
<b>D</b>		
<b>E</b>		
<b>F</b>		
<b>G</b> menos eficiente		

REGISTRO

Válido hasta dd/mm/aaaa

BORRAR TODO

ESPAÑA  
Directiva 2010 / 31 / UE

Figura 1-2: Etiqueta de eficiencia energética.

Como consecuencia de los hechos mencionados en la sección anterior, prima la necesidad de una disminución del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para lo cual Europa impone el tan sonado *Objetivo 20-20-20*.

El *Objetivo 20-20-20* es un compromiso pactado y firmado entre los Estados miembros de la Unión Europea para alcanzar una mayor eficiencia energética. Este compromiso energético se plasma en la Directiva 2012/27/UE, en la que se establecen una serie de objetivos para alcanzar en el año 2020:

- Reducir las emisiones de gases que provocan el *Efecto Invernadero* en un *20%* con respecto a las cifras de 1990. Esta cifra podría aumentar en algunos casos hasta la reducción de un *30%*.
- Obtener al menos el *20%* del consumo energético a partir de fuentes renovables, y al mismo tiempo cubrir el *10%* de las necesidades del transporte con biocombustibles.
- Reducir un *20%* el consumo energético respecto a las cifras proyectadas para el 2020.

#### 1.4 Marco donde se encuentra el presente proyecto

Es en este escenario que se ha explicado en los apartados anteriores donde se sitúa la elaboración del presente proyecto, ya que se sabe que tanto los edificios comerciales como las viviendas residenciales tienen un consumo que según Europa de aquí a unos años debe reducirse. Se sabe también que de dichos edificios, el mayor consumo que tienen es en sistemas de agua caliente, calefacción y refrigeración. Y se ha detectado que puede existir una correlación interesante entre la temperatura corporal y la temperatura ambiente, ayudando a regular la climatización de forma automática.

Por ello, se propone el desarrollo de un algoritmo que detecte de forma automática la cabeza de las personas situadas en un puesto fijo de trabajo, y gracias al uso de cámaras térmicas consiga la temperatura corporal. Será necesario encontrar en la cara la posición de la frente, pues es una zona representativa del calor corporal, a la vez que suele ser una zona destapada y accesible.

Dicho algoritmo puede ser utilizado como una parte esencial a la hora de crear sistemas de climatización inteligente, contribuyendo a un uso eficiente de la energía, sobre todo en instalaciones en las que la energía provenga de propuestas renovables como paneles fotovoltaicos, en los que será necesario un uso eficiente de la energía que se consuma.

Además la aplicabilidad del sistema que se pretende desarrollar no se limita sólo al ámbito del confort en espacios climatizados, sino que se podría extender a entornos más críticos como su uso en quirófanos de cirugía cardíaca donde a algunos pacientes se les aplica un proceso de perfusión sanguínea disminuyendo la temperatura de la sangre a 18°C e introduciéndosela de nuevo para así inducir un estado similar al coma. En la actualidad la temperatura corporal de dichos pacientes, se obtiene de forma invasiva mediante sondas de temperatura introducidas por una incisión que recogen datos del cuerpo, pero con el sistema que se expone en el presente documento se podrían renovar las técnicas tradicionales de adquisición de datos en estos entornos hospitalarios.



## 2 ESTADO DEL ARTE

El problema que se pretende resolver en este Trabajo de Fin de Máster tiene puntos de interés comunes con diferentes campos de la ciencia. Si observamos las propuestas de otros autores se puede ver que muchos comparten aspectos en común con el presente trabajo en cuanto a detectar rostros o partes de ellos, y otros en mejorar la eficiencia energética haciendo uso de termografía.

Uno de los objetivos principales será la localización de la frente de una persona como se comentó en las secciones anteriores. Si abstraemos un nivel, nos encontramos con un amplio campo de estudio en la literatura científica que se denomina "*detección de caras*".

La detección de caras pretende localizar dicha parte del cuerpo en las imágenes. Realizando una búsqueda de trabajos previos en este campo de estudio, la cantidad de información que se puede encontrar de diferentes autores es sobrecogedora. Y es que es tal la complejidad de este problema que cada año disponemos de cientos de nuevos trabajos en este ámbito.

Al tratarse de análisis de imágenes, se puede categorizar el problema de la detección de caras en tres grandes módulos, dependiendo de la tecnología con las que se adquieren dichas imágenes: Detección de caras en el espectro visible de la imagen [2], detección de caras en el espectro infrarrojo cercano [3] y la detección de caras en termografía [4].

Debido a que el problema que presenta en este Trabajo de Fin de Máster como puede observarse en la sección "*4.1 Planteamiento del problema*", no es abordado en su totalidad por los autores, o simplemente no comparten los mismos objetivos y puntos de vista para su resolución, sólo se contemplaran en esta sección aquellas propuestas de autores que tengan más relevancia en el campo de la detección de caras o que tengan objetivos de estudios muy parecidos al del presente trabajo, destacando en cada caso porqué se descartan sus soluciones e indicando que propuestas o ideas serían susceptibles de utilizarse.

Tal y como se detalla en el estudio del estado del arte en los algoritmos de detección de caras en el espectro visible de la imagen [2], uno de los métodos que más relevancia e impacto ha tenido en este campo y que ha día de hoy se sigue utilizando en múltiples aplicaciones es el denominado método "*Viola-Jones*" [5]. Este método es capaz de detectar rostros en imágenes utilizando para ello patrones de búsquedas de "*características Harr-like*". Además se consigue realizar un buen detector con el uso de algoritmos de aprendizaje "*AdaBoost*" [6]. Este método queda descartado debido a que como se detalla en el estudio realizado en [2], se detectan limitaciones en la formulación inicial del método y es necesario para más robustez ampliar la población de patrones de lo que denominan *rectángulos de búsqueda*.

También existen diferentes propuestas de utilizar esquemas de algoritmos de aprendizajes complejos como pueden ser las redes neuronales enfocadas a la detección de rostros en imágenes. Por ejemplo en [7] los autores presentan el uso de un modelo de red neuronal con el que consiguen hacer robusta la detección de rostros en cuanto a variaciones de iluminación y rotaciones en las imágenes y las caras, que es al fin y al cabo uno de los objetivos más complejos en la detección de caras en aplicaciones reales. Para el entrenamiento de la red neuronal utilizan un conjunto de entrenamiento que contiene tanto patrones clasificados como caras y patrones no clasificados como caras. Además comparan la robustez de su método usando la base de datos "*CMU Test Set*" [8]. En este trabajo no se utilizará este método debido a que a pesar de que obtienen muy buenos resultados el modelo de red neuronal utilizado trabaja bien con imágenes dentro del espectro de rango visible

y del infrarrojo cercano, pero su uso en imágenes termográficas puede provocar que el modelo no se comporte acorde a los resultados que los autores han obtenido en sus experimentos realizados.

En el campo de la detección de caras en el espectro infrarrojo cercano es posible la utilización de todos los métodos desarrollados para el espectro visible de la imagen, ya que las imágenes no difieren mucho. Aún así existen diferentes propuestas como la que se puede encontrar en [9], en la que los autores logran realizar la detección de dicha parte del cuerpo. Para ello, eliminan el fondo de la imagen y obtienen las partes que les interesa analizar. Realizan ajustes de iluminación para obtener así una forma fiable de segmentar la piel de la cara de una persona y poder así utilizar proyecciones y extraer características del rostro como los ojos. Nuevamente para el trabajo que se presenta en este documento, el método que los autores proponen no proporcionaría buenos resultados en cuanto la morfología de la cara cambiase. Pero de la propuesta de estos autores se denota la importancia de eliminar elementos de la imagen que no sean de interés, y la idea de eliminación del fondo es aprovechable para el problema que se presenta en el presente Trabajo de Fin de Máster. Al tratarse de imágenes de naturalezas distinta la eliminación de fondo que los autores utilizan no se podría aplicar tal cual, con lo que sería necesario hacer un análisis y estudio para utilizar un método similar al de los autores.

En [10] se desarrolla un sistema en el que los sujetos de estudios están tumbados en una camilla y tienen colocado un sensor de infrarrojos en el techo en posición perpendicular a la cara. Sin embargo se pueden detectar diferencias claramente apreciables al presente trabajo de Fin de Máster ya que el objetivo propuesto por estos autores, es el análisis de enfermedades relacionadas con el tiroides ocular de un paciente, y que como tal debe de estar tendido en una camilla. En el trabajo de estos autores, los sujetos de estudios han sido previamente tratados para eliminar restos de maquillaje, café, etc. Así mismo son colocados en una camilla en la que se les toman imágenes termográficas en un ambiente a 18°C y se le toman medidas de diferentes puntos de los ojos.

En [11] los autores afirman que los edificios inteligentes, necesitan de nuevos métodos para garantizar el confort tanto de calefacción como de refrigeración. Para llevar a cabo su estudio utilizan imágenes termográficas de diferentes zonas del cuerpo como son la frente del sujeto de estudio, la nariz y las manos. Los autores promueven que se pueden tomar medidas de cada unas de las zonas nombradas, y que existe una fuerte relación entre la temperatura de las manos y el confort térmico. También argumentan que no existen tendencias claras para que la temperatura de la frente o de la nariz sean representativas para alcanzar el confort térmico. Evidentemente por esto último el trabajo de estos autores difiere con el que se realizará en el presente documento, ya que se pretende utilizar la temperatura de la frente como zona representativa de la temperatura corporal.

En [12] se realiza un análisis de diferentes zonas de la cara para la estimación del confort climático para una persona. Los datos del estudio de estos autores se recaudan de una forma invasiva, utilizando gafas que muy posiblemente disminuya el confort del usuario por llevar un elemento al que no está habituado en el caso de las personas que no necesitan gafas, y un gran inconveniente en las personas que sí las llevan, ya que el sistema no se puede adaptar.

En [13] se propone el uso de la termografía para analizar el confort al igual que sucede en este trabajo, utilizando la región de la frente de una persona así como de las mejillas, los periorbitales de los ojos y la temperatura nasal. Para realizar su estudio los autores consideraron que la temperatura de las zonas anteriormente mencionadas difieren según el estado en el que se encuentra el sujeto de estudio y que además existen diferencias significativas en la toma de temperaturas del lado derecho e izquierdo de la región de la frente. Los autores logran afirmar con los experimentos que existen evidencias claras de una correlación entre el confort térmico y las zonas escogidas para

el análisis. A diferencia de lo que se propondrá en este trabajo de Fin de Máster, se trata de un estudio en el cual se desconoce si la adquisición de datos es automática. En principio se sospecha que no debido a que tal y como se demuestra en una imagen del entorno experimental, el usuario debe tener la cabeza colocada en una posición específica para que no existan problemas. Esto puede llevar a que su uso en la vida cotidiana sea inadmisibles por temas de confort.

Referente a eliminar aquellos elementos de las imágenes térmicas que no corresponden con la cara o la cabeza de una persona en [14], [15], [16] los autores logran este objetivo realizando una segmentación de la imagen. Pero se ha decidido que aunque se debe llevar a cabo una segmentación, no hacerla como la proponen dichos autores en sus respectivos artículos, sino que se ha hallado la segmentación con valores determinados de forma empírica ya que para ciertos pasos del algoritmo que se proponen en este trabajo, son más convenientes para realizar un umbral y una reasignación de valores de cada uno de los puntos de imagen.

Aunque la idea de la segmentación propuesta en [16] se descarta por los motivos anteriormente descritos, los autores realizan una buena localización de la cara utilizando para ello la extracción de la silueta que forma la imagen térmica con el fondo. Aproximan mediante una estructura propuesta por los autores la silueta y extraen componentes principales de la cara, como la nariz, los ojos, la frente, etc. Por ello aunque se haya descartado su solución de forma global, sí que son interesantes algunos de los pasos que utilizan y algunos de ellos se podrían adaptar a nuestro problema. Otro motivo por el que se descarta la solución global propuesta en [16] es que puede devolver resultados insatisfactorios cuando la cabeza de la persona no se adapte a la morfología fuera del espacio de experimentación realizado.

Debido a la misma razón por la que se descarta la solución propuesta en [16], los métodos propuestos en [17] y [18] también son descartados puesto que se basan en la obtención de un mapa de riego, lo cual no sería apropiado en personas con vello facial o algún tipo de elemento externo.

En niveles más específicos de detalles faciales podemos destacar la detección de ojos [19] en la que los autores proponen la idea de que en una cara humana los puntos de temperatura más alta son la zona de los periorbitales o lagrimales de los ojos. Aunque tal y como los autores la proponen, se observan limitaciones debido a que puede darse el caso de que una persona lleve gafas, o bien que en el caso de que esté bebiendo una bebida con una temperatura elevada, la zona de los labios iguale o supere la temperatura de la zona que buscan.

En [20] y [21] se propone el uso de proyecciones, herramienta que según los resultados que comentan en sus artículos es robusta en cuanto a cambiar la morfología de la cara, y con ella consiguen de una forma relativamente sencilla extraer información de los detalles faciales y así realizar una localización de la cara de una persona. Pero a diferencia de lo que el autor propone, la idea del uso de proyecciones o integrales proyectivas, sólo será utilizada en las etapas posteriores de la detección de la cara, con el fin de extraer información de áreas específicas de interés.

Finalmente tras revisar las propuestas de los diferentes autores, en la mayoría de los casos no existen evidencias para suponer que los métodos de adquisición y análisis de las zonas que utilizan para realizar sus estudios, se obtengan de forma automática o si los métodos son robustos a giros de la cabeza. Y en aquellos casos en los que se tiene certeza de que la adquisición es automática, la aplicabilidad del mismo difiere del fin al que se pretende aplicar el presente trabajo.



### **3 OBJETIVOS**

El presente trabajo de Fin de Máster pretende conseguir el desarrollo de un sistema de medida de temperatura superficial mediante sensores de termografía infrarroja que permita captar fotogramas a una tasa de refresco  $t$  siendo esta, el número de imágenes por segundo.

Como núcleo central del método que se propone, se pretende realizar el desarrollo de un algoritmo matemático de procesamiento de imagen que permita extraer de las imágenes termográficas información relativa a la posición de la cabeza de una persona.

Además de los objetivos anteriores, se deberá de desarrollar un método para calibrar y corregir los datos de temperatura erróneos.

La unidad de control de climatización en base a los datos de temperatura queda fuera de los límites del presente trabajo, limitándose el mismo sólo y exclusivamente a proporcionar información precisa de datos de temperaturas, que posteriormente en futuros trabajos con la misma temática o en otros campos de la ciencia puedan ser utilizados.



## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Planteamiento del problema

Como puede observarse en la Figura (4-1), el método tradicional para la regulación de la temperatura requiere que el usuario indique la temperatura deseada regulándose a través de un termostato. Esta temperatura se comprueba iterativamente mediante un sensor para determinar si se ha alcanzado la temperatura deseada. Esto puede funcionar bien en algunos casos, pero en otros casos no se adapta bien a lo que la persona que ha regulado el sistema desea, y por tanto lleva a un mayor consumo de energía eléctrica para llevar a cabo su labor de climatización y en otros casos a la incomodidad de la persona que está haciendo uso del sistema.

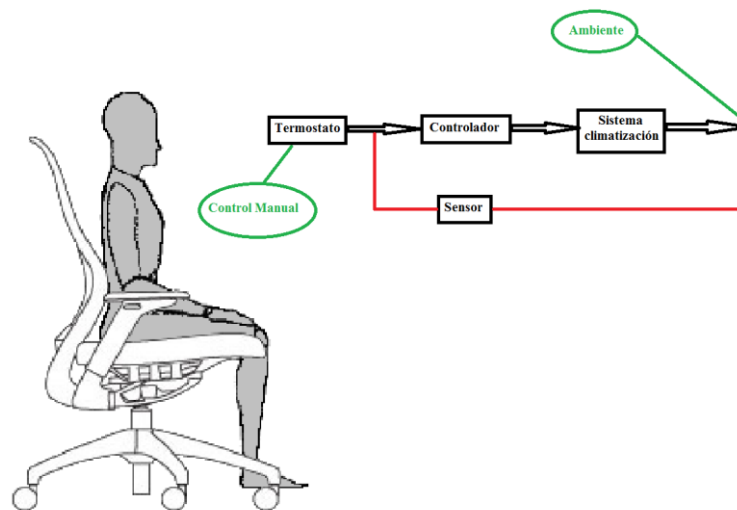


Figura 4-1: Esquema tradicional de control de temperatura.

Por lo tanto, el sistema que se propone en este trabajo será usado para la obtención de forma no invasiva de la temperatura superficial de una persona y así disponer de datos para que una posible unidad de control no basada en termostatos pueda regular la temperatura del ambiente según las necesidades específicas de esa persona, tal y como muestra la Figura (4-2). En la misma figura el rectángulo sin nombre donde entra la señal de temperatura procedente del sensor de infrarrojos, estima el confort térmico de la persona. Esta información sobre la estimación podría ser empleada por el sistema de clima junto con la temperatura ambiente en trabajos posteriores.

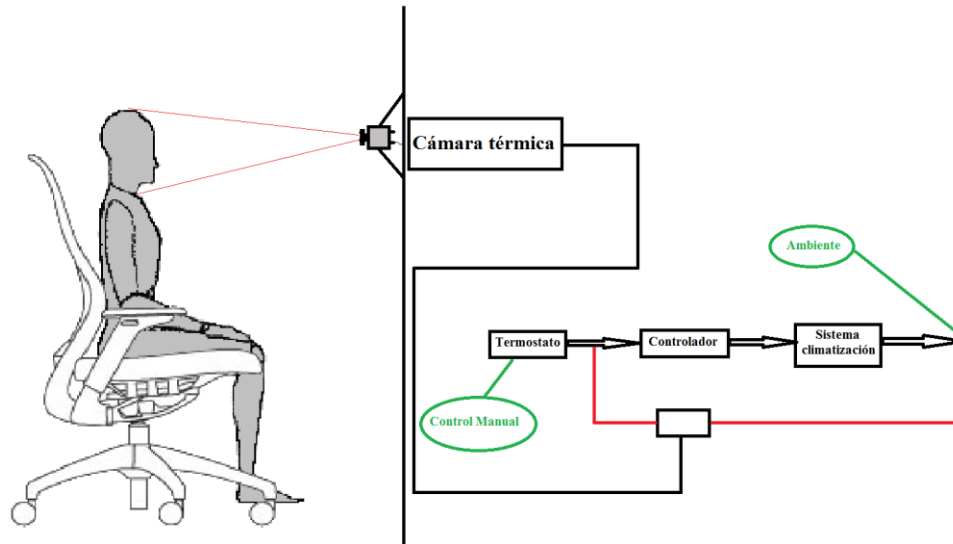


Figura 4-2: Esquema del sistema propuesto.

Como zona de análisis se utiliza la frente de la persona debido a que es una zona con muy buena irrigación sanguínea y que comúnmente suele estar libre, ya que los ojos pueden o no estar tapados con gafas, las orejas tapadas con auriculares para escuchar música, la zona de la nariz y la boca puede estar tapada por alguna mascarilla para alergias y resfriados. Además dicha zona suele estar libre de vello facial, el cual tiene la característica de ser un disipador natural de la temperatura corporal.

Se debe prestar atención a que la cámara termográfica no puede estar localizada en cualquier parte. Es necesario que la cámara esté posicionada lo más perpendicularmente posible a la zona que se pretende medir. Además la cámara térmica debe posicionarse a una distancia específica para obtener la cara completa de la persona teniendo en cuenta los ángulos de visión de la cámara.



## 4.2 Método propuesto

El método para resolver la localización de la frente de una persona y poder obtener la temperatura de dicha zona para su posterior análisis en una unidad de control se muestra en la Figura (4-3).

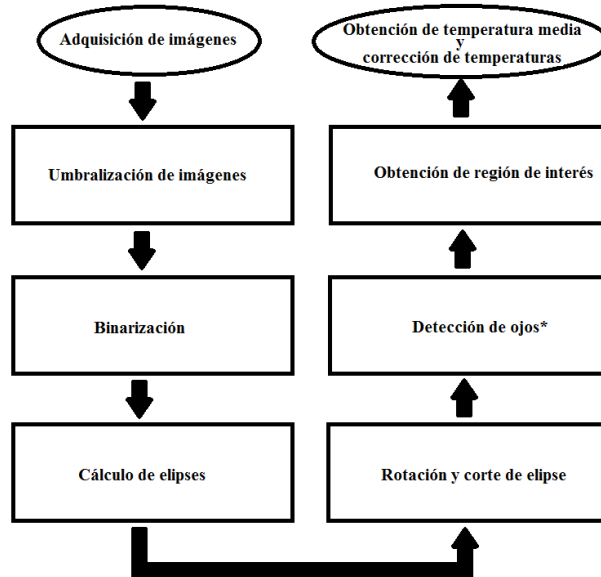


Figura 4-3: Esquema general del método.

### 4.2.1 Adquisición de imágenes

Cuando la cámara proporciona datos, es necesario convertir el rango de temperaturas que devuelve el dispositivo térmico a una imagen en escala de grises, o lo que es lo mismo, un cambio del espacio de los datos de entrada. Dichas imágenes en escala de grises necesitan representar todos los datos de la imagen original en un rango entre  $[0-255]$ , donde  $0$  corresponde con el valor mínimo y  $255$  con el valor máximo de temperatura. Es necesario destacar que esta transformación del espacio nos hará perder información, pero que todo los procesos aplicados a la imagen original, se aplican a una copia de ella, debido a que en las futuras secciones será necesario volver nuevamente a los datos originales.

La expresión (4.1) es la que hace posible realizar lo anteriormente descrito, donde  $P_{xy}$  es un valor de temperatura devuelto originalmente por la cámara térmica,  $P'_{xy}$  es el valor modificado,  $min$  y  $max$  son respectivamente el valor mínimo y máximo de la imagen original.

$$P'_{xy} = \left( \frac{P_{xy} - min}{max - min} \right) * 255 \quad (4.1)$$

### 4.2.2 Umbralización de imágenes

La morfología de la cara de las personas puede diferir mucho de una a otra, ya sea por temas estéticos como por ejemplo tener barba, o por temas de nacionalidad, es decir, en algunos países hay ciertos rasgos faciales que no están presentes en otros. Por ello es necesario que el método desarrollado sea robusto en la medida de lo posible a estos posibles cambios.

Existen múltiples técnicas para discriminar de una imagen aquellos elementos que no sean de interés a analizar. Uno de estos métodos que trabaja muy bien para el tema que se está tratando, es el histograma de una imagen.

El histograma de una imagen, consiste en contar cuantos elementos de dicha imagen tienen un valor en concreto. En el caso de imágenes en escala de grises, los valores estarán en el rango [0-255]. La Figura (4-4) muestra el uso de este método, y la distribución de valores en la imagen.

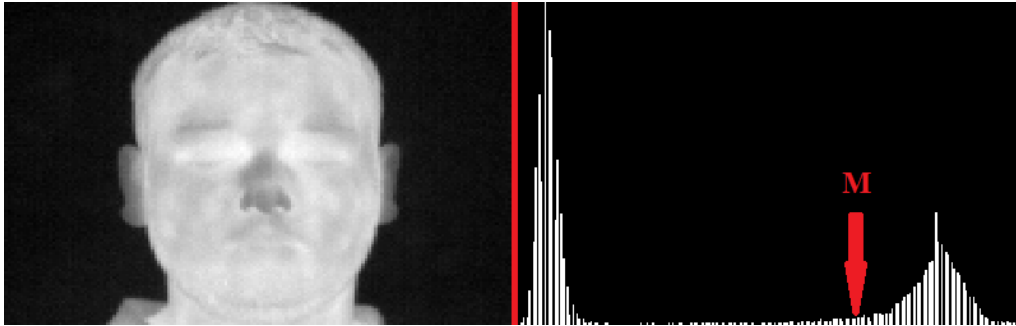


Figura 4-4: Izq: Imagen en escala de grises. Dcha: histograma de la imagen.

Una vez que ha sido calculado el histograma es posible hallar un valor  $M$  que sirve de umbral para eliminar de la imagen todos aquellos datos que no son de interés. Este umbral ha sido determinado de forma empírica, pero es sencillo de determinar siempre y cuando los objetos que aparezcan en la imagen emitan menos radiación que la piel de una persona.

Conocido el valor de  $M$  es necesario transformar la imagen en escala de grises a una nueva imagen en la que cada punto será el resultado de aplicar la expresión (4.2).

$$P''_{xy} = \begin{cases} 0 & \text{si } P'_{xy} \leq M \\ 255 * P'_{xy} - \frac{M}{255 - M} & \text{si } M < P'_{xy} < 255 \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde  $P'_{xy}$  es un punto de la imagen modificado por la expresión (4.1) y  $P''_{xy}$  los nuevos valores.

### 4.2.3 Binarización

Una vez que los pasos anteriores han sido finalizados, el algoritmo debe de crear una máscara binaria que corresponda con aquellos objetos en la imagen que hayan superado el filtro propuesto en el paso anterior. Para la creación de la máscara se generará una nueva imagen en la que únicamente existan valores iguales a 0 ó 255, tal y como puede observarse en la Figura (4-5). Esto puede lograrse gracias a la expresión (4.3).

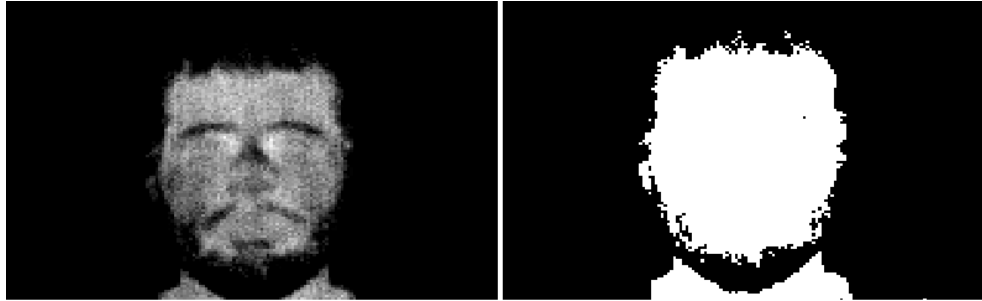


Figura 4-5: Izq: Imagen umbralizada. Dcha: Máscara binaria.

$$P'''_{xy} = \begin{cases} 0 & \text{si } P''_{xy} = 0 \\ 255 & \text{si } P''_{xy} > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Donde  $P'''_{xy}$  es un punto de la nueva imagen que representa la máscara binaria y  $P''_{xy}$  los valores representados por la expresión (4.2).

### 4.2.4 Cálculo de elipses

Uno de los pasos vitales del algoritmo se encuentra en esta sección debido a que es necesario realizar una aproximación geométrica de la cabeza de una persona a la máscara binaria generada anteriormente, y si esta aproximación falla, el método incurrirá en errores en la toma de la temperatura superficial de la frente de la persona observada.

Afortunadamente la característica que tienen en común todas las cabezas de las personas es que tienen una fácil representación matemática mediante una elipse, ya que es la figura geométrica que mejor se amolda. La expresión (4.4) representa matemáticamente una elipse. Donde  $x_0, y_0$  corresponde con el centro de la elipse y  $a, b$  con los semiejes de la misma cuando  $a > b$ .

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (4.4)$$

La aproximación en elipses de la máscara binaria obtenida se basa en el método propuesto en [22]. El cual dado un conjunto de puntos, en nuestro caso la máscara binaria, ajusta la forma de una

elipse para que dichos puntos se queden en su interior o en su perímetro. Este método se encuentra implementado en la librería de visión por computador *OpenCV* [23], en la que directamente obtenemos los componentes principales de la ecuación de la elipse de la expresión (4.4).

Dado que no se puede descartar que en la máscara binaria aparezcan pequeños elementos no deseados, es obligatorio eliminar dichos elementos si no cumple la restricción que en área sean grandes. Esto quiere decir que se considera que la cabeza de la persona ocupará la mayor parte de la imagen térmica y por lo tanto la elipse que contenga la cabeza será aquella que tenga el área máxima de todas las presentes. Dicho de otro modo, esto supone una restricción técnica del problema que se está tratando y de obligado cumplimiento.

#### 4.2.5 Rotación y corte de elipses

Una vez obtenida la elipse que mejor se aproxima a la cabeza del sujeto de estudio, es necesario analizar si dicha elipse tiene algún tipo de rotación y corregirla. Esto es debido a que la persona no siempre tiene que estar con la cara en una única posición, sino que a veces por diferentes motivos la cabeza puede estar girada en algunos de los ejes que se representan en la Figura (4-6).

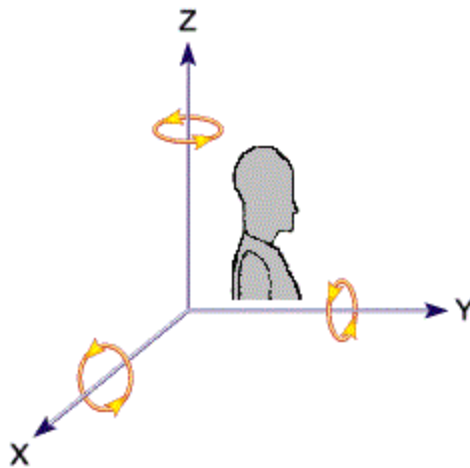


Figura 4-6: Rotaciones de una persona en los diferentes ejes.

Por temas de confort en largos periodos de tiempo, se ha considerado que la cabeza de la persona la cual está observando el sistema se puede encontrar en un estado normal sin ninguna rotación, con una rotación límite de  $45^\circ$  a cada lado del eje Y, y pequeñas rotaciones en los demás ejes, que por sus características en cuanto al giro ocultan la zona de la frente. Por ello las rotaciones que se consideran en los ejes Z y X serán de ángulos inferiores a  $20^\circ$  y  $10^\circ$  respectivamente.

La Figura (4-7) muestra un ejemplo de cómo una elipse que representa la envolvente de la cabeza está rotada en el eje Y representada en color rojo y en verde la posición deseada. Para facilitar los cálculos en etapas posteriores del algoritmo esta elipse debe rotarse a una posición en la que los semiejes de dicha figura geométrica coincida con los ejes cartesianos. Por ello es necesario calcular el valor de un ángulo  $\beta$ , que nos permita corregir el ángulo de la elipse. Para encontrar el valor de

este ángulo hay diferentes métodos, pero el más sencillo y directo es mediante la expresión (4.5), donde  $u$  es el vector formado desde el punto central de la elipse hasta el punto del semieje más largo de dicha elipse. Y  $v$  es el vector formado por el centro de la elipse y el eje de ordenadas del sistema cartesiano.

$$\cos\beta = \frac{|u_1 v_1 + u_2 v_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} * \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (4.5)$$

Una vez ha sido hallado el valor de  $\beta$ , hay que tener en cuenta la componente de abscisa de vector  $u$  para poder determinar la dirección de rotación. Si dicha componente es menor que la del punto central de la elipse, eso quiere decir que estamos en un caso parecido al de la Figura (4-7), por el contrario si es mayor, nos encontramos con la situación opuesta.

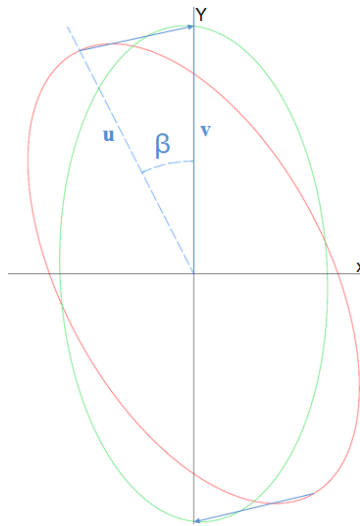


Figura 4-7: Formación vectores  $u$ ,  $v$  de la elipse.

Conociendo el valor de  $\beta$  y la dirección de rotación, es posible por medio de la expresión (4.6) y (4.7), rotar todos y cada uno de los puntos que se encuentran dentro de la elipse.

$$x' = \cos(\beta) (x - x_0) - \sin(\beta) (y - y_0) + x_0 \quad (4.6)$$

$$y' = \sin(\beta) (x - x_0) + \cos(\beta) (y - y_0) + y_0 \quad (4.7)$$

## 4.2.6 Detección de ojos

El siguiente paso que debe dar el algoritmo es encontrar los ojos como localización que hace de guía para poder determinar la zona de la frente debido a que es una zona muy próxima. De esta forma se pueden encontrar dos posibles casos: Personas que utilizan gafas habitualmente y personas que no necesitan gafas.

Tanto si la persona hace uso o no de gafas esta parte del método se encargará de obtener como resultado dos nuevos puntos  $C1$  y  $C2$  (o únicamente  $C1$  en algunos casos como se ha comentado anteriormente) como se representa en la Figura (4-12). Y dichos puntos se utilizarán en la etapa del algoritmo " 4.2.7 Obtención de la región de interés" como puntos límites.

### 4.2.6.1 Personas con gafas

Para las personas que utilizan gafas ya sea por problemas de visión o porque utilicen algún tipo de lentes especiales para mitigar efectos como la Luz Azul de las pantallas de los ordenadores, es necesario buscar dos conjuntos de puntos en la imagen dentro de la mitad superior de la elipse que tengan una baja temperatura ya que tal y como puede observarse en la Figura (4-8) el efecto de las gafas en termografía es el de un objeto opaco que no deja pasar la radiación.



Figura 4-8: Imagen térmica de persona con gafas.

Para encontrar este conjunto de puntos se hace uso de los puntos de la imagen que están únicamente dentro de la elipse, y que han sido rotados para corregir la inclinación de la cabeza.

Existen una infinidad de métodos de búsqueda basados en heurísticas, algunos más complejos que otros y con diferentes condiciones como que se conozcan el número de elementos a buscar. Para satisfacer dicha búsqueda se ha utilizado un método de agrupamiento/clustering basado en el algoritmo *k-means* [24].

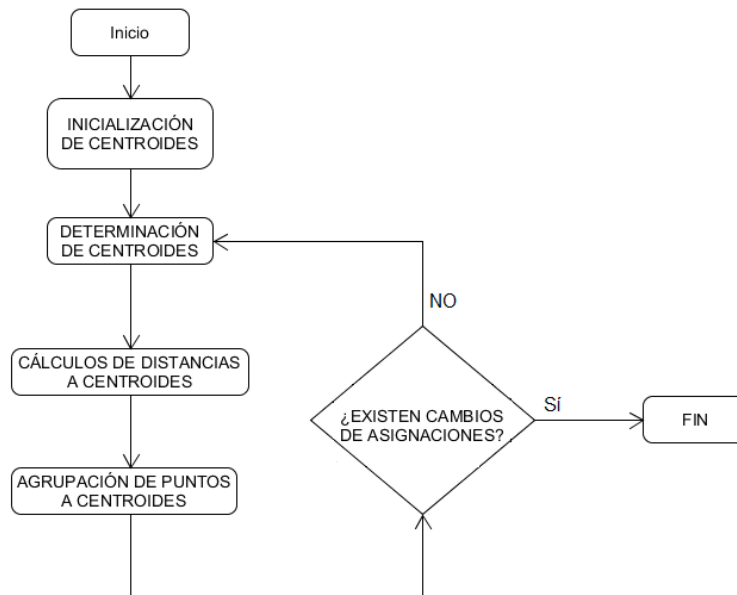


Figura 4-9: Esquema del algoritmo de K-means.

Es un algoritmo iterativo como se muestra en la Figura (4-9). Los pasos que sigue dicho algoritmo son los siguientes:

1. El algoritmo necesita conocer el número de clústeres que debe de buscar a priori.
2. Seguidamente se inicializan las estructuras de datos necesarias para representar los clústeres, y se inicializan con un valor aleatorio o conocido.
3. Se determinan la posición de los clústeres. En la primera etapa del algoritmo la posición es la misma que la inicialización del paso 2.
4. Se calculan la distancia de los datos a agrupar con los diferentes clústeres. Como métrica de asociación se usa la distancia euclídea, aunque se podrían utilizar otra métrica de distancia.
5. Agrupación de los puntos en los diferentes clústeres.
6. Se comprueba que los clústeres y los puntos asignados a los mismos cambien. En caso de que cambien se vuelve al paso 3. Por el contrario si permanecen inmutables, se termina la ejecución del algoritmo.

Este método ha sido elegido porque se sabe, el número de elementos como máximo a buscar, que son los correspondientes a las dos lentes de las gafas. Pero además tiene la característica de converger relativamente rápido si los clústeres o centroides de partida están próximos a los grupos finales que se encontrarán. Para ello tal y como se puede observar en la Figura (4-10) se ha

utilizado como puntos de partida de búsqueda el punto  $P1$  y  $P2$ , que corresponden con las distancias medias de cada uno de los semiejes de la elipse a cada lado del eje de abscisas.

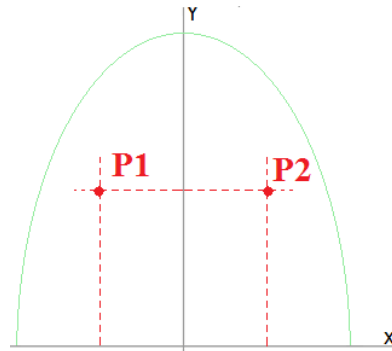


Figura 4-10: Clústeres iniciales.

Se puede observar que las posiciones de  $P1$  y  $P2$  son unas de las mejores para inicializar el algoritmo de clustering debido a que se encuentran muy cerca de la solución y el método convergerá en pocas iteraciones a la solución.

#### 4.2.6.2 Personas sin gafas

El segundo caso que se puede destacar es el de personas sin gafas como se puede observar en la parte Izquierda de la Figura (4-11). Para este tipo de sujeto de análisis se sigue un procedimiento similar al de las personas que utilizan gafas, pero con la diferencia de que en vez de buscar puntos que tienen una temperatura mínima, buscamos puntos con una temperatura máxima como se aprecia en la parte Derecha de la misma figura. En [25] se propone usar la temperatura de los periorbitales como representativa para determinar si una persona tiene o no estrés, en este caso se utilizará esta idea para determinar la posición de los ojos gracias a los periorbitales.



Figura 4-11: Izq: Imagen en escala de grises. Dcha: Región de periorbitales.



La razón de por la cual se utiliza esta zona en vez del ojo, es porque las personas tienden a pestañear con mucha frecuencia efecto el cual es posible que baje la temperatura del ojo, cosa que no sucede en la zona periorbital.

Otro motivo del uso de esta zona es que es una región más precisa de encontrar que la del ojo a ser de menor tamaño (la temperatura está muy concentrada en los lagrimales del ojo), y además sólo es necesario hallar una única zona periorbital, ya que por regla general los ojos de una persona están alineados.

#### 4.2.7 Obtención de la región de interés

Una vez se han obtenido  $C1$  y  $C2$ , tal y como se ha indicado en los pasos anteriores, se dispone de una buena localización aproximada de los ojos o la zona central de las lentes tal y como se muestra en la Figura (4-12). En esta misma figura se puede observar cuatro puntos  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  y  $V4$  que definirían la zona objetivo que se está intentando hallar desde un principio. Para poder hallar estos  $V$ , es necesario hallar un nuevo punto llamado  $M1$ , el cual corresponde con la posición central de ambos clúster  $C1$  y  $C2$ . En el caso de que únicamente se hallase sólo uno de los clúster,  $M1$  sería igual a la posición del clúster hallado.

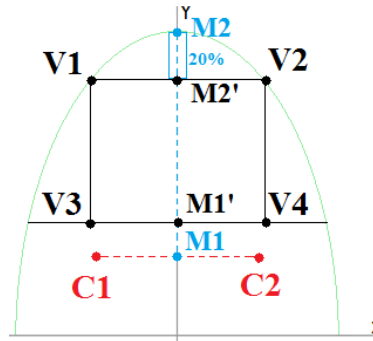


Figura 4-12: Puntos de interés.

Una vez que se ha determinado  $M1$ , es posible calcular la posición de  $M2$  usando la expresión (4.4), obteniendo como resultado las ecuaciones (4.8) y (4.9) para dicho cálculo.

$$x^2 - 2x_0x + \left(x_0^2 - a^2 + \frac{(y - y_0^2)a^2}{b^2}\right) = 0 \quad (4.8)$$

$$y^2 - 2y_0y + \left(y_0^2 - b^2 + \frac{(x - x_0^2)b^2}{a^2}\right) = 0 \quad (4.9)$$

Sin embargo  $M2$  no es útil por defecto para encontrar los vértices  $V1$  y  $V2$ , debido a que no existe un espacio suficiente para poder formar un rectángulo ya que  $M2$  corresponde con el punto más alto del segmento formado por  $M1$  y  $M2$  que corta la elipse. Debido a este motivo es necesario determinar un nuevo punto que se denominará  $M2'$  que corresponde con la posición original de  $M2$  pero modificando su componente de ordenada para que sea igual a un 20% menor que la original. Este valor ha sido determinado empíricamente y asegura que se podrá obtener un área lo suficientemente ancha como para poder obtener las temperaturas medias de la región tal y como puede observarse en la siguiente sección "4.2.8 Obtención de temperatura media y corrección de temperaturas".

Por otro lado es necesario hallar el valor del punto  $M1'$  para poder determinar los valores de  $V3$  y  $V4$ . Para esto tenemos dos posibilidades: Determinar  $M1'$  basado en las cejas de una persona o determinar  $M1'$  de forma aproximada.

#### 4.2.7.1 Hallar $M1'$ basado en las cejas de una persona

Para detectar la zona correspondiente a las cejas, se podrían utilizar infinidad de métodos, heurísticos o deterministas. Incluso se podría utilizar el algoritmo de clústering propuesto en las secciones anteriores. No obstante se ha decidido utilizar un método determinista que es útil para encontrar zonas en una imagen basándose únicamente en la información que tenemos de ella. El método empleado es el cálculo de las integrales proyectivas.

Las integrales proyectivas como bien dice su nombre se trata de la suma de los valores de una imagen en una determinada proyección o ángulo. En el caso concreto de las integrales proyectivas horizontales y verticales el cálculo pasa a ser trivial debido a que únicamente es necesario calcular la suma de los valores por columnas o por filas.

De esta forma analizando la proyección en el sentido horizontal del eje correspondiente a la mitad superior de la elipse tal y como se muestra en la Figura (4-13), es posible detectar una zona en la cual existe un mínimo que corresponde con la zona de las cejas debido a que dicha zona tiene una propiedad en nuestro cuerpo de disipar la temperatura. En este caso el valor de  $M1'$  corresponde con el valor donde se encuentra un mínimo entre dos regiones más altas.



Figura 4-13: Detección de cejas por medio de integrales proyectivas.

#### 4.2.7.2 Hallar $MI'$ por aproximación

Esta forma de hallar  $MI'$  es la complementaria a la anterior, ya que la búsqueda basada en las cejas prevalecería antes que esta aproximación. Para determinar  $MI'$  de esta forma se ha seleccionado de forma empírica quitar un 20% en la componente de ordenada de  $MI$  la distancia formada entre los puntos  $M2$  y  $MI$ .

Esta aproximación depende mucho de la morfología de la cara de una persona, de ahí que el 20% que se elimina de la componente de ordenada pueda ser un poco excesivo en algunos casos, y elimine una pequeña parte de la frente.

Una vez  $MI'$  ha sido hallado por medio de una los dos anteriores casos, se puede hacer uso finalmente de la ecuación (4.8) para el cálculo de los puntos  $V1$  y  $V2$ . De igual forma se utiliza la ecuación (4.9) para la obtención de  $V3$  y  $V4$ .

Sin embargo estos puntos no son reales, ya que hemos realizado todas las modificaciones hasta este punto partiendo de una imagen que ha sido rotada como vimos en las secciones anteriores. Es en este punto donde nuevamente se hace uso de las expresiones (4.6) y (4.7) para devolver los aquellos puntos comprendidos entre los vértices calculados a su posición original como puede observarse en la Figura (4-14).

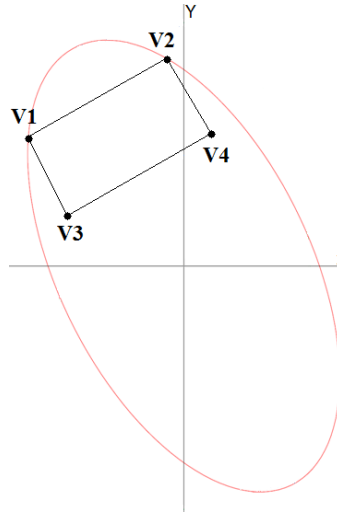


Figura 4-14: Región de la frente de la persona.

Como resultado este paso generará una nueva máscara binaria en la que sólo tendrán un valor igual a 255, aquellos puntos que se encuentran entre los vértices  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  y  $V4$ .

#### 4.2.8 Obtención de la temperatura media y corrección de temperaturas

El último paso del método propuesto, retoma la imagen original devuelta por la cámara térmica antes de que se transformara a escala de grises, ya que es esa la que contiene toda la información de las temperaturas por puntos en la imagen.

De esta forma utilizando la máscara binaria creada en el paso anterior y la máscara creada en el paso "4.2.2 Binarización" (la máscara de binarización se usa para descartar aquellos elementos como cejas o el cabello o regiones que no corresponden con la piel), se realiza el promedio de todos los puntos de la región y se obtiene un valor de temperatura denominado  $T_{sin}$ .

Pero aunque las cámaras térmicas devuelvan un valor de temperatura, dicho valor en muchos casos no se puede considerar correcto ya que es posible que sucedan dos cosas, que el sensor no esté calibrado, o que desconozcamos el valor de la emisividad del objeto que se está midiendo. Por ello es necesario corregir el valor de  $T_{sin}$  para que devuelva una temperatura con un valor aceptable. Para ello se utiliza la ley de Stefan-Boltzmann (4.10).

$$Q_{emitida} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (4.10)$$

Donde:

- $Q_{emitida}$ : Es el flujo de calor.
- $\varepsilon$ : Es la emisividad del objeto.
- $\sigma$ : Es la constante de Stefan-Boltzmann.  $5.67 \text{ E-}8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
- $A_s$ : Es el área superficial del objeto.
- $T_s$ : Es la temperatura superficial del objeto.

La forma de aplicar la corrección es utilizar la ley anterior suponiendo que el flujo de calor de dos objetos deben de ser iguales tal y como muestra la expresión (4.11).

$$Q_{emitida} = Q_{emitida}' \quad (4.11)$$

Así pues si consideramos que  $\varepsilon$  del objeto que observa la cámara es igual a 1, y conocemos el valor de  $T_{sin}$  (es la temperatura media devuelta por el sensor) y  $T_{cor}$  (es la temperatura real a la que se encuentra ese objeto tomada con algún instrumento de medida) se puede calcular el nuevo valor de emisividad  $\varepsilon'$  por medio de la ecuación (4.12), que corrige la temperatura  $T_{sin}$ .

$$(273.15 + T_{sin})^4 = \varepsilon' \cdot (273.15 + T_{cor})^4 \quad (4.12)$$

Una vez hallado el nuevo valor de la emisividad, se vuelve a la ecuación (4.12) y se obtiene una nueva ecuación (4.13) para la obtención de la temperatura correcta o corregida ( $T_{cor}$ ) en base a las temperaturas que devuelve la cámara térmica ( $T_{sin}$ ).

$$T_{cor} = \frac{(273.15 + T_{sin})}{\sqrt[4]{\epsilon'}} - 273.15 \quad (4.13)$$

Esta corrección de temperaturas es necesaria aplicarla cada vez que se obtiene un dato de temperatura de la cámara térmica, pero el cálculo de  $\epsilon'$  sólo se necesita hallar una única vez.

Para la determinación de la tasa de muestras por segundo tomada por la cámara serán necesarias pruebas de calibración utilizando la formulación del presente apartado que se realizarán en la siguiente sección.

### 4.3 Diseño de experimentos

La metodología seguida para la realización de los experimentos puede observarse en la Figura (4-15). Los experimentos se separarán en tres módulos para comprobar cada uno de los aspectos más relevantes del método propuesto y así analizar cómo se comporta en diferentes escenarios.

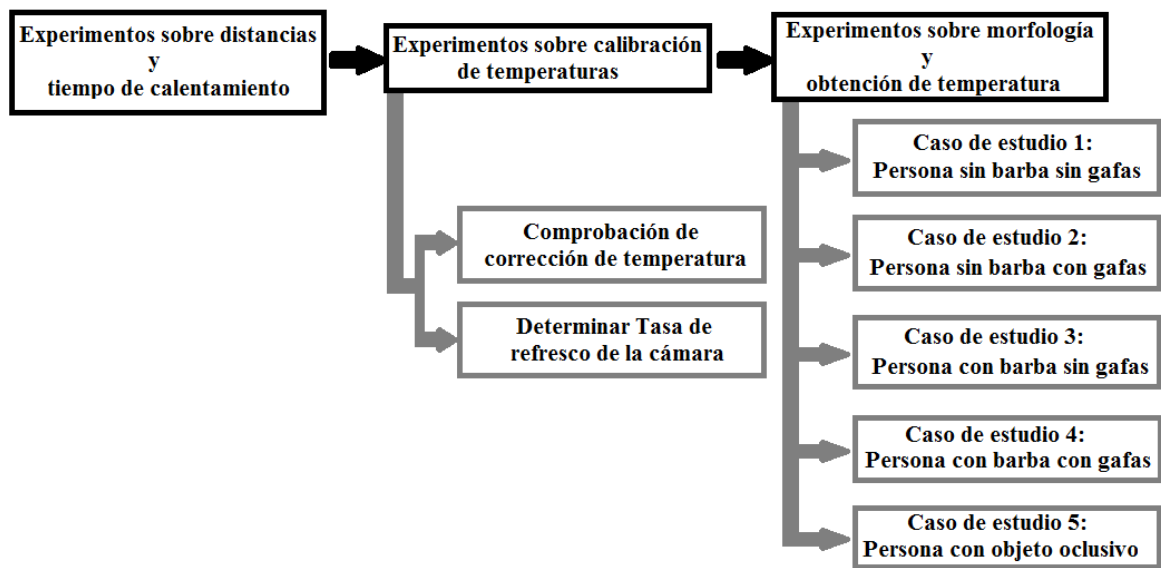


Figura 4-15: Esquema de experimentación.

#### 4.3.1 Instrumentos y equipos utilizados

Los dispositivos y equipos utilizados para las pruebas de laboratorio son:

- Ordenador Portátil Asus M50SV, 3GB de RAM 512MB VRAM, procesador intel core centrino T8300. Como equipo principal de desarrollo y ejecución.
- Ordenador Portátil Asus K55V, 16GB de RAM, 2GB VRAM, procesador intel core i7 3610QM. Como equipo auxiliar de desarrollo y testeo.

- Arduino Mega con microcontrolador ATmega2560 16MHz. Utilizado como equipo de adquisición de temperaturas en calibración.

Los instrumentos utilizados para realizar las mediciones de temperaturas exceptuando el DHT22, son los que se expresan en la Tabla (4-1), de los cuales el utilizado en el sistema de detección automática es la cámara térmica Optris PI 160. Las características técnicas extendidas se pueden ver en el "Anexo A: Datasheet Optris PI 160".

Las características detalladas del sensor de temperatura ambiente y humedad relativa DHT22 se pueden observar en el "Anexo B: Datasheet AM2302 DTH22".

Tabla 4-1: Instrumentos de medición de temperaturas utilizados.

	Optris PI160	Seikuve MT1881	Thermoval duo scan	Termistor NTC AVX 100K $\Omega$
Tipo	Sensor de Infrarrojos	Termómetro superficial	Termómetro infrarrojo	Componente electrónico
Rango de medida	-20°C a 900°C	34°C a 42°C	34°C a 42,2°C	-55°C a 150°C
Precisión de medida	0,1°C	0,1°C	0,2°C	$\pm 1\%$
Temperatura de funcionamiento	0°C a 50°C	18°C a 28°C	16°C a 35°C	-55°C a 150°C
Lente	6°x5°	No dispone	No dispone	No dispone
Resolución	160x120	No dispone	No dispone	No dispone
Tasa de refresco	120Hz	No dispone	No dispone	No dispone

#### 4.3.2 Experimentos sobre distancias y tiempo de calentamiento

Los experimentos de distancia tienen el objetivo de estimar la separación mínima y necesaria para que el sistema se comporte adecuadamente. Para ello se realizarán pruebas con la cara de un sujeto de prueba y se colocará a diferentes distancias conocidas. Además la distancia también estará presente en la interconexión entre dispositivos, debido a que es necesario comprobar cuales son los efectos que provocan largas prolongaciones de cables de transmisión de datos entre la cámara térmica y el PC.

En cuanto a las pruebas de calentamiento será necesario determinar cuál es el tiempo de calentamiento adecuado para que la cámara térmica se comporte como debe, y analizar los problemas que pueden ocurrir si no se lleva cabo el proceso de calentamiento completo.

El esquema de estos experimentos es el que se muestra en la Figura (4-16) en el que se determinará diferentes distancias hasta determinar la óptima.

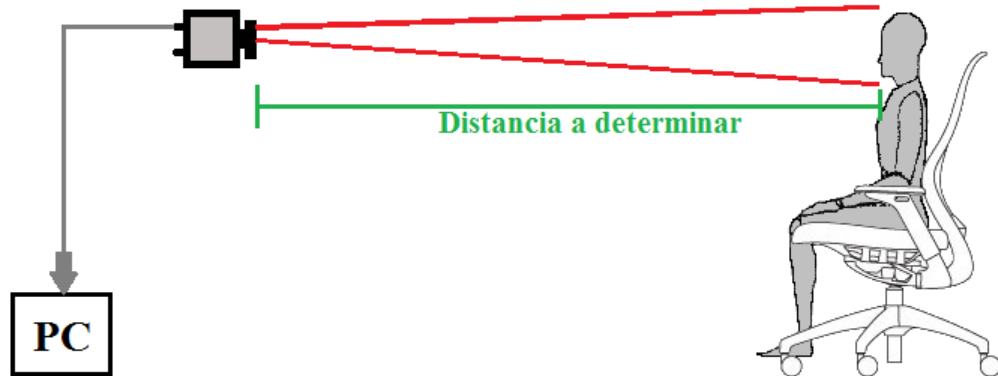


Figura 4-16: Esquema de experimentación para determinar distancia del sensor.

### 4.3.3 Experimentos sobre calibración de temperaturas

Para llevar a cabo las pruebas de calibración de las temperaturas de la cámara térmica, se utilizará un esquema similar al que aparece detallado en la Figura (4-17). Donde las mediciones de temperaturas superficiales de la placa se obtendrán haciendo uso de un anillo de termistores para minimizar el impacto de posibles valores de temperaturas fuera de rango. A su vez se ha dejado un pequeño hueco en la zona central del anillo, para que la cámara puedan enfocar y captar temperaturas de dicha zona.

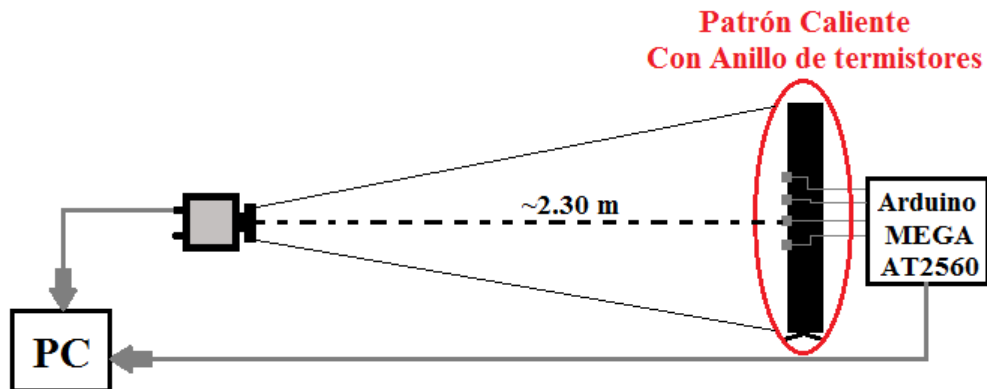


Figura 4-17: Esquema de experimentación para calibración de temperaturas.

Se realizarán pruebas para determinar la tasa de adquisición de imágenes por segundo con valores iguales a 0.1fps y 1fps. El motivo de utilizar unas tasas de refresco tan bajas es debido a que normalmente en un intervalo de tiempo tan ajustado, una unidad de climatización no puede modificar el gradiente de temperaturas, con lo que no es necesario obtener datos redundantes.

Para conseguir que las condiciones ambientales sean las mismas se utilizarán tal y como puede observarse en la Figura (4-18) dos cámaras térmicas del mismo fabricante, enfocando al mismo

patrón caliente. El periodo de tiempo que ocupará esta prueba será de dos días completos para obtener así un volumen considerable de datos que poder analizar.

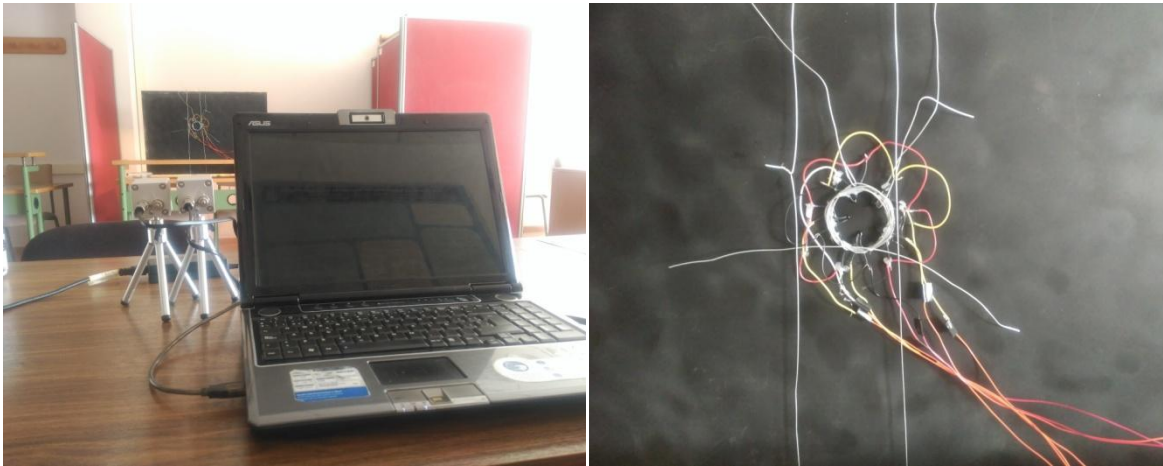


Figura 4-18: Izq: Vista general del proceso de calibración. Dcha: Anillo de termistores en el patrón de calibración.

De la realización de estas pruebas se obtendrán dos gráficos (*uno para cada configuración de tasa de refresco*) similares al que se ha generado sintéticamente en la Figura (4-19).

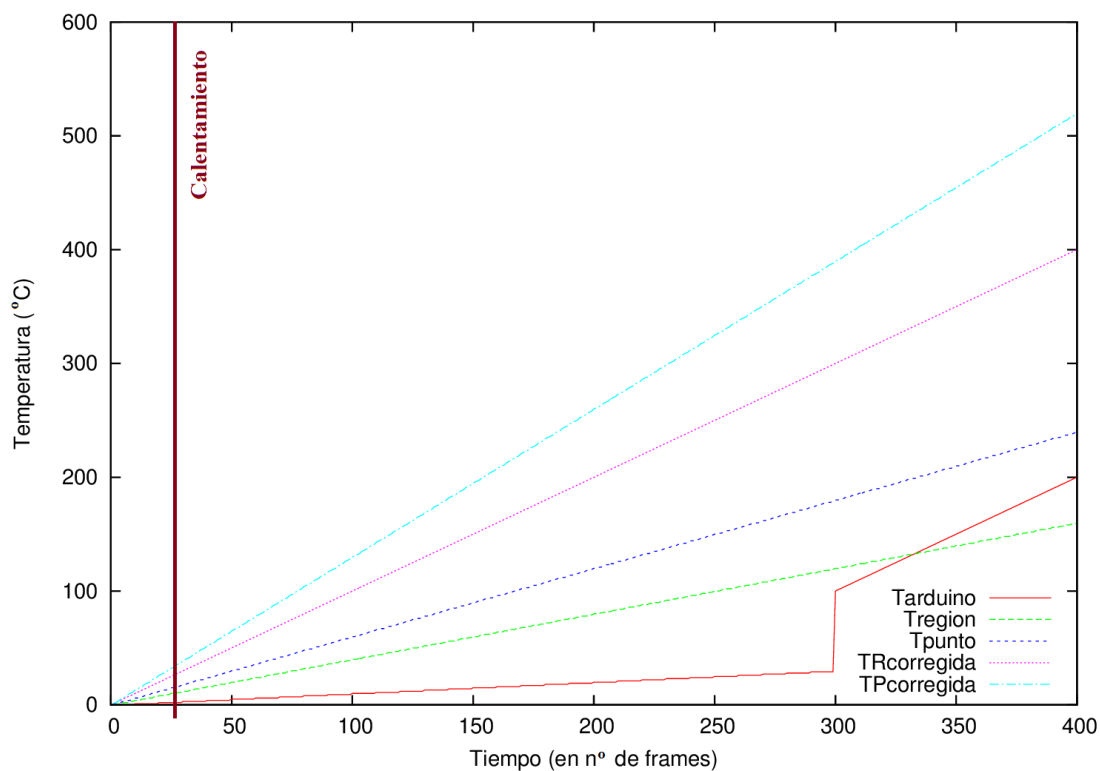


Figura 4-19: Ejemplo de datos de temperaturas y ajuste.



En ambos gráficos aparecerá una línea divisoria denominada *calentamiento* que representa el tiempo en el cual la cámara térmica estará calentando sus componentes internos y dará lugar a resultados erróneos en las mediciones. Estos valores no se tomarán en cuenta para los experimentos pero sí que aparecerán reflejados en el gráfico. Además se mostrarán diferentes señales que representan:

- *Tarduino*: Representa los datos obtenidos de los termistores conectados a *Arduino Mega*.
- *Tregion*: Representa los datos obtenidos de la cámara térmica en una pequeña región rectangular contenida dentro del anillo de termistores de 9x9 puntos. Estos valores de temperatura están sin calibrar.
- *Tpunto*: Representa los datos obtenidos de la cámara térmica en un único punto en el interior del anillo que forman los termistores. Estos valores de temperatura están sin calibrar.
- *TRcorregida*: Representa los datos de *Tregion* corregidos mediante la ecuación (4.13).
- *TPcorregida*: Representa los datos de *Tpunto* corregidos mediante la ecuación (4.13).

Finalmente para determinar la tasa de refresco más adecuada que debe de tener la cámara térmica y comprobar al mismo tiempo la efectividad del método de corrección de temperaturas, se hallará la raíz cuadrada del error cuadrático medio utilizando la ecuación (4.14) con los datos obtenidos del anillo de termistores (*Tarduino*) y las temperaturas ajustadas (*TRcorregida*, *TPcorregida*, las cuales han seguido el procedimiento establecido en el apartado "4.2.8 Obtención de temperatura media y corrección de temperaturas").

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.14)$$

Además una vez determinado el error que representa la ecuación (4.14) se analizará la tasa de refresco óptima de la cámara térmica que se utilizarán en los siguientes experimentos. También se determinará cuáles de los datos recogidos son los que menos errores producen, si la obtención de un único punto o la obtención de la media de temperatura de los puntos de una región.

#### 4.3.4 Experimentos sobre morfología y obtención de temperatura

Para la comprobación de las diferentes etapas del método propuesto, se considerarán los casos de estudio que se muestran en la rama correspondiente a esta sección en la Figura (4-15). Debido a que se desconoce o bien no existen métricas asociadas a la estimación de los errores de algunas partes del método, éstas se analizarán de forma subjetiva.

Para cada caso de estudio se visualizará:

- Nombre del caso.
- Imagen en escala de grises obtenida de emplear la ecuación (4.1) a los datos que devuelve la cámara térmica.
- Imagen umbralizada con la ecuación (4.2).

- Imagen umbralizada en la que se superpondrán la elipse y el ángulo que se debe de rotar de forma numérica. Además se representarán los ejes cartesianos en la posición donde se localiza el centro de la elipse.
- Imagen umbralizada y rotada con la región de la frente marcada y la temperatura medida de forma numérica.
- Error cuadrático medio calculado con la ecuación (4.14) de la temperatura de la cámara térmica y la que proporciona el instrumento de medida *Seikuve MT1881*.

El esquema a seguir para la elaboración de estos experimentos es el que se observa en la Figura (4-20).

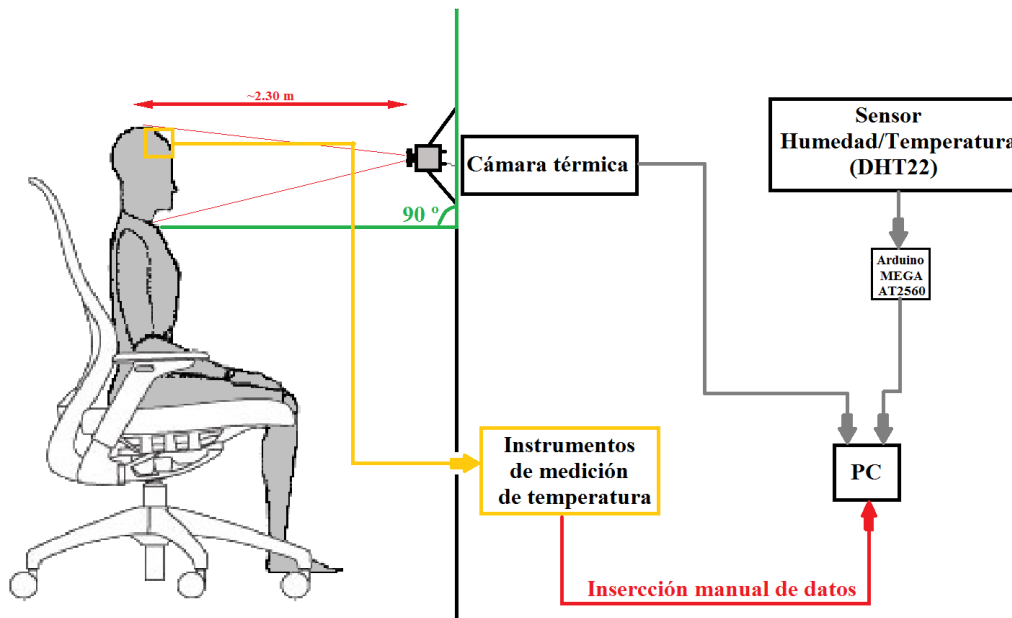


Figura 4-20: Esquema para experimentos sobre la morfología y obtención de temperatura.

Además para cada caso de estudio se analizarán diferentes casos de rotaciones e inclinaciones de la cabeza para determinar si el método se comporta de forma robusta a los cambios de giros y posición.

#### 4.3.4.1 Caso de estudio 1: Persona sin barba y sin gafas.

Con este caso de estudio se pretende analizar el comportamiento del sistema con el colectivo de la población que tienen una morfología estándar sin tener en cuenta elementos estéticos como vello facial o bigote.

Las pruebas que componen este experimento serán:

- 1a) Posición normal de la cabeza respecto al eje cartesiano  $[X:0^\circ, Y:0^\circ, Z:0^\circ]$ .
- 1b) Giro hacia la derecha en el eje Y  $[X:0^\circ, Y:50^\circ, Z:0^\circ]$ .
- 1c) Giro hacia la izquierda en el eje Y  $[X:0^\circ, Y:50^\circ, Z:0^\circ]$ .

- 1d) Giro hacia la derecha en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:50°].
- 1e) Giro hacia la izquierda en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:60°].
- 1f) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia adelante [X:30°, Y:0°, Z:0°].
- 1g) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia atrás [X:15°, Y:0°, Z:0°].

#### 4.3.4.2 Caso de estudio 2: Persona sin barba y con gafas.

Este caso de estudio comprobará el comportamiento del sistema con personas que tienen problemas de visión o que necesitan lentes por cualquier motivo. Dichos sujetos representan el segundo colectivo al que está enfocado el sistema.

Las pruebas que componen este experimento serán:

- 2a) Posición normal de la cabeza respecto al eje cartesiano [X:0°, Y:0°, Z:0°].
- 2b) Giro hacia la derecha en el eje Y [X:0°, Y:50°, Z:0°].
- 2c) Giro hacia la izquierda en el eje Y [X:0°, Y:60°, Z:0°].
- 2d) Giro hacia la derecha en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:30°].
- 2e) Giro hacia la izquierda en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:5°].
- 2f) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia adelante [X:10°, Y:0°, Z:0°].
- 2g) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia atrás [X:45°, Y:0°, Z:0°].

#### 4.3.4.3 Caso de estudio 3: Persona con barba y sin gafas.

Debido a que mucha gente por motivos estéticos o personales disponen en sus rostros de vello facial, el sistema también deberá de contemplar estos casos, siendo este el objetivo de este caso de estudio. Con estas pruebas se determinará si al cambiar la morfología de la cara el sistema es capaz de solventar dicha dificultad y detectar la frente para obtener su temperatura.

Las pruebas que componen este experimento serán:

- 3a) Posición normal de la cabeza respecto al eje cartesiano [X:0°, Y:0°, Z:0°].
- 3b) Giro hacia la derecha en el eje Y [X:0°, Y:40°, Z:0°].
- 3c) Giro hacia la izquierda en el eje Y [X:0°, Y:40°, Z:0°].
- 3d) Giro hacia la derecha en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:30°].
- 3e) Giro hacia la izquierda en el eje Z [X:0°, Y:10°, Z:30°].
- 3f) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia adelante [X:20°, Y:0°, Z:0°].
- 3g) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia atrás [X:45°, Y:0°, Z:0°].

#### 4.3.4.4 Caso de estudio 4: Persona con barba y con gafas.

Este es el último caso que se puede estudiar para considerar que se ha estudiado la mayoría del colectivo de la población. Este experimento estudiará el efecto que provocan dos elementos (*gafas* y *barba*) que modifican la morfología de la cara en una imagen de termografía.

Las pruebas que componen este experimento serán:

- 4a) Posición normal de la cabeza respecto al eje cartesiano [X:0°, Y:0°, Z:0°].
- 4b) Giro hacia la derecha en el eje Y [X:0°, Y:25°, Z:0°].
- 4c) Giro hacia la izquierda en el eje Y [X:0°, Y:30°, Z:0°].
- 4d) Giro hacia la derecha en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:20°].
- 4e) Giro hacia la izquierda en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:45°].
- 4f) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia adelante [X:20°, Y:0°, Z:0°].
- 4g) Inclinación de la cabeza en el eje X hacia atrás [X:20°, Y:0°, Z:0°].

#### 4.3.4.5 Caso de estudio 5: Persona con objeto oclusivo.

Este caso de estudio pretende avanzar más allá y probar el método en un escenario en el cual la morfología de la cara cambia enormemente frente a las premisas iniciales bajo las que se ha desarrollado el sistema.

Se estudiará el caso de una persona que está resfriada y necesita utilizar una mascarilla. Con este caso también quedarían contemplados aquellos casos en los que una persona por ser alérgica al polen del ambiente necesita el uso de una mascarilla.

Las pruebas que componen este experimento serán:

- 5a) Posición normal de la cabeza respecto al eje cartesiano [X:0°, Y:0°, Z:0°].
- 5b) Giro hacia la derecha en el eje Y [X:0°, Y:25°, Z:0°].
- 5c) Giro hacia la izquierda en el eje Y [X:0°, Y:25°, Z:0°].
- 5d) Giro hacia la derecha en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:40°].
- 5e) Giro hacia la izquierda en el eje Z [X:0°, Y:0°, Z:40°].

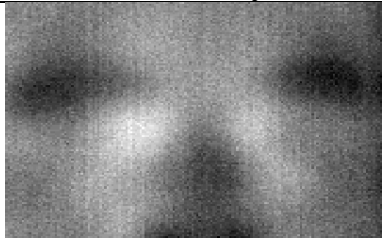
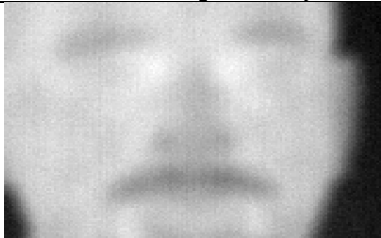




## 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se describen los resultados de los experimentos realizados que se detallaron en la sección "4.3 Diseño de experimentos".

### 5.1 Resultados de experimentos sobre distancias y tiempo de calentamiento.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos al posicionar la cámara térmica a diferentes distancias y tiempo de calentamiento siguiendo el esquema que muestra la Figura (4-16).

Tabla 5-1: Experimentos de distancia.

<i>Efecto de la distancia entre la persona y la cámara térmica</i>		
		
<b>0.5 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1.5 m</b>
		
<b>2 m</b>	<b>2.1 m</b>	<b>2.4 m</b>

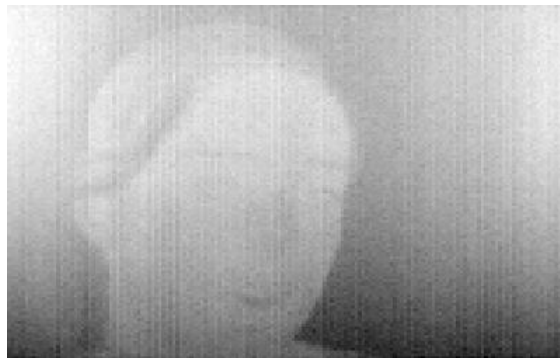


Figura 5-1: Ejemplo de resultado de prolongación del cable y de mal calentamiento.

Puede apreciarse claramente de las diferentes pruebas realizadas en la Tabla (5-1) que la cámara térmica debe estar posicionada a una distancia aproximadamente de 2.3 m. Esta distancia no puede ser fija debido al tamaño de las cabezas de las diferentes personas, pero nunca inferior a 2 m.

Además como puede observarse en la Figura (5-1) , al usar una prolongación del cable que une la cámara térmica con el PC, se obtienen resultados erróneos en las imágenes térmicas debido principalmente a que existen pérdidas en la alimentación de la cámara térmica y no es capaz de calentarse adecuadamente. El efecto de la Figura (5-1) es el mismo que cuando no se respetan los 15 min de calentamiento.

## 5.2 Resultados de experimentos sobre calibración de temperaturas.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos realizados sobre calibración de temperaturas y tasa de refresco de la cámara térmica, tal y como se detalló en la Figura (4-17).

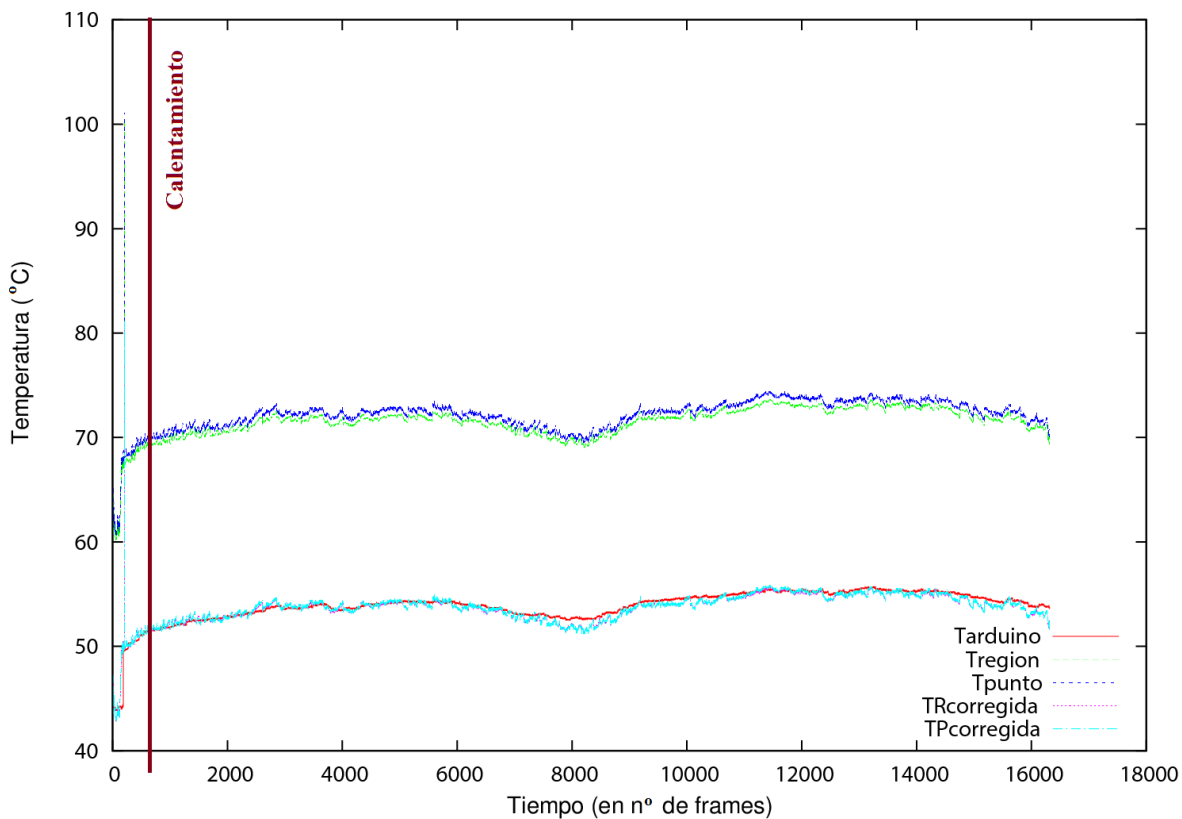


Figura 5-2: Calibración para 0.1 fps.

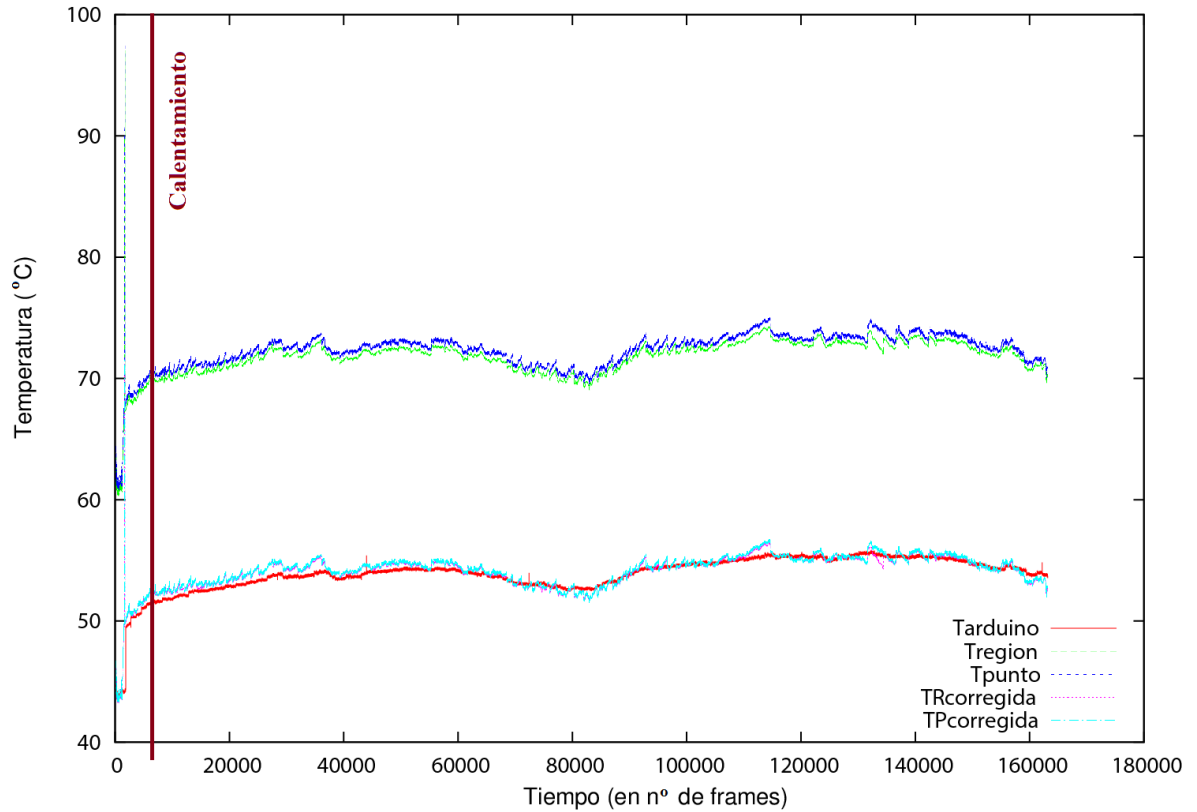


Figura 5-3: Calibración para 1 fps.

A continuación se muestra en la Tabla (5-2), los errores asociados a las figuras anteriores.

Tabla 5-2: Errores diferentes tasas de refresco.

	0.1 fps	1fps
RMSE (TPcorregida)	0.45	0.52
RMSE (TRcorregida)	0.44	0.45

De estos resultados se puede observar que es necesario realizar la calibración de las temperaturas que devuelve la cámara térmica para reducir los errores hasta un rango aceptable. Tal y como puede apreciarse en la Tabla (5-2), la tasa de refresco que menos errores tiene respecto a la señal *Tarduino*, es de 0.1 imágenes por segundo, o de manera aproximada una imagen cada 30 segundos. Esto se debe a que la cámara térmica utilizada se basa en la tecnología de microbolómetros, los cuales al estar más tiempo expuestos a la radiación de los objetos, mejores datos de temperatura proporcionan.

No obstante el resultado de los datos que arroja la cámara configurada a una tasa de refresco de 1 fps y su ajuste de las temperaturas como puede observarse en la Tabla (5-2), es igualmente aceptable aunque los valores tengan más desviaciones. Además como puede observarse en la

Figura (5-3) existe la clara ventaja de obtener más datos cada minuto a diferencia de lo que se puede notar en la Figura (5-2).

Se ha decidido establecer la tasa de refresco a 0.1 fps debido a que se ha priorizado la precisión de los datos antes que la cantidad. Además se ha comprobado que la elección de varios puntos reduce las desviaciones de los datos, con lo que queda justificado de esta forma que en la sección "4.2.8 *Obtención de temperatura media y corrección de temperaturas*" se realice un promedio de varios puntos de la frente de una persona.





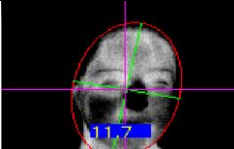
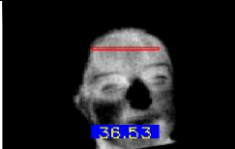


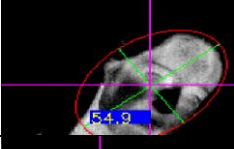
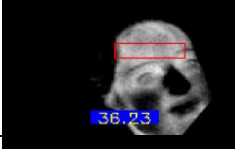


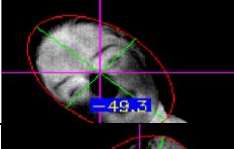



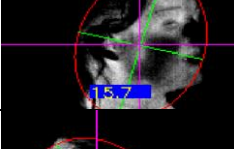
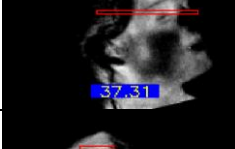


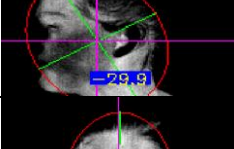
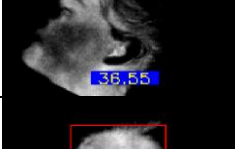


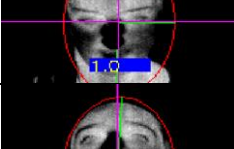



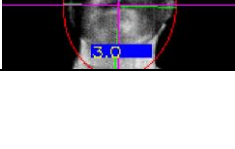

### 5.3 Resultados de experimentos sobre morfología y obtención de temperatura.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos realizados de cada uno de los casos de estudios que se detallaron en la sección "4.3.4 Experimentos sobre morfología y obtención de temperatura". Los resultados de la medición de temperaturas con los diferentes instrumentos de medida de cada uno de los casos de estudio se puede encontrar en el "Anexo C: Resultados de mediciones de temperatura de los casos de estudio".

#### 5.3.1 Resultados del caso de estudio 1: Persona sin barba y sin gafas.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos del caso de estudio 1.

Tabla 5-3: Casos del experimento 1.

	<i>Escala Gris</i>	<i>Umbralizada</i>	<i>Ajuste elipse</i>	<i>Región frente</i>	<i>Error</i>
<i>1a</i>					0.33
<i>1b</i>					0.07
<i>1c</i>					0
<i>1d</i>					0.51
<i>1e</i>					0.35
<i>1f</i>					0.45
<i>1g</i>					0.55

Puede observarse en la Tabla (5-3), que a la imagen de la prueba *Ia* se le aplica una rotación cuando se podría haber evitado. Esto se debe a que en la fase de umbralización el cabello del sujeto de estudio obstruye parte de la frente y la mejor elipse que se ajusta a la imagen es una rotada. Se puede destacar que también sería deseable que la zona de la frente estuviese delimitada por más puntos de los que en este caso el algoritmo es capaz de determinar.

Respecto a los casos *Ib* y *Ic* se puede observar como el algoritmo realiza una corrección del ángulo sin encontrar dificultades y obtiene claramente la región de la frente.

En el caso de los experimentos que realizan giros en torno al eje Z, que corresponden con el caso *Id* y *Ie*, se puede observar que el algoritmo no es capaz de detectar correctamente la zona de la frente al menos en el caso *Id*. Esto se debe principalmente a que el algoritmo no está preparado para contemplar los casos en los que las rotaciones sean tan pronunciadas, pero pone de manifiesto que con pequeñas modificaciones sería capaz de detectar estas zonas sin problemas.

También puede observarse que el algoritmo no estaba preparado para rotaciones elevadas en el eje X, que corresponden con los casos *If* y *Ig*, pero que al menos para el sujeto de estudio que se presenta no tiene problemas en detectar parte de la zona de la frente.



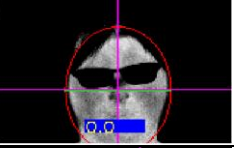

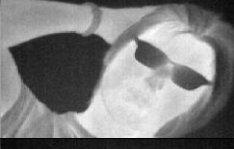

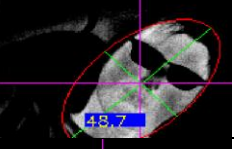
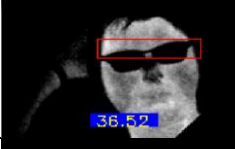
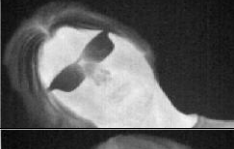

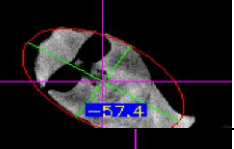
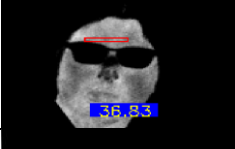


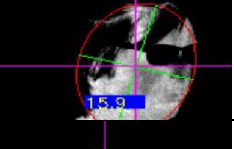
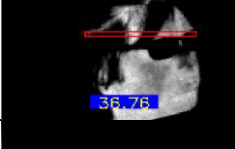


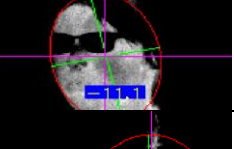
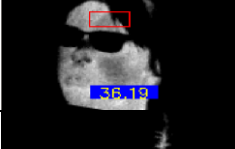


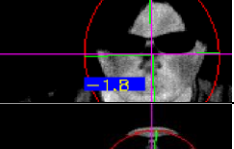
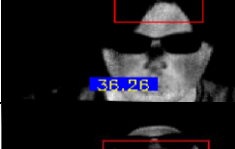


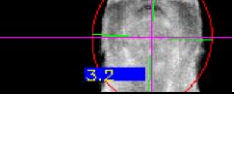
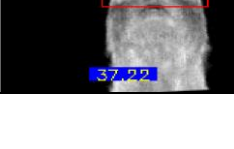
Respecto a las mediciones de temperatura se puede observar que en los casos *Id* y *Ig* son más elevadas debido a que se toman temperaturas de elementos como los periorbitales de los ojos.

En general hay que destacar que los experimentos exceptuando aquellos casos los cuales estaban fuera de los límites del algoritmo, son satisfactorios y aunque en algún caso como el *Ib* o *If* se incluyan las cejas o el pelo como región de la frente, no se tienen en cuenta a la hora de sacar la media de temperaturas tal y como se detalló en el paso del algoritmo "4.2.8 Obtención de temperatura media y corrección de temperaturas".

**5.3.2 Resultados del caso de estudio 2: Persona sin barba y con gafas.**

A continuación se muestran los resultados de los experimentos del caso de estudio 2.

Tabla 5-4: Casos del experimento 2

	<i>Escala Gris</i>	<i>Umbralizada</i>	<i>Ajuste elipse</i>	<i>Región frente</i>	<i>Error</i>
2a					0.42
2b					0.22
2c					0.03
2d					0.66
2e					0.11
2f					0.34
2g					0.62

Puede observarse en la Tabla (5-4), que a la imagen de la prueba *2a* no se le aplica una rotación alguna debido a que la cabeza está en una posición normal al eje de coordenadas. Y que al igual que sucedía en los experimentos anteriores la zona del cabello es descartada para el cálculo de la media de temperaturas.

En los casos *2b* y *2c* se puede observar como el algoritmo realiza una corrección del ángulo y se obtiene claramente la región de la frente. Hay que destacar que en el caso *2b* la región de la frente podría haber sido más precisa y que se obtiene este resultado debido a que los clústeres seleccionados en el paso "*4.2.6.1 Personas con gafas*" se quedan localizados debajo de las gafas debido a la a la rotación aplicada.

Referente a los experimentos que realizan giros en torno al eje *Z*, que corresponden con el caso *2d* y *2e*, se puede observar que el algoritmo no es capaz de detectar correctamente la zona de la frente al menos en el caso *2d*, debido a que la rotación es muy pronunciada cosa que no sucede en el caso *2e* que se detecta correctamente la zona de la frente pero el ángulo de rotación de este caso si está dentro de los límites aceptados por el algoritmo.

Al igual que sucede en los casos *2d* y *2e*, en los casos *2f* y *2g*, al aplicarse una rotación menos pronunciada en el caso *2f* el algoritmo si es capaz de detectar la zona de la frente sin problemas pero falla cuando se aumenta más de lo permitido como se demuestra con el caso *2g*.



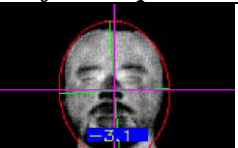
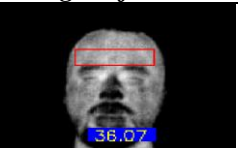


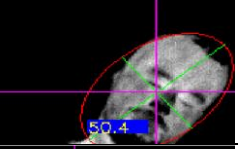
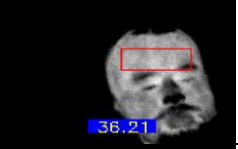


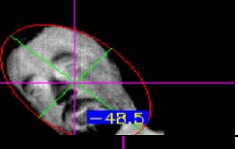
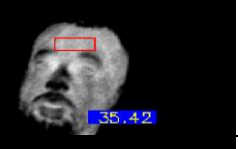


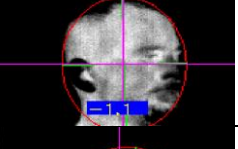




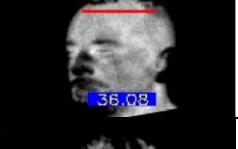


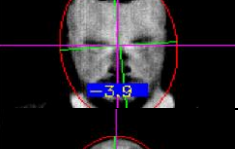
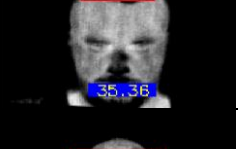

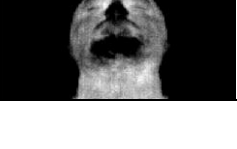
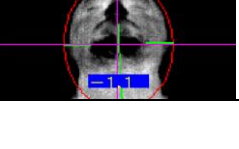

Respecto a las mediciones de temperatura se observa como cabría esperar que los casos *2d* y *2g* son los que las temperaturas se desvían más y por tanto el error cuadrático medio es mayor.

En general hay que destacar que los experimentos aplicados a una persona con gafas han dado lugar a resultados satisfactorios.

### 5.3.3 Resultados del caso de estudio 3: Persona con barba y sin gafas.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos del caso de estudio 3.

Tabla 5-5: Casos del experimento 3

	<i>Escala Gris</i>	<i>Umbralizada</i>	<i>Ajuste elipse</i>	<i>Región frente</i>	<i>Error</i>
<i>3a</i>					0.23
<i>3b</i>					0.09
<i>3c</i>					0.38
<i>3d</i>					0.58
<i>3e</i>					0.12
<i>3f</i>					0.16
<i>3g</i>					0.80

Puede observarse de la Tabla (5-5), que a la imagen de la prueba *3a* se le aplica una rotación de pocos grados debido a que la cabeza está en una posición normal al eje de coordenadas y todo funciona correctamente.

En los casos *3b* y *3c* se puede observar como el algoritmo realiza una corrección del ángulo y se obtiene claramente la región de la frente. Hay que destacar que en ambos de estos dos casos el sujeto de estudio tiene expresiones faciales distintas. Por ejemplo en el que el caso *3b* se encuentra con los ojos cerrados con lo que la zona de los ojos que es una de las más cálidas junto a los periorbitales se minimiza. Y por otro lado en el caso *3c* se encuentra con las cejas arqueadas hacia arriba. Con esto se demuestra que el algoritmo desarrollado es también invariante a las expresiones faciales que pueda tener una persona en el momento de la captura de datos. La región de la frente en ambos casos se detecta correctamente y los errores en la temperatura no son elevados.



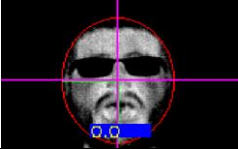











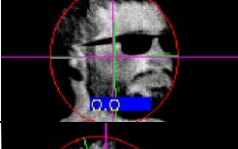



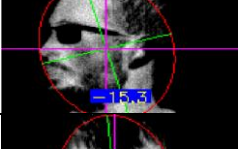
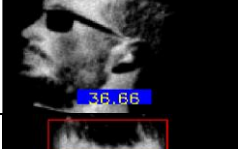


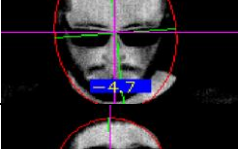
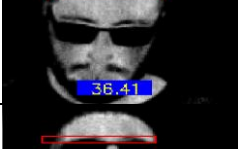


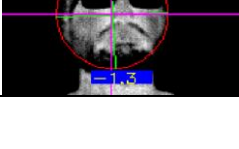

Para los casos *3d* y *3e* que son los que corresponden a las rotaciones en el eje Z puede observarse que el método sigue cometiendo fallos en cuanto a la detección de la zona de la frente, pero que son inferiores a los cometidos en los experimentos anteriores. Además se puede observar algo muy interesante en el caso *3e*, debido a que este caso si se observa adecuadamente tiene una combinación de dos rotaciones, es decir, tiene una rotación en el eje Z pero otra en el eje Y, y el método corrige sin problemas las del eje Y. En cuanto a los errores podemos destacar que en el caso *3e* son más elevados principalmente porque hay gran parte de la cabeza de la que se obtienen puntos que no corresponden con la frente y por tanto se encuentran a una temperatura distinta.

Respecto a los casos *3f* y *3g*, al aplicarse una rotación menos pronunciada en el caso *3f* el algoritmo si es capaz de detectar la zona de la frente aunque podría obtener una zona más amplia de ella, pero el algoritmo encuentra dificultades cuando se aumenta el ángulo más de lo permitido como se demuestra con el caso *3g*. Además en este último caso al obtener temperaturas de la zona de los periorbitales el algoritmo proporciona más errores en la medición de temperaturas.

**5.3.4 Resultados del caso de estudio 4: Persona con barba y con gafas.**

A continuación se muestran los resultados de los experimentos del caso de estudio 4.

Tabla 5-6: Casos del experimento 4

	<i>Escala Gris</i>	<i>Umbralizada</i>	<i>Ajuste elipse</i>	<i>Región frente</i>	<i>Error</i>
<i>4a</i>					0.06
<i>4b</i>					0.01
<i>4c</i>					0.31
<i>4d</i>					0.28
<i>4e</i>					0.46
<i>4f</i>					0.21
<i>4g</i>					0.04

Puede observarse de la Tabla (5-6), que en la imagen de la prueba *4a* no se aplica ninguna rotación puesto que la cabeza está centrada en el eje de coordenadas. Además se puede destacar en este caso que la morfología está más alterada debido a que el sujeto de estudio se encontraba bostezando en el momento de la toma de datos, con lo que se demuestra la robustez del método frente a cambios en la forma de la cara. Aunque la región de la frente podría ser mayor, se puede considerar como suficiente para obtener la temperatura representativa de la frente.

Respecto a los casos *4b* y *4c* se puede observar como el algoritmo realiza una corrección del ángulo sin encontrar dificultades y obtiene claramente la región de la frente. Aunque nuevamente al igual que en el caso *4a* la región de la frente detectada podría ser más amplia.

En el caso de los experimentos que realizan giros en torno al eje Z, que corresponden con el caso *4d* y *4e*, se puede observar que el algoritmo es capaz de detectar parte de la zona de la frente, pero que aplica pequeñas rotaciones indeseadas como es el caso *4e*.

También puede observarse que el algoritmo como se ha comentado en casos anteriores no estaba preparado para rotaciones elevadas en el eje X que corresponden con los casos *4f* y *4g*, sin embargo en los experimentos realizados con este sujeto de estudio el algoritmo ha sido capaz de detectar la zona de la frente y obtener su temperatura.



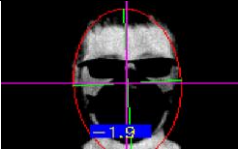
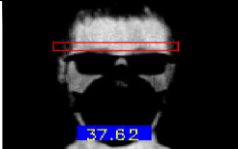


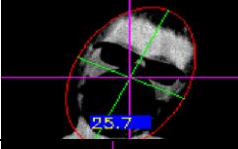







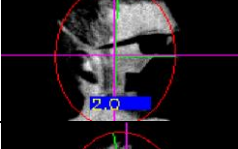



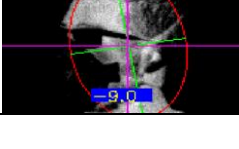

Respecto a las mediciones de temperatura se puede observar que los errores de medición de todas las pruebas realizadas en este experimento no son muy relevantes exceptuando el caso *4e* en el cual el error sí que es un poco más elevado.



**5.3.5 Resultados del caso de estudio 5: Persona con objeto oclusivo.**

A continuación se muestran los resultados de los últimos experimentos correspondientes al caso de estudio 5.

Tabla 5-7: Casos del experimento 5

	<i>Escala Gris</i>	<i>Umbralizada</i>	<i>Ajuste elipse</i>	<i>Región frente</i>	<i>Error</i>
<i>5a</i>					0.08
<i>5b</i>					0.03
<i>5c</i>					0.31
<i>5d</i>					0.40
<i>5e</i>					0.54

Las pruebas realizadas en este experimento tienen como objetivo probar hasta qué punto al modificar la morfología de la cara de una persona, es capaz llegar el método desarrollado. Hay que especificar que estas pruebas se le aplicaron al mismo sujeto que aparecía en los experimentos "5.4.3 Resultados del caso de estudio 4: Persona con barba con gafas", pero que por encontrarse bajo los efectos del resfriado utilizaba una mascarilla y su temperatura corporal era más elevada.

La imagen de la prueba 5a que aparece en la Tabla (5-7), corresponde con la posición normal sin rotaciones de la cabeza del usuario. Observamos que el método desarrollado no encuentra dificultades en detectar la zona de la frente y que los errores se pueden considerar despreciables.

En cuanto a los casos 5b y 5c que corresponden con los giros en el eje Y se observa como el método no encuentra dificultades en realizar las rotaciones necesarias aún cuando los elementos que definen la cara de una persona son muy limitados. En cuanto a la temperatura puede verse que al igual que sucedía en el caso anterior los errores no son muy elevados.

Finalmente en los casos *5d* y *5e* nuevamente al igual que en todos los casos que se han experimentado hasta este punto se ha intentado probar la robustez llevando al límite al algoritmo desarrollado y explorando situaciones como la de estos dos casos en los que las rotaciones son más pronunciadas de los que se contempló en un principio que podría soportar el algoritmo. Se puede observar en ambos casos que no se encuentran problemas para detectar parte de la zona de la frente, pero que en el caso *5e*, se comenten más errores por tomar puntos que no corresponden con la frente.

#### 5.4 Limitaciones

De los resultados de la realización de los experimentos, podemos destacar que existen diferentes limitaciones relacionadas con los dispositivos utilizados y con el método desarrollado. Un resumen de las mismas puede observarse en la Tabla (5-8).

Las limitaciones provocadas por los dispositivos utilizados en especial la cámara térmica, exige que el usuario se sitúe a una distancia nunca inferior a 2.30 m debido a que la lente de la que dispone la cámara térmica no permite que se visualice correctamente las imágenes desde distancias inferiores. Además aunque el fabricante especifica que la distancia del cable USB que alimenta y transmite los datos de la cámara puede llegar hasta los 20 m, tal y como se ha podido apreciar en los experimentos se obtienen problemas al prolongar el cable básico del que dispone la cámara. Esto se debe principalmente a que existe un problema de alimentación a distancia mayores y pérdidas de energía cuando se utilizan prolongadores. Sin bien es cierto que ambas limitaciones se podrían solventar cambiando la lente y exigiendo al fabricante un cable de mayor distancia de una única pieza sin necesidad de prolongadores, todas ellas incurrirían en costes y envío de la cámara térmica al fabricante con lo que no se podría haber realizado el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster.

Tras la realización de los experimentos podemos observar limitaciones con los ángulos a los que puede estar girada una cabeza debido a que el sistema en ciertas ocasiones aplica pequeñas rotaciones cuando la cabeza está en una posición normal.

Por otro lado se observa que atendiendo a los ejes expuestos en la Figura (4-6) en los giros sobre el eje Z no es posible girar más de 10° debido a que el método desarrollado considerará como frente de una persona una zona que realmente no lo es y dependiendo del sujeto de estudio en dicha zona sólo tendrá pelo. Lo mismo sucede con las inclinaciones de la cabeza hacia atrás, o lo que es lo mismo una rotación en el eje X.

Tabla 5-8: Resumen de limitaciones.

Limitación	Valores
Distancia [m]	> 2 m
Ángulo de rotación en el eje X [°]	± 20°
Ángulo de rotación en el eje Y [°]	± 45°
Ángulo de rotación en el eje Z [°]	± 10°

## 6 CONCLUSIONES

Se puede observar a lo largo del presente documento que el sistema que se propuso en la Figura (4-2), podría perfectamente llevarse a cabo hoy en día ya que no existen dificultades técnicas. Aunque de la realización del presente Trabajo de Fin de Máster se pueden destacar varias dificultades. La primera de ellas ha sido en la puesta en marcha del funcionamiento de la cámara térmica, debido a que el fabricante proporciona un manual detallado de la aplicación con la que se vende la cámara térmica, pero no ocurre lo mismo bajando al nivel de programación con las librerías que proporcionan, llegando incluso al nivel de preguntar a las personas que realizaron las librerías mediante correos privados. Además se han encontrado dificultades a la hora de seleccionar los algoritmos debido a que el método desarrollado cuenta con muchas etapas, las cuales se pueden realizar de una infinidad de formas, y se ha tenido que detectar cual era la más factible en cuanto a dificultad de implementación y de aplicabilidad en cada caso. Además al tratarse de un tema latente en el campo de estudio de la comunidad científica le añade un extra de dificultad puesto que no se han podido analizar todas y cada unas de las propuestas de los autores.

En cuanto al método desarrollado los experimentos corroboran que es capaz de detectar la zona que se estableció como objetivo al principio de este documento sin dificultad siempre y cuando no se traspasen los límites de rotaciones expuestos en la Tabla (5-8), debido a que una vez superados estos límites no se asegura el correcto funcionamiento del algoritmo. Si bien es cierto que algunos de esos límites pueden parecer limitantes, hay que pensar que una persona normalmente suele tener la cabeza en una posición normal al eje de coordenadas, debido a que por temas de confort se tiende a esta posición. Por otro lado tal y como se detalla en la experimentación el método desarrollado es bastante robusto llegando incluso a sobrepasar los límites impuestos y funcionar correctamente en algunos casos.

Referente al tamaño de las zonas detectadas como frente que proporciona el algoritmo es cierto que se observan tras la experimentación realizada que en algunos casos dicha zona es mayor y en otros casos es menor, aunque se puede considerar como suficiente para el análisis que se pretende hacer posteriormente. Además que de los experimentos de calibración realizados se concluyó que la mejor opción era una región de puntos, pero los resultados de un único punto tampoco están muy alejados de los valores correctos de temperatura, y en casos no críticos como la climatización de un hogar una diferencia de  $\pm 2$  °C tampoco supondría grandes alteraciones al confort térmico, aunque probablemente sí incurriría en un pequeño aumento en el consumo de los equipos de climatización.

Respecto a los resultados de temperaturas obtenidos, puede observarse tal y como se detallan en los experimentos que se tratan de valores aceptables de temperaturas, aunque existen pequeñas desviaciones que pueden ser debidas al contacto de la zona de la frente con otros objetos, que los sujetos de experimentación se hayan puesto nerviosos, o que la temperatura ambiente ha cambiado sin que el sensor térmico haya podido readaptarse para la obtención fiable de los datos en crudo del sensor.

Finalmente tras analizar el presente Trabajo de Fin de Máster en su conjunto y tras observar cada una de las debilidades y fortalezas puede considerarse que se han cumplido todos y cada uno de los objetivos propuestos inicialmente y que realizando pequeñas modificaciones del sistema, se podría ampliar su aplicabilidad a diferentes campos de estudio no sólo a ambientes climatizados, sino a entornos hospitalarios como se comentó al principio de este documento, o en aplicaciones de seguridad.



## 7 TRABAJOS FUTUROS

Sería interesante aumentar la versatilidad del método desarrollado en cuanto a la cantidad de personas que puede aparecer en una imagen que viene en parte relacionado con la distancia máxima a la que se puede colocar la cámara térmica. Con esta mejora se podría llegar a analizar el control de temperatura en una sala de conferencias o en un auditorio llegando a controlar las temperatura de la sala de forma global o escalonada por gradas.

Respecto a las limitaciones que se mostraron en las secciones anteriores del método desarrollado sería necesario ampliar la capacidad de rotaciones en los ejes Z y X debido a que dotaría de más robustez al sistema. Para ampliar la cobertura de ángulos se podría agregar una etapa de tracking o seguimiento de objetos, en el que el objeto a seguir sería la zona de la frente de la persona. Un método que sería idóneo para el caso de estudio es el algoritmo de *filtrado de partículas* [26].

Tal y como se detalló en los objetivos del presente documento sería necesario en trabajos posteriores enlazar los resultados que arroja el sistema desarrollado con una unidad que realice una estimación de la temperatura ambiental y la temperatura proporcionada por el presente sistema y que automáticamente regule la temperatura del sistema de climatización.

Además se está trabajando en la implementación del sistema desarrollado en un escenario real fuera del laboratorio para su comprobación en un entorno concreto. En concreto se pretende implementar en un quirófano de cirugía cardíaca del Hospital Universitario Reina Sofía de Córdoba. Debido a que el control de la temperatura de la persona es crítica en este tipo de ambientes climatizados y los expertos no disponen de métodos no invasivos para la obtención de temperaturas. En la Figura (7-1) se puede apreciar el nuevo esquema de montaje para su colocación en quirófano. Los datos de temperatura para este caso, no tienen como destino una unidad de control de temperatura, sino volcar dichos datos en un servidor para su posterior análisis por los expertos adecuados.

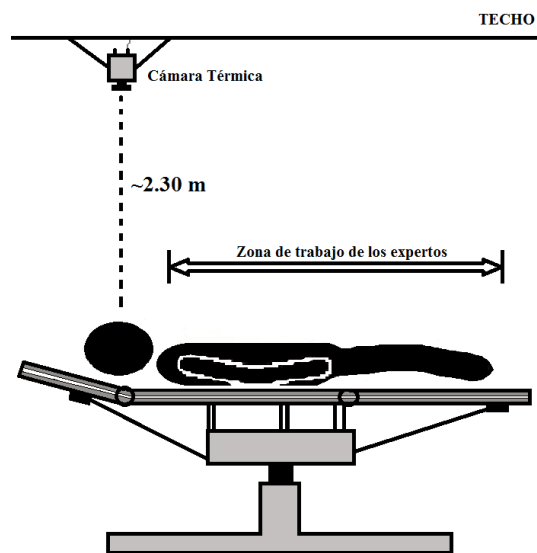


Figura 7-1: Esquema de montaje para el sistema en quirófano.

Finalmente cabe destacar que en la actualidad están apareciendo cámaras térmicas de menor coste que las utilizadas para la realización del presente Trabajo de Fin de Máster. Un ejemplo de ello lo encontramos en el fabricante de cámaras termográficas *Flir*, con su modelo *Flir One* [27]. Estos nuevos dispositivos son más pequeños y de un coste muy reducido y una portabilidad mayor al ir conectadas a sistemas tipo *Android* o *IOS*. Por ello dado que el método de detección desarrollado no está vinculado al sensor de un fabricante en concreto, se podrían reducir los costes del sistema propuesto, utilizando los sensores proporcionados por *Flir*. Sería necesario volver a determinar distancias debido a que la óptica de los sensores son distintas y realizar algunos ajustes, pero dotaría al sistema de una portabilidad y aplicabilidad en diferentes campos de estudio aún más extensa de la temática que abarca el presente documento.

## REFERENCIAS

- [1] Claudio Prado, "Cámaras térmicas," *Revista negocios de Seguridad (rnds)*, no. 62, pp. 144-156, Jul. 2011.
- [2] S. Zafeiriou, C. Zhang, and 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.
- [3] S. Farokhi, J. Flusser, and U. Ullah Sheikh, "Near infrared face recognition: A literature survey," *Computer Science Review*, vol. 21, pp. 1–17, Aug. 2016.
- [4] M. Akhloufi, A. Bendada, and J.-C. Batsale, "State of the art in infrared face recognition," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 3–26, Jun. 2008.
- [5] P. Viola and M. Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features," *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. CVPR 2001.
- [6] R. E. Schapire, "Explaining AdaBoost," *Empirical Inference*, pp. 37–52, 2013.
- [7] C. Garcia and M. Delakis, "Convolutional face finder: a neural architecture for fast and robust face detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 11, pp. 1408–1423, Nov. 2004.
- [8] H. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade, "Neural Network-Based Face Detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 1, pp. 23-38, Jan. 1998.
- [9] J. Dowdall, I. Pavlidis, and G. Bebis, "Face Detection in the Near-IR Spectrum," *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 7, pp. 565–578, Jul. 2003.
- [10] C. Di Maria, J. Allen, J. Dickinson, C. Neoh, and P. Perros, "Novel Thermal Imaging Analysis Technique for Detecting Inflammation in Thyroid Eye Disease," *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 99, no. 12, pp. 4600–4606, Dec. 2014.
- [11] W. Zeiler, G. Boxem, and D. Vissers, "Improved Personalized Comfort: A Necessity for a Smart Building," *Smart Innovation, Systems and Technologies*, pp. 705–715, 2013.
- [12] A. Ghahramani, G. Castro, B. Becerik-Gerber, and X. Yu, "Infrared thermography of human face for monitoring thermoregulation performance and estimating personal thermal comfort," *Building and Environment*, vol. 109, pp. 1–11, Nov. 2016.
- [13] F. De Oliveira, S. Moreau, C. Gehin, and A. Dittmar, "Infrared Imaging Analysis for Thermal Comfort Assessment," *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Aug. 2007.
- [14] MG Sanjith Kumar, D Saravanan, "A novel approach to face recognition based on thermal imaging," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, no. 03, pp. 141–144, Mar. 2014.

- [15] W. K. Wong, J. H. Hui, J. B. M. Desa, N. I. N. B. Ishak, A. B. Sulaiman, and Yante Binti Mohd Nor, "Face detection in thermal imaging using head curve geometry," *5th International Congress on Image and Signal Processing*, Oct. 2012.
- [16] M. Marzec, R. Koprowski, Z. Wróbel, A. Kleszcz, and S. Wilczyński, "Automatic method for detection of characteristic areas in thermal face images," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 74, no. 12, pp. 4351–4368, Oct. 2013..
- [17] K.Purushotham , Mosire Mahipal. "A Performance Study on Face Recognition Mechanism using Visible and Thermal Infrared Imagery," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 4, no. 6, pp. 2288–2291, Jun 2013.
- [18] Cho Siu Yeung, Ting Chan Wai, and Quek Chai, "Thermal Facial Pattern Recognition for Personal Verification Using Fuzzy CMAC Model," *International journal of innovative, Information and Control*, Vol. 7, pp.203 – 222, 2011.
- [19] S. Wang, Z. Liu, P. Shen, and Q. Ji, "Eye localization from thermal infrared images," *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 10, pp. 2613–2621, Oct. 2013.
- [20] S. Filipe and L. A. Alexandre, "Thermal Infrared Face Segmentation: A New Pose Invariant Method," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 632–639, 2013.
- [21] S. Filipe and L. A. Alexandre, "Improving Face Segmentation in Thermograms Using Image Signatures," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 402–409, 2010.
- [22] Andrew Fitzgibbon and Robert B. Fisher, "A buyer's guide to conic fitting," In *InBritish Machine Vision Conference*, pp. 513–522, 1995.
- [23] G. Bradski, "The opencv library," *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [24] MacQueen, James. "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*. Vol. 1. No. 14. 1967.
- [25] D. Shastri, P. Tsiamyrtzis, and I. Pavlidis, "Periorbital thermal signal extraction and applications," *30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Aug. 2008.
- [26] S. Maskell, "A tutorial on particle filters for on-line nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," *IEE International Seminar Target Tracking: Algorithms and Applications*, 2001.
- [27] "Flir One", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.flir.es/flirone/>. [Accedido: 8-jun-2017].



**A N E X O**  
**S**



## ANEXO A : DATASHEET OPTRIS PI 160

### Technical Data 11

## 2 Technical Data

### 2.1 General specifications

Environmental rating:	IP67 (NEMA-4)
Ambient temperature:	0...50 °C [PI 160/ PI 2xx/ PI 400/ PI 640/ PI 640 G7] 5...50 °C [PI 1M] 0...70 °C [PI 450/ PI 450 G7]
Storage temperature:	-40...70 °C (-40...85 °C [PI 450/ PI 450 G7])
Relative humidity:	10...95 %, non-condensing
Material (housing):	Aluminum, anodized
Dimensions:	PI 160/ PI 200/ PI 230: 45 x 45 x 62 - 65 mm (depending on lens) PI 400/ 450 (450 G7)/ 640 (640 G7)/ 1M: 46 x 56 x 86 - 90 mm (depending on lens)
Weight:	PI 160: 195 g, PI 200/ 230: 215 g, PI 400/ PI 450 (450 G7)/ PI 640 (640 G7)/ PI 1M: 320 g
Cable length (USB 2.0):	1 m (standard), 3 m, 5 m, 10 m, 20 m
Vibration <sup>1)</sup> :	IEC 60068-2-6 (sinus shaped) IEC 60068-2-64 (broadband noise)

Shock1: IEC 60068-2-27 (25 g and 50 g)

**1) Used standards for vibration and shock:**

- IEC 60068-1:1988 + Corr. 1986 + A1: 1992 DIN EN 60068-1:1995-03 „Umweltpfahrungen - Teil 1: Allgemeines und Leitraden“
- IEC 60068-2-6:2007 DIN EN 60068-2-6; VDE 0468-2-6:2008-10 „Umgebungseinflüsse - Teil 2-6: Prüfverfahren - Prüfung Fc: Schwingen (sinusförmig)“
- IEC 60068-2-27:2008 DIN EN 60068-2-27; VDE 0468-2-27:2010-02 „Umgebungseinflüsse - Teil 2-27: Prüfverfahren - Prüfung Ea und Leitraden; Schockern“
- IEC 60068-2-47:2005 DIN EN 60068-2-47:2006-03 „Umgebungseinflüsse - Teil 2-47: Prüfverfahren - Befestigung von Prüflingen für Schwing-, Stoß- und ähnliche dynamische Prüfungen“
- IEC 60068-2-64:2008 DIN EN 60068-2-64; VDE 0468-2-64:2009-04 „Umgebungseinflüsse - Teil 2-64: Prüfverfahren - Prüfung Fh: Schwingen, Breitbandrauschen (digital geregelt) und Leitraden“

**Figure 1:** Used standards

Stress program (camera in operation):

Shock, half sinus 25 g – testing Ea 25 g (acc. IEC 60068-2-27)		
Acceleration	245 m/s <sup>2</sup>	(25 g)
Pulse duration	11 ms	

**Technical Data** **13**

Number of directions	6	(3 axes with 2 directions each)
Duration	600 Shocks	(100 Shocks each direction)
<b>Shock, half sinus 50 g – testing Ea 50 g (acc. IEC 60068-2-27)</b>		
Acceleration	490 m/s <sup>2</sup>	(50 g)
Pulse duration	11 ms	
Number of directions	6	(3 axes with two directions each)
Duration	18 Shocks	(3 Shocks each direction)
<b>Vibration, sinus shaped – testing Fc (acc. IEC60068-2-6)</b>		
Frequency range	10 - 500 Hz	
Acceleration	29.42 m/s <sup>2</sup>	(3 g)
Frequency change	1 Octave/min	
Number of axes	3	
Duration	1:30 h	(3 x 0.30 h)

**Vibration, broadband noise – testing Fh (acc. IEC60068-2-64)**

Frequency range	10 - 2000 Hz		
Acceleration	39.3 m/s <sup>2</sup>	(4.01 gr <sub>RMS</sub> )	
Frequency spectrum	10 - 106 Hz	0.9610 (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	(0.010 g <sup>2</sup> /Hz)
	106 - 150 Hz	+6 dB/ Octave	
	150 - 500 Hz	1.9230 (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	(0.020 g <sup>2</sup> /Hz)
	500 - 2000 Hz	-6 dB/ Octave	
	2000 Hz	0.1245 (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	(0.00126 g <sup>2</sup> /Hz)
Number of axes	3		
Duration	3 h	(3 x 1 h)	

**Technical Data** **15**

**2.2 Electrical specifications**

Power Supply:	5 VDC (powered via USB 2.0 interface)
Current draw:	Max 500 mA
AO: Output Process Interface (PIF out)	0 - 10 V (Main measure area, measure area, internal temperature, flag status, alarm, frame sync, fail-safe, external communication) ▶ <b>Appendix F – Wiring diagrams PIF</b>
AI: Input Process Interface (PIF in)	0 - 10 V (Emissivity, ambient temperature, reference temperature, flag control, triggered recording, triggered snapshots, triggered line-scanner, uncommitted value) ▶ <b>Appendix F – Wiring diagrams PIF</b>
DI: Digital Input Process Interface	Flag control, triggered recording, triggered snapshots, triggered line-scanner ▶ <b>Appendix F – Wiring diagrams PIF</b>
Digital interface:	USB 2.0

### 2.3 Measurement specifications

	PI 160	PI 200 <sup>1)</sup>	PI 230 <sup>1)</sup>
Temperature ranges	-20...100 °C; 0...250 °C; 150...900 °C; Option: 200...1500 °C		
Spectral range	7.5 - 13 µm		
Detector	UFPA, 160 x 120 pixel @ 120 Hz	UFPA, 160 x 120 pixel @ 128 Hz <sup>3)</sup> 640 x 480 pixel (visual camera)	UFPA, 160 x 120 pixel @ 128 Hz <sup>3)</sup> 640 x 480 pixel (visual camera)
Lenses (FOV)	6° x 5°; 23° x 17°; 41° x 31°; 72° x 52°		
System accuracy <sup>2)</sup>	±2°C or ±2 %		
Temperature resolution (NETD):	0.08 K with 23°; 0.3 K with 6°; 0.1 K with 41° and 72°		
Warm-up time	10 min		
Emissivity	0.100...1.100		
Software	PiConnect		

<sup>1)</sup> For an ideal combination of IR and VIS image we recommend the 41° lens for PI200 and the 23° lens for PI230

<sup>2)</sup> At ambient temperature 23±5 °C; whichever is greater

<sup>3)</sup> The following options can be set: Option 1 (IR with 96 Hz at 160 x 120 px; VIS with 32 Hz at 640 x 480 px); Option 2 (IR with 128 Hz at 160 x 120 px; VIS with 32 Hz at 596 x 447 px)



Technical Data

	PI 400	PI 450	PI 450 G7
Temperature ranges	-20...100 °C; 0...250 °C; 150...900 °C; Option: 200...1500 °C	-20...100 °C; 0...250 °C; 150...900 °C	200...1500 °C
Spectral range	7.5 - 13 µm		
Detector	UFFPA, 382 x 288 pixel @ 80 Hz (switchable to 27 Hz)	UFFPA, 382 x 288 pixel @ 80 Hz (switchable to 27 Hz)	UFFPA, 382 x 288 pixel @ 80 Hz (switchable to 27 Hz)
Lenses (FOV)	13° x 10°, 29° x 22°, 38° x 29°; 53° x 40°, 62° x 49°, 80° x 56°	13° x 10°, 29° x 22°, 38° x 29°; 53° x 40°, 62° x 49°, 80° x 56°	13° x 10°, 29° x 22°; 53° x 40°; 80° x 56°
System accuracy <sup>1)</sup>	±2°C or ±2 %		
Temperature resolution (NETD):	0.08 K <sup>1)</sup> with 29°, 38°, 53°, 62° and 80°; 0.1 K <sup>1)</sup> with 13°	0.04 K <sup>1)</sup> with 29°, 38°, 53°, 62° and 80°; 0.06 K <sup>1)</sup> with 13°	130 mK (T <sub>air</sub> = 650 °C)
Warm-up time	10 min		
Emissivity	0.100...1.100		
Software	PI Connect		

<sup>1)</sup> Value is valid at 40 Hz and 25°C room temperature

<sup>2)</sup> At ambient temperature 23±5 °C; whichever is greater

	PI 640	PI 640 G7	PI 1M
Temperature ranges	-20...100 °C; 0...250 °C; 150...900 °C	200...1500 °C	450 <sup>1)</sup> ...1800 °C (27 Hz mode) 500 <sup>2)</sup> ...1800 °C (80 Hz and 32 Hz mode) 600 <sup>3)</sup> ...1800 °C (1 kHz mode)
Spectral range	7.5 - 13 µm	7,9 µm	0,85 - 1,1 µm
Detector	UFPA, 640 x 480 Pixel @ 32 Hz 640 x 120 Pixel @ 125Hz	UFPA, 640 x 480 Pixel @ 32 Hz 640 x 120 Pixel @ 125Hz	CMOS, 764 x 480 pixel @ 32 Hz 382 x 288 pixel @ 80 Hz/ (switchable to 27 Hz) 72x56 pixel @ 1 kHz 764 x 8 Pixel @ 1 kHz (fast linescanning-mode)
Lenses (FOV)	15° x 11°; 33° x 25°; 60° x 45°; 90° x 64°	15° x 11°; 33° x 25°; 60° x 45°; 90° x 64°	FOV@382x288 px: 20° x 15°, 13° x 10°, 7° x 5°, 4° x 3° FOV@764x480 px: 39° x 25°, 26° x 16°, 13° x 8°, 9° x 5°
System accuracy	±2°C or ±2 % <sup>4)</sup>		±1 % of reading (object temperature < 1400 °C)
Temperature resolution (NETD):	0.075 K <sup>1)</sup> with 33°	130 mK (T <sub>obj</sub> = 650 °C)	< 1K (700 °C), < 2K (1000 °C)
Warm-up time			10 min
Emissivity		0.100...1.100	
Software		PI Connect	

<sup>1)</sup> Value is valid at 32 Hz and 25°C room temperature

<sup>2)</sup> At ambient temperature 23±5 °C; whichever is greater

<sup>3)</sup> +75 °C start temperature for optics with focal length f= 50 mm, f= 75 mm

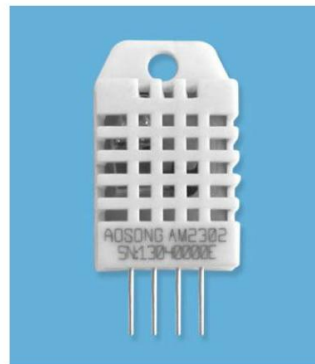
**ANEXO B : DATASHEET AM2302 DHT22**

參考資料

**AOSONG**

Temperature and humidity module

AM2302 Product Manual



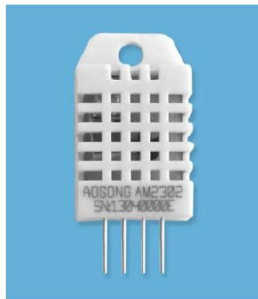
[www.aosong.com](http://www.aosong.com)



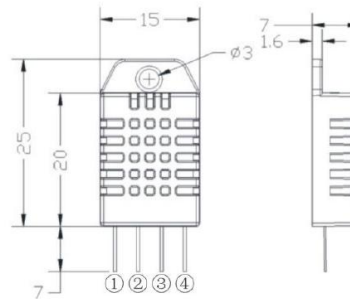
Temp, Humidity &amp; Dew point measurement experts

### 1、Product Overview

AM2302 capacitive humidity sensing digital temperature and humidity module is one that contains the compound has been calibrated digital signal output of the temperature and humidity sensors. Application of a dedicated digital modules collection technology and the temperature and humidity sensing technology, to ensure that the product has high reliability and excellent long-term stability. The sensor includes a capacitive sensor wet components and a high-precision temperature measurement devices, and connected with a high-performance 8-bit microcontroller. The product has excellent quality, fast response, strong anti-jamming capability, and high cost. Each sensor is extremely accurate humidity calibration chamber calibration. The form of procedures, the calibration coefficients stored in the microcontroller, the sensor within the processing of the heartbeat to call these calibration coefficients. Standard single-bus interface, system integration quick and easy. Small size, low power consumption, signal transmission distance up to 20 meters, making it the best choice of all kinds of applications and even the most demanding applications. Products for the 3-lead (single-bus interface) connection convenience. Special packages according to user needs.



Physical map



Dimensions (unit: mm)

### 2、Applications

HVAC, dehumidifier, testing and inspection equipment, consumer goods, automotive, automatic control, data loggers, home appliances, humidity regulator, medical, weather stations, and other humidity measurement and control and so on.

### 3、Features

Ultra-low power, the transmission distance, fully automated calibration, the use of capacitive humidity sensor, completely interchangeable, standard digital single-bus output, excellent long-term stability, high accuracy temperature measurement devices.



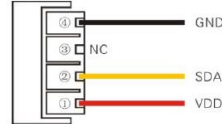
Temp, Humidity & Dew point measurement experts

4、The definition of single-bus interface

4.1 AM2302 Pin assignments

Table 1: AM2302 Pin assignments

Pin	Name	Description
①	VDD	Power (3.3V-5.5V)
②	SDA	Serial data, bidirectional port
③	NC	Empty
④	GND	Ground



PIC1: AM2302 Pin Assignment

4.2 Power supply pins ( VDD GND )

AM2302 supply voltage range 3.3V – 5.5V, recommended supply voltage is 5V.

4.3 Serial data ( SDA )

SDA pin is tri structure for reading, writing sensor data. Specific communication timing, see the detailed description of the communication protocol.

5、Sensor performance

5.1 Relative humidity

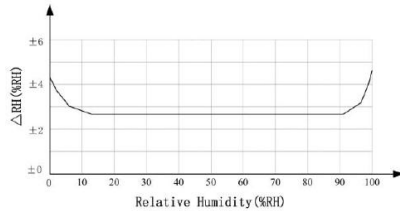
Table 2: AM2302 Relative humidity performance table

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy <sup>[1]</sup>	25°C		± 2		%RH
Repeatability			± 0.3		%RH
Exchange		Completely interchangeable			
Response <sup>[2]</sup>	1/e(63%)		<5		S
Sluggish			<0.3		%RH
Drift <sup>[3]</sup>	Typical		<0.5		%RH/yr

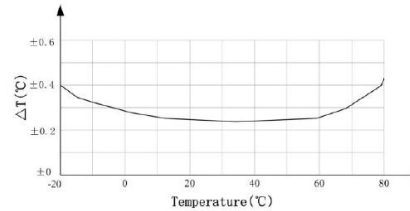
5.2 Temperature

Table 3: AM2302 Relative temperature performance

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		°C
n			16		bit
Accuracy			± 0.5	± 1	°C
Range		-40		80	°C
Repeat			± 0.2		°C
Exchange		Completely interchangeable			
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		°C/yr



Pic2: At25°C The error of relative humidity



Pic3: The maximum temperature error

## 6、Electrical Characteristics

Electrical characteristics, such as energy consumption, high, low, input, output voltage, depending on the power supply. Table 4 details the electrical characteristics of the AM2302, if not identified, said supply voltage of 5V. To get the best results with the sensor, please design strictly in accordance with the conditions of design in Table 4.

Table 4: AM2302 DC Characteristics

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Voltage		3.3	5	5.5	V
Power consumption <sup>[4]</sup>	Dormancy	10	15		μA
	Measuring		500		μA
	Average		300		μA
Low level output voltage	$I_{OL}$ <sup>[5]</sup>	0		300	mV
High output voltage	$R_p < 25 \text{ k}\Omega$	90%		100%	VDD
Low input voltage	Decline	0		30%	VDD
Input High Voltage	Rise	70%		100%	VDD
$R_{pu}$ <sup>[6]</sup>	VDD = 5V VIN = VSS	30	45	60	kΩ
Output current	turn on		8		mA
	turn off	10	20		μA
Sampling period		2			S

[1] the accuracy of the factory inspection, the sensor 25°C and 5V, the accuracy specification of test conditions, it does not include hysteresis and nonlinearity, and is only suitable for non-condensing environment.

[2] to achieve an order of 63% of the time required under the conditions of 25°C and 1m / s airflow.

[3] in the volatile organic compounds, the values may be higher. See the manual application to store information.

[4] this value at VDD = 5.0V when the temperature is 25°C, 2S / time, under the conditions of the average.

[5] low output current.

[6] that the pull-up resistor.

## 7、Single-bus communication ( ONE-WIRE )

### 7.1 Typical circuits for single bus

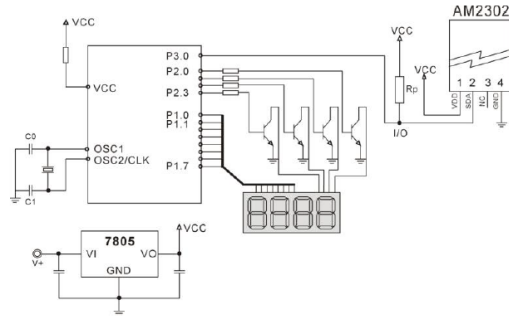
Microprocessor and AM2302 connection typical application circuit is shown in Figure 4. Single bus communication mode, pull the SDA microprocessor I / O port is connected.

#### Special instructions of the single-bus communication:

1. Typical application circuit recommended in the short cable length of 30 meters on the 5.1K pull-up resistor pullup resistor according to the actual situation of lower than 30 m.
2. With 3.3V supply voltage, cable length shall not be greater than 100cm. Otherwise, the line voltage drop will lead to the sensor power supply, resulting in measurement error.
3. Read the sensor minimum time interval for the 2S; read interval is less than 2S, may cause the temperature and humidity values are not allowed or communication is unsuccessful, etc..
4. Temperature and humidity values are each read out the results of the last measurement For real-time data that need continuous read twice, we recommend repeatedly to read sensors, and each read sensor interval is greater than 2 seconds to obtain accuratethe data.



Temp, Humidity & Dew point measurement experts



Pic4: AM2302 Typical circuits for single bus

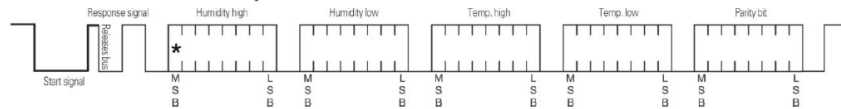
## 7.2. Single-bus communication protocol

### Single bus Description

AM2302 device uses a simplified single-bus communication. Single bus that only one data line, data exchange system, controlled by the data line to complete. Equipment (microprocessor) through an open-drain or tri-state port connected to the data line to allow the device does not send data to release the bus, while other devices use the bus; single bus usually require an external about 5.1kΩ pull-up resistor, so when the bus is idle, its status is high. Because they are the master-slave structure, only the host calls the sensor, the sensor will answer, so the hosts to access the sensor must strictly follow the sequence of single bus, if there is a sequence of confusion, the sensor will not respond to the host.

### Single bus to send data definition

SDA For communication and synchronization between the microprocessor and the AM2302, single-bus data format, a transmission of 40 data, the high first-out. Specific communication timing shown in Figure 5, the communication format is depicted in Table 5.



Pic5: AM2302 Single-bus communication protocol



Temp, Humidity & Dew point measurement experts

Table 5: AM2302 Communication format specifier

Name	Single-bus format definition
Start signal	Microprocessor data bus (SDA) to bring down a period of time (at least 800µ s) [1] notify the sensor to prepare the data.
Response signal	Sensor data bus (SDA) is pulled down to 80µ s, followed by high-80µ s response to host the start signal.
Data format	Host the start signal is received, the sensor one-time string from the data bus (SDA) 40 data, the high first-out.
Humidity	Humidity resolution of 16Bit, the previous high; humidity sensor string value is 10 times the actual humidity values.
Temp.	Temperature resolution of 16Bit, the previous high; temperature sensor string value is 10 times the actual temperature value; The temperature is the highest bit (Bit15) is equal to 1 indicates a negative temperature, the temperature is the highest bit (Bit15) is equal to 0 indicates a positive temperature; Temperature in addition to the most significant bit (Bit14 ~ bit 0) temperature values.
Parity bit	Parity bit = humidity high + humidity low + temperature high + temperature low

◎Single-bus data calculation example

Example 1: 40 Data received:

$\frac{0000\ 0010}{\text{High humidity } 8}$     
  $\frac{1001\ 0010}{\text{Low humidity } 8}$     
  $\frac{0000\ 0001}{\text{High temp. } 8}$     
  $\frac{0000\ 1101}{\text{Low temp. } 8}$     
  $\frac{1010\ 0010}{\text{Parity bit}}$

Calculate:

$0000\ 0010 + 1001\ 0010 + 0000\ 0001 + 0000\ 1101 = 1010\ 0010$  ( Parity bit )

Received data is correct:

**humidity:**  $0000\ 0010\ 1001\ 0010 = 0292\text{H (Hexadecimal)} = 2 \times 256 + 9 \times 16 + 2 = 658$   
 $\Rightarrow \text{Humidity} = 65.8\%RH$

**Temp.:**  $0000\ 0001\ 0000\ 1101 = 10\text{DH (Hexadecimal)} = 1 \times 256 + 0 \times 16 + 13 = 269$   
 $\Rightarrow \text{Temp.} = 26.9^\circ\text{C}$

◎Special Instructions:

When the temperature is below 0 °C, the highest position of the temperature data.

Example: -10.1 °C Expressed as 1 000 0000 0110 0101

**Temp.:**  $0000\ 0000\ 0110\ 0101 = 0065\text{H (Hexadecimal)} = 6 \times 16 + 5 = 101$   
 $\Rightarrow \text{Temp.} = -10.1^\circ\text{C}$

Example 2: 40 received data:

$\frac{0000\ 0010}{\text{High humidity } 8}$     
  $\frac{1001\ 0010}{\text{Low humidity } 8}$     
  $\frac{0000\ 0001}{\text{High temp. } 8}$     
  $\frac{0000\ 1101}{\text{Low temp. } 8}$     
  $\frac{1011\ 0010}{\text{Parity bit}}$

Calculate:

$0000\ 0010 + 1001\ 0010 + 0000\ 0001 + 0000\ 1101 = 1010\ 0010 \neq 1011\ 0010$  ( Validation error )

The received data is not correct, give up, to re-receive data.



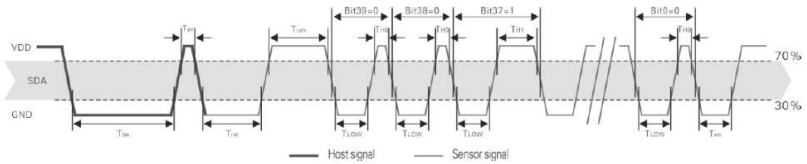


Temp, Humidity & Dew point measurement experts

7.3 Single-bus communication timing

User host (MCU) to send a start signal (data bus SDA line low for at least 800µ s) after AM2302 from Sleep mode conversion to high-speed mode. The host began to signal the end of the AM2302 send a response signal sent from the data bus SDA serial 40Bit's data, sends the byte high; data sent is followed by: Humidity high、Humidity low、Temperature high、Temperature low、Parity bit、Send data to the end of trigger information collection, the collection end of the sensor is automatically transferred to the sleep mode, the advent until the next communication.

Detailed timing signal characteristics in Table 6, Single-bus communication timing diagram Pic 6:



Pic 6: AM2302 Single-bus communication timing

**Note:** the temperature and humidity data read by the host from the AM2302 is always the last measured value, such as the two measurement interval is very long, continuous read twice to the second value of real-time temperature and humidity values, while two readtake minimum time interval be 2S.

Table 6: Single bus signal characteristics

Symbol	Parameter	min	typ	max	Unit
T <sub>be</sub>	Host the start signal down time	0.8	1	20	ms
T <sub>go</sub>	Bus master has released time	20	30	200	µs
T <sub>rel</sub>	Response to low time	75	80	85	µs
T <sub>reh</sub>	In response to high time	75	80	85	µs
T <sub>low</sub>	Signal "0", "1" low time	48	50	55	µs
T <sub>h0</sub>	Signal "0" high time	22	26	30	µs
T <sub>h1</sub>	Signal "1" high time	68	70	75	µs
T <sub>rn</sub>	Sensor to release the bus time	45	50	55	µs

**Note:** To ensure the accurate communication of the sensor, the read signal, in strict accordance with the design parameters and timing in Table 6 and Figure 6.

7.4 Peripherals read step example

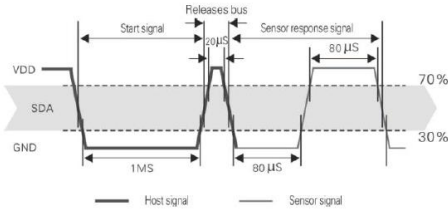
Communication between the host and the sensor can read data through the following three steps to complete.

Step 1

AM2302 have to wait for the power (on AM2302 power 2S crossed the unstable state, the device can not send any instructions to read during this period), the test environment temperature and humidity data, and record data, since the sensor into a sleep state automatically. AM2302 The SDA data line from the previous pull-up resistor pulled up is always high, the AM2302 the SDA pin is in input state, the time detection of external signal.

**Step 2**

Microprocessor I/O set to output, while output low, and low hold time can not be less than 800us, typical values are down 1MS, then the microprocessor I/O is set to input state, the release of the bus, due to the pull-up resistor, the microprocessor I/O AM2302 the SDA data line also will be high, the bus master has released the AM2302 send a response signal, that is, the output 80 microseconds low as the response signal, tightthen output high of 80 microseconds notice peripheral is ready to receive data signal transmission as shown to Pic7 :



Pic7: Single bus decomposition of the timing diagram

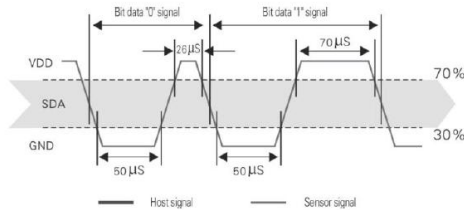
**Step 3**

AM2302 sending the response, followed by the data bus SDA continuous serial output 40 data, the microprocessor receives 40 data I/O level changes.

Bit data "0" format: 26–28 microseconds 50 microseconds low plus high;

Bit data "1" format: the high level of low plus, 50 microseconds to 70 microseconds;

Bit data "0" bit data "1" format signal shown to pic 8:



Pic 8: The single bus break down the timing diagram

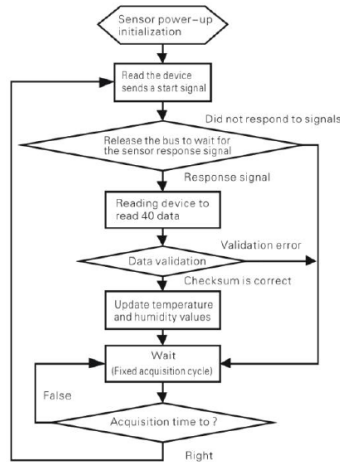
AM2302 data bus SDA output 40 data continue to output the low 50 microseconds into the input state, followed by pull-up resistor goes high. AM2302 internal re-test environmental temperature and humidity data, and record the data, the end of the test records, the microcontroller automatically into hibernation. Microcontroller only after receipt of the start signal of the host wake-up sensor, into the working state.

**7.5 Peripheral to read flow chart**

AM2302 sensor read single bus flow chart diagram shown in Figure 9, we also provide the C51 read the code examples, customers need to download, please visit our website ([www.aosong.com](http://www.aosong.com)) related to downloadthis manual does not provide the code description.



Temp, Humidity & Dew point measurement experts



Pic9: Single-bus to read the flow chart

8、Application of information

1. Work and storage conditions

Outside the sensor the proposed scope of work may lead to temporary drift of the signal up to 300% RH. Return to normal working conditions, sensor calibration status will slowly toward recovery. To speed up the recovery process may refer to "resume processing". Prolonged use of non-normal operating conditions, will accelerate the aging of the product.

Avoid placing the components on the long-term condensation and dry environment, as well as the following environment.

- A, salt spray
- B, acidic or oxidizing gases such as sulfur dioxide, hydrochloric acid

Recommended storage environment

Temperature: 10 ~ 40 °C Humidity: 60% RH or less

2. The impact of exposure to chemicals

The capacitive humidity sensor has a layer by chemical vapor interference, the proliferation of chemicals in the sensing layer may lead to drift and decreased sensitivity of the measured values. In a pure environment, contaminants will slowly be released. Resume processing as described below will accelerate this process. The high concentration of chemical pollution (such as ethanol) will lead to the complete damage of the sensitive layer of the sensor.

3. The temperature influence

Relative humidity of the gas to a large extent dependent on temperature. Therefore, in the measurement of humidity,



## Temp、 Humidity & Dew point measurement experts

---

should be to ensure that the work of the humidity sensor at the same temperature. With the release of heat of electronic components share a printed circuit board, the installation should be as far as possible the sensor away from the electronic components and mounted below the heat source, while maintaining good ventilation of the enclosure. To reduce the thermal conductivity sensor and printed circuit board copper plating should be the smallest possible, and leaving a gap between the two.

#### 4. Light impact

Prolonged exposure to sunlight or strong ultraviolet radiation, and degrade performance.

#### 5. Resume processing

Placed under extreme working conditions or chemical vapor sensor, which allows it to return to the status of calibration by the following handler. Maintain two hours in the humidity conditions of 45°C and <10% RH (dry); followed by 20–30°C and > 70% RH humidity conditions to maintain more than five hours.

#### 6. Wiring precautions

The quality of the signal wire will affect the quality of the voltage output, it is recommended to use high quality shielded cable.

#### 7. Welding information

Manual welding, in the maximum temperature of 300°C under the conditions of contact time shall be less than 3 seconds.

#### 8. Product upgrades

Details, please the consultation Aosong electronics department.

#### 9、 The license agreement

Without the prior written permission of the copyright holder, shall not in any form or by any means, electronic or mechanical (including photocopying), copy any part of this manual, nor shall its contents be communicated to a third party. The contents are subject to change without notice.

The Company and third parties have ownership of the software, the user may use only signed a contract or software license.

#### 10、 Warnings and personal injury

This product is not applied to the safety or emergency stop devices, as well as the failure of the product may result in injury to any other application, unless a particular purpose or use authorized. Installation, handling, use or maintenance of the product refer to product data sheets and application notes. Failure to comply with this recommendation may result in death and serious personal injury. The Company will bear all damages resulting personal injury or death, and waive any claims that the resulting subsidiary company managers and employees and agents, distributors, etc. that may arise, including: a variety of costs, compensation costs, attorneys' fees, and so on.



Temp, Humidity & Dew point measurement experts

---

#### 11、Quality Assurance

The company and its direct purchaser of the product quality guarantee period of three months (from the date of delivery). Publishes the technical specifications of the product data sheet shall prevail. Within the warranty period, the product was confirmed that the quality is really defective, the company will provide free repair or replacement. The user must satisfy the following conditions:

- ① The product is found defective within 14 days written notice to the Company;
- ② The product shall be paid by mail back to the company;
- ③ The product should be within the warranty period.

The Company is only responsible for those used in the occasion of the technical condition of the product defective product. Without any guarantee, warranty or written statement of its products used in special applications. Company for its products applied to the reliability of the product or circuit does not make any commitment.



**ANEXO C : RESULTADOS DE MEDICIONES DE TEMPERATURA DE LOS CASOS DE ESTUDIO**

Casos de estudio	Experimento	Optris PI160 (°C)	Seikuve MT1881 (°C)	Thermoval duo scan (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura ambiente (°C)	Error
Caso 1	1a	36.53	36.2	36.2	43.60	25.50	0.33
	1b	36.23	36.3	36.4	43.60	25.50	0.07
	1c	36.10	36.1	36.3	43.30	25.50	0
	1d	37.31	36.8	36.8	42.90	25.50	0.51
	1e	36.55	36.2	36.8	43.00	25.40	0.35
	1f	37.15	36.7	36.4	42.50	25.40	0.45
	1g	37.25	36.7	36.9	42.90	25.50	0.55
Caso 2	2a	36.82	36.4	36.7	45.80	25.50	0.42
	2b	36.52	36.3	36.8	45.50	25.60	0.22
	2c	36.83	36.8	36.5	45.10	25.50	0.03
	2d	36.76	36.1	36.3	44.90	25.50	0.66
	2e	36.19	36.3	36.2	44.50	25.50	0.11
	2f	36.26	36.6	36.0	44.20	25.50	0.34
	2g	37.22	36.6	36.2	44.00	25.50	0.62
Caso 3	3a	36.07	36.3	35.3	42.20	25.40	0.23
	3b	36.21	36.3	35.6	42.20	25.40	0.09
	3c	35.42	35.8	35.5	43.50	25.30	0.38
	3d	36.28	35.7	35.2	45.10	25.40	0.58
	3e	36.08	36.2	36.1	44.00	25.40	0.12
	3f	35.36	35.2	36.5	44.50	25.40	0.16
	3g	36.40	35.6	35.5	42.70	25.40	0.80
Caso 4	4a	36.04	36.1	35.1	45.30	25.40	0.06
	4b	35.19	35.2	36.5	45.80	25.40	0.01
	4c	35.71	35.4	36.1	46.10	25.40	0.31
	4d	35.42	35.7	35.7	46.20	25.50	0.28
	4e	36.66	36.2	35.2	46.40	25.50	0.46
	4f	36.41	36.2	36.4	46.50	25.40	0.21
	4g	36.84	36.8	36.6	46.60	25.50	0.04
Caso 5	5a	37.62	37.7	38.8	46.60	25.50	0.08
	5b	37.53	37.5	38.6	46.80	25.50	0.03
	5c	38.31	38.0	38.6	47.00	25.50	0.31
	5d	38.20	37.8	37.1	47.00	25.50	0.40
	5e	38.64	38.1	38.8	46.90	25.50	0.54





# EX NIHILO NIHIL FIT



© Universidad de Córdoba

Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci

14071 CÓRDOBA (España)

Teléfono 957-218373