

ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA CÁMARA FLIR LEPTON Y SU
VIABILIDAD PARA EL SEGUIMIENTO DE LÍNEAS DE FUEGO

**Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación**

Autor: D. Antonio David Galván Hernández

Tutores: Dr. Víctor Alexis Araña Pulido

Dr. Francisco José Cabrera Almeida

Fecha: Julio de 2020

ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA CÁMARA FLIR LEPTON Y SU
VIABILIDAD PARA EL SEGUIMIENTO DE LÍNEAS DE FUEGO

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: _____

Presidente

Secretario

Vocal

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fecha: Julio 2020

Agradecimientos

Desde mi punto de vista, cuando uno se plantea empezar un TFG debe tener claro dos ideas fundamentales: buscar un tema que te guste o al menos que te llame la atención y ser consciente de que se te requerirá de constancia y trabajo duro para alcanzar un resultado final satisfactorio. Sin embargo, lo que uno no esperaría de ningún modo es una pandemia mundial, esto añade un componente de dificultad extra al asunto.

Estas palabras no estarían siendo redactadas sin la ayuda de mis tutores, Víctor y Francis, principales artífices de todos los dolores de cabeza que este trabajo me ha dado. Por supuesto, una mención de honor a Jaime por toda la ayuda prestada y la guía en este camino, sin sus sabias palabras en Skype este trabajo sería un desastre de proporciones catastróficas.

Tengo que agradecer a mis compañeros de carrera por aguantarme durante estos 4 años, con mis muchos defectos (muchos) y pocas virtudes (muy pocas), especialmente a mis hermanos de café y laboratorio.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Acrónimos | xv |
| I Memoria | 1 |
| 1. Introducción, antecedentes y objetivos | 2 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.3. Motivación | 5 |
| 1.4. Estructura de la memoria | 5 |
| 2. Principios básicos de la termografía | 7 |
| 2.1. Introducción a la radiometría infrarroja | 7 |
| 2.2. Termografía infrarroja | 9 |
| 2.2.1. Radiación de un cuerpo negro | 9 |
| 2.2.2. Radiación de un cuerpo no negro | 13 |
| 2.3. Caracterización del radiador y del entorno | 15 |
| 2.3.1. Efecto de la caracterización en las medidas térmicas | 17 |
| 3. Cámaras termográficas | 20 |
| 3.1. Introducción y definición del sistema | 20 |
| 3.2. Óptica implementada y parámetros derivados | 22 |
| 3.2.1. Campo de visión o FOV | 23 |
| 3.2.2. Distancia focal | 24 |
| 3.2.3. Resolución espacial | 25 |
| 3.2.4. Número f de la óptica | 28 |
| 3.2.5. Consideraciones prácticas del cambio de óptica | 29 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3. | Sensores de una cámara termográfica | 30 |
| 3.4. | Microbolómetros: fundamentos generales | 32 |
| 3.4.1. | Definición, diseño de un bolómetro y funcionamiento | 32 |
| 3.4.2. | Características fundamentales y resistencia del sensor | 35 |
| 3.4.3. | Consideraciones necesarias en el estudio del sensor | 38 |
| 3.5. | Microbolómetros: parámetros derivados | 40 |
| 3.5.1. | Constante de tiempo térmica τ - Velocidad de fotogramas | 40 |
| 3.5.2. | Responsividad del sensor | 40 |
| 3.5.3. | Ruido del sensor | 41 |
| 3.5.4. | Rango dinámico de trabajo | 42 |
| 3.5.5. | Rango espectral de trabajo | 43 |
| 3.5.6. | Resolución de la cámara termográfica | 43 |
| 3.6. | Parámetros derivados del conjunto óptica-sensor | 45 |
| 3.6.1. | Distancia y umbral de detección de una superficie | 45 |
| 3.6.2. | Precisión de las medidas | 46 |
| 3.6.3. | Sensibilidad térmica | 46 |
| 3.6.3.1. | Relación del número f de la óptica con el factor NETD | 47 |
| 3.6.3.2. | Consideraciones prácticas de la sensibilidad | 48 |
| 3.7. | Introducción al procesado de datos | 50 |
| 4. | Estudio y caracterización de la Lepton | 53 |
| 4.1. | Introducción al módulo principal del sistema | 53 |
| 4.1.1. | Calibración por defecto de la cámara | 53 |
| 4.2. | Procesado de datos | 55 |
| 4.2.1. | Modos FFC | 57 |
| 4.2.2. | Modos radiometría | 58 |
| 4.2.2.1. | Flujo total incidente en el sensor de la cámara | 58 |
| 4.2.2.2. | Radiometría desactivada | 59 |
| 4.2.2.3. | Radiometría activada | 60 |
| 4.2.3. | Modos de ganancia programables | 64 |
| 4.2.4. | Modos AGC - Control automático de ganancia | 65 |
| 4.2.4.1. | AGC lineal | 65 |
| 4.2.4.2. | Ecualización de histograma | 67 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.5. Modos y control de la salida de vídeo | 68 |
| 4.3. Control de radiometría y ganancia | 70 |
| 4.3.1. Influencia de la emisividad en las medidas | 72 |
| 4.3.2. Comprobación del rango dinámico | 75 |
| 4.4. Hitos en la caracterización de la cámara | 79 |
| 5. Campaña de medidas | 81 |
| 5.1. Consideraciones previas | 82 |
| 5.1.1. IFOV y distancia focal de la cámara | 82 |
| 5.1.2. Superficie mínima para activar los píxeles del sensor | 83 |
| 5.1.3. Efecto de la resolución en las medidas | 84 |
| 5.2. Pruebas a distancias cercanas | 85 |
| 5.2.1. Primera prueba | 86 |
| 5.2.2. Segunda prueba | 89 |
| 5.2.3. Tercera prueba | 95 |
| 5.2.4. Cuarta prueba | 98 |
| 5.3. Pruebas a distancias lejanas | 108 |
| 5.3.1. Puntos de observación de la quema | 110 |
| 6. Conclusiones y líneas futuras | 118 |
| 6.1. Conclusiones | 118 |
| 6.2. Líneas futuras | 121 |
| Bibliografía | 128 |
| | |
| II Presupuesto | 129 |
| | |
| Presupuesto | 130 |
| P.1. Introducción | 130 |
| P.2. Recursos Materiales | 130 |
| P.2.1. Equipos Hardware | 131 |
| P.2.2. Equipos Software | 132 |
| P.3. Recursos Humanos | 132 |
| P.4. Redacción del documento | 133 |

| | |
|--|------------|
| P.5. Derechos de visado del COITT | 134 |
| P.6. Gastos de tramitación y envío | 135 |
| P.7. Aplicación de impuestos y coste final | 135 |
| | |
| III Anexos | 137 |
| | |
| A. Integración de la cámara en Windows | 138 |
| | |
| B. Integración de la cámara en una Raspberry Pi | 148 |
| | |
| C. Prototipado para la presentación de datos | 155 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Región del infrarrojo en el espectro electromagnético. Adaptado de [6] | 8 |
| 2.2. Postulado de Kirchoff sobre un cuerpo negro | 10 |
| 2.3. Distribución de espectral de un cuerpo negro a una temperatura T | 11 |
| 2.4. Concepto gráfico de la ley de Wien | 12 |
| 2.5. Concepto gráfico de la ley de Stefan-Boltzmann | 13 |
| 2.6. Resultado de la energía que incide sobre una superficie cualquiera | 14 |
| 2.7. Efectos que caracterizan la medida radiométrica. Adaptado de [13] | 17 |
| 2.8. Emisión y reflexión de una superficie estudiada | 18 |
| 2.9. Efectos de la atmósfera en las medidas | 18 |
| 3.1. Captación, procesado y presentación de datos térmicos. Adaptado de [15] | 21 |
| 3.2. Distintos puntos focales para la energía infrarroja | 23 |
| 3.3. Representación gráfica de la conversión escena a matriz | 23 |
| 3.4. Área barrida dependiendo de la distancia focal | 24 |
| 3.5. Representación visual del IFOV referente a 1 metro de distancia | 26 |
| 3.6. Caso real | 27 |
| 3.7. Caso ideal | 27 |
| 3.8. Regla general | 27 |
| 3.9. Representación visual del IFOV _m referente a 1 metro de distancia | 28 |
| 3.10. Ejemplo de distintos enfoques según el número f | 29 |
| 3.11. Resultados de la herramienta de simulación Fieldometer | 30 |
| 3.12. Modelo térmico del bolómetro (I) | 32 |
| 3.13. Modelo térmico del bolómetro (II) | 33 |
| 3.14. Esquema genérico de un bolómetro | 34 |
| 3.15. Estructura del microbolómetro-puente. Adaptado de [21] | 35 |

| | |
|--|----|
| 3.16. Trazado de Arrhenius. Sacado de [22] | 37 |
| 3.17. Curvas R(T) para los distintos tipos de bolómetros. Sacadas de [22] . . | 38 |
| 3.18. Esquema de la caracterización de un microbolómetro. Adaptado de [27] | 38 |
| 3.19. Funcionamiento y polarización del microbolómetro. Adaptado de [20] . | 39 |
| 3.20. Diferencias de resolución sobre un cuerpo dado | 44 |
| 3.21. Aportaciones térmicas para distancias distintas | 46 |
| 3.22. Poco contraste térmico frente un buen contraste térmico | 48 |
| 3.23. Diferencia de contraste entre radiadores | 49 |
| 3.24. Modelo de mano para la comprobación de la sensibilidad | 49 |
| 3.25. Izq: Huella térmica de la mano Dcha: Misma huella a los 60 s | 50 |
| 3.26. Izq: Huella térmica de la mano a los 90 s Dcha: Misma huella a los 150 s | 50 |
| | |
| 4.1. Esquema y dimensiones de la Lepton | 54 |
| 4.2. Diagrama de bloques simplificado del funcionamiento de la Lepton . . . | 55 |
| 4.3. Diagrama de bloques del pipeline de vídeo | 56 |
| 4.4. Izq: Sin aplicar FFC Dcha: Aplicando FFC | 57 |
| 4.5. Flujo total recibido por el sensor de la Lepton | 59 |
| 4.6. Izq: Radiometría activada Dcha: Radiometría desactivada | 62 |
| 4.7. Izq: Radiometría activada (ROI) Dcha: Radiometría desactivada (ROI) | 63 |
| 4.8. Izq: Visual de la imagen térmica Dcha: Misma imagen aplicando el AGC | 66 |
| 4.9. Izq: Visual de los datos de flujo Dcha: Misma imagen aplicando el AGC | 66 |
| 4.10. Número de ocurrencias y peso de estas (3x3). Imagen sacada de [35] . . | 67 |
| 4.11. HEQ aplicado a la muestra anterior | 68 |
| 4.12. Coloreado de una imagen post-HEQ | 69 |
| 4.13. Presentación de máximos y mínimos después del AGC lineal | 70 |
| 4.14. Imagen al aplicar un ROI rectangular y máscara usada | 74 |
| 4.15. Termómetro infrarrojo AICER | 75 |
| 4.16. Muestra de la sartén fría y ROI aplicado | 76 |
| 4.17. Muestra de la sartén a temperatura ambiente y ROI aplicado | 76 |
| 4.18. Muestra de la sartén caliente (HG) y ROI aplicado | 76 |
| 4.19. Muestra de la sartén caliente (LG) y ROI aplicado | 77 |
| 4.20. Izq: Imagen Kelvin x100 Dcha: Imagen Kelvin x10 | 78 |

| | |
|--|-----|
| 5.1. Representación de un blanco a dos distancias distintas | 85 |
| 5.2. Metodología general | 86 |
| 5.3. ROI de interés para el estudio de la piel | 87 |
| 5.4. Representación del decaimiento general en las lecturas | 88 |
| 5.5. Las superficies metálicas usadas en la segunda prueba | 90 |
| 5.6. Representación de los máximos - Segunda prueba | 92 |
| 5.7. Representación de los mínimos - Segunda prueba | 93 |
| 5.8. Representación de la moda - Segunda prueba | 94 |
| 5.9. Área estudiada en la tercera prueba | 96 |
| 5.10. Array de cámaras sobre el trípode | 100 |
| 5.11. Captura de datos centralizada | 101 |
| 5.12. Superficie vista por las cámaras a 2 metros | 101 |
| 5.13. Superficie vista por las cámaras a 10 metros | 103 |
| 5.14. Superposición de ópticas para la captación de datos | 104 |
| 5.15. Mismos píxeles de resolución para ópticas distintas | 105 |
| 5.16. Curvas de temperatura de las cámaras usadas en el experimento | 106 |
| 5.17. Identificación del foco emisor | 109 |
| 5.18. Foco radiante del experimento | 110 |
| 5.19. Puntos de observación desde Google Earth (I) | 111 |
| 5.20. Puntos de observación desde Google Earth (II) | 112 |
| 5.21. Ángulo α de la cámara | 113 |
| 5.22. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto A' | 114 |
| 5.23. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto B | 114 |
| 5.24. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto C | 115 |
| 5.25. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto D | 115 |
| 5.26. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto E | 116 |
| 5.27. Imagen radiométrica de la Lepton en el punto F | 116 |
| 6.1. Cilindro teórico que modela el trayecto del flujo. Adaptado de [14] | 123 |
| A.1. Placa PureThermal 2 | 138 |
| A.2. Componentes necesarios para la integración | 139 |
| A.3. Activar dependencias desde JetBrains Rider | 140 |

| | |
|--|-----|
| A.4. Interfaz <i>Lepton User App</i> | 144 |
| B.1. Interfaz gráfica de Gvncview | 151 |
| B.2. Representación de una matriz con Matplotlib | 154 |
| C.1. Prototipo de vídeo (I) | 156 |
| C.2. Prototipo de vídeo (II) | 156 |
| C.3. Prototipo de vídeo (III) | 157 |
| C.4. Prototipo de vídeo (IV) | 158 |
| C.5. Prototipo de vídeo (V) | 158 |
| C.6. Prototipo de vídeo (VI) | 159 |
| C.7. Prototipo de vídeo (VII) | 159 |
| C.8. Prototipo de vídeo (VIII) | 160 |
| C.9. Prototipo de vídeo (IX) | 161 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| 4.1. Resultados de la integración del ROI | 64 |
| 4.2. Salidas de vídeo de la Lepton | 69 |
| 4.3. Resultados de la integración de los rectángulos - Temperatura | 71 |
| 4.4. Resultados de medidas sobre la piel humana | 72 |
| 4.5. Parámetros de flujo de la Lepton | 73 |
| 4.6. Resultados de medidas sobre la piel humana corregidos | 73 |
| 4.7. Resultados de medidas sobre la piel humana - ROI corregido | 74 |
| 4.8. Resultados del experimento sobre la sartén | 77 |
| 5.1. Cálculos teóricos de la Lepton para $N = 30$ | 83 |
| 5.2. Cálculos teóricos del área mínima radiante para la Lepton | 84 |
| 5.3. Área real de las superficies | 91 |
| 5.4. Lecturas del termómetro sobre asfalto | 96 |
| 5.5. Resultados de la tercera prueba para ambos modos de ganancia | 97 |
| 5.6. Cámaras de FLIR utilizadas | 99 |
| 5.7. Cálculos teóricos del área mínima radiante para las cámaras usadas | 102 |
| 5.8. Datos de la quema | 111 |
| 5.9. Puntos geográficos de observación | 113 |
| 6.1. Precio de las cámaras de FLIR utilizadas | 120 |
| P.2. Coste de equipos hardware | 131 |
| P.3. Coste de equipos software | 132 |
| P.4. Coste de recursos humanos | 133 |
| P.5. Presupuesto parcial | 134 |
| P.6. Presupuesto con el coste de redacción | 135 |
| P.7. Presupuesto total | 136 |

| | |
|---|-----|
| A.1. Especificaciones de la Lepton 3.5 | 146 |
| A.2. Especificaciones de la PureThermal 2 | 147 |

Acrónimos

| Siglas | Descripción |
|---------------|--|
| ADC | Analog-to-Digital Converter |
| AEMET | Agencia Estatal de Meteorología |
| AGC | Automatic Gain Control |
| API | Application Programming Interface |
| CCI | Command and Control Interface |
| COITT | Colegio Oficial Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones |
| DLL | Dynamic-Link Library |
| FFC | Flat Field Correction |
| FOV | Field Of View |
| FPA | Focal Plane Array |
| GPIO | General Purpose Input/Output |
| HEQ | Histogram Equalization |
| HG | High Gain |
| IDeTIC | Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicación |
| ID | Identification/Identity/Identifier |
| I2C | Inter-Integrated Circuit |
| IFOV | Instantaneous Field Of View |
| IR | Infrarrojo |
| JTAG | Joint Test Action Group |
| LG | Low Gain |
| LWIR | Longwave Infrared |
| MWIR | Midwave Infrared |
| NEP | Noise Equivalent Power |

| | |
|--------------|---|
| NETD | Noise Equivalent Temperature Difference |
| NUC | Non-Uniformity Correction |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| ROI | Region Of Interest |
| ROIC | Readout Integrated Circuit |
| SeLiF | Seguimiento de Lineas de Fuego |
| SDK | Software Development Kit |
| SWIR | Shortwave Infrared |
| TFG | Trabajo Fin de Grado |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| USB | Universal Serial Bus |
| UVC | USB Video Class |
| VPA | Vacuum Package Assembly |
| V4L2 | Video For Linux 2 |

Resumen

Los incendios forestales son un problema que actualmente afecta a casi la totalidad del planeta, ya sea por acción directa o indirecta del ser humano. Este tipo de desastres son una gran amenaza para el desarrollo social, económico y biológico de las áreas afectadas. Con la intención de disminuir los efectos devastadores que dejan a su paso el movimiento de estas grandes masas térmicas, se considera necesario trabajar en distintas vías de solución que requieran del menor coste económico y humano posible.

En este proyecto se propone el estudio de una cámara termográfica de bajo coste para una posible implementación en un sistema con despliegue efectivo para el seguimiento de líneas de fuego. Primero se necesita parametrizar el comportamiento general de la cámara, desde el modelo físico que permite la adquisición y corrección del flujo electromagnético hasta su conversión en temperatura. Para el desarrollo de esta tarea se tuvo que referenciar de forma detallada cada uno de los campos software de interés que forman al módulo radiométrico.

Los resultados finales muestran las distintas capacidades de la Lepton para situaciones de distancias cercanas y distancias lejanas, correspondiéndose estas últimas con los datos recogidos de una prueba piloto que simula la manifestación de un incendio. De esta manera, se desarrolla un análisis de los datos recogidos para las distintas situaciones, llegando a una conclusión respecto a su posible implementación.

Abstract

Forest fires are a problem that currently affects almost the entire world, either through direct or indirect human action. This type of disaster is a great threat to the social, economic, and biological development of the affected areas. To reduce the devastating effects left by the movement of these large thermal masses, it is deemed necessary to work on different solutions that require the least possible economic and human cost.

This project proposes the study of a low-cost thermographic camera for its potential implementation in a system with an effective deployment to monitor fire lines. Firstly, it was necessary to parameterize the general behaviour of the camera, from the physical model that allows the acquisition and correction of electromagnetic flow to its conversion into temperature. To achieve this, it was necessary to reference in a detailed way each one of the software fields of interest that form the radiometric module.

The results show the different capacities of the Lepton camera in near distances and far distances situations, the second one corresponding to samples taken from a pilot test simulating the presence of a fire. Thereupon, an analysis of the data collected for the different situations was developed to reach a conclusion regarding its possible implementation.

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Introducción, antecedentes y objetivos

1.1. Antecedentes

Los incendios forestales son un tipo de desastre que afecta en gran medida al ecosistema singular de la zona donde se propagan, acabando con gran parte de la biodiversidad de esta. Además, provoca un increíble desembolso de capital para poder asumir el coste de los destrozos causados, aletargando el desarrollo económico y social del área afectada. Durante los últimos años se ha hecho indispensable innovar en la forma de parametrizar sus consecuencias o establecer un seguimiento de estas líneas de fuego. Precisamente, para ayudar en la prevención, control y extinción del fuego nacieron los sistemas de detección de incendios forestales. Actualmente existen muchos tipos de despliegue y una continua búsqueda de alternativas que no requieran de grandes inversiones para su implementación.

Entre los sistemas de detección y seguimiento de incendios [1], se pueden nombrar, como los más usados:

- **Redes de vigilancia terrestre fija y móvil.** Por la parte de vigilancia terrestre fija, donde los emplazamientos pueden ser torres, casetas o refugios, se encuentran unos inconvenientes difíciles de subsanar, estos son su montaje en zonas de orografía boscosa y abrupta, además del alto coste de instalación y mantenimiento. Por otro lado, las redes de vigilancia móvil la conforman patrullas de profesionales que recorren las zonas de riesgo por expansión del incendio, referenciando una gran cantidad de pruebas para poder basar el estudio del terreno sobre estas.

- **Vigilancia aérea y teledetección.** Para el primer sistema se usan aviones y helicópteros con la intención de abarcar un gran campo de visión y así contar con una mayor facilidad para discernir zonas afectadas por incendios forestales, mientras que la técnica del segundo se basa en tomar imágenes hiperespectrales para el estudio y detección de zonas de incendio. La desventaja de los sistemas nombrados es que en la mayoría de estos se necesita de un personal especializado, entrenado y dotado de equipos específicos para la realización de estas labores.
- **Sistemas fijos y móviles basados en cámaras termográficas.** Estos sistemas se basan en la detección y seguimiento de incendios forestales gracias a la integración de cámaras termográficas. Además, los sistemas móviles cuentan con equipos de formato transportable, auto calibrable y autónomo, lo suficiente para no necesitar ningún especialista en ingeniería y así poder realizar un despliegue rápido, reconociendo tanto el estado como el avance del incendio en tiempo real.

El proyecto SeLiF (Seguimiento de Líneas de Fuego) planteado por el IDeTIC (Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicación), donde se ha desarrollado un sistema de detección y seguimiento de líneas de fuego para incendios forestales, está basado en este último método, detallado con profundidad en [2] y [3]. Una solución que funciona en tiempo real, permitiendo facilitar y optimizar el operativo en tareas de prevención y extinción de incendios forestales, tanto de forma independiente como combinado con sistemas de predicción. Las cámaras termográficas en cuestión formarán parte de un sistema de despliegue móvil terrestre, emplazado preferiblemente a una distancia segura de la superficie radiante.

Se debe comenzar con la captación de datos radiométricos del área geográfica en la que se ha producido el incendio, entonces se pueden delimitar las zonas donde avanza. Se establece así una representación temporal de aquellos puntos que superan un determinado umbral de temperatura que identifica la existencia de fuego. Fijado un umbral de temperatura que se considera suficientemente alto para afirmar que está provocado por el fuego, basta con un procesado de la imagen para saber si se ha producido un incendio [4].

En la división de ingeniería de comunicaciones del IDeTIC se han integrado cámaras termográficas de relativo alto rendimiento para estas labores, como pueden ser:

- La cámara termográfica Quark 640 de FLIR.
- La cámara termográfica A615 de FLIR.
- La cámara termográfica A35 de FLIR.
- La cámara termográfica Tau 2 de FLIR.

Su finalidad es mostrar al usuario una serie de características relacionadas con la temperatura de la superficie estudiada, datos necesarios para el seguimiento del fuego. Todas las cámaras nombradas anteriormente tienen un precio elevado, debido a sus procesos de fabricación, procesamiento de datos, óptica, entre los más destacados. Se tiene además una amplia resolución que permite un gran número de píxeles por pantalla, ayudando así a la digitalización y presentación de la imagen térmica. Esto hace difícil que se pueda aumentar su número para diseñar distintos prototipos o, en aplicaciones prácticas, tener un mayor número de cámaras para así cubrir más terreno.

1.2. Objetivos

Este TFG (Trabajo Fin de Grado) tiene como objetivo profundizar en el estudio de sistemas que incluyan una o varias cámaras termográficas de bajo coste para poder realizar un despliegue efectivo, parametrizando como influye la lejanía de campo en estas cámaras y disminuyendo la necesidad de recursos humanos y altas inversiones. Por este motivo se trabajará con la cámara termográfica FLIR Lepton, teniendo en mente que la aplicación final deseada está relacionada con los incendios forestales. No obstante, antes de poder trabajar con la cámara directamente, se tienen que conocer los principios básicos sobre los que se basa la termografía infrarroja, pues no se concibe empezar a implementar un dispositivo térmico sin estar instruido en las bases de este campo.

Por ello, el hilo conductor de este TFG tendrá sus bases en tres puntos fundamentales:

- Formación en termografía infrarroja y en cámaras termográficas.

- Se pretende detallar el modelado de la emisión de radiación infrarroja de un cuerpo y la caracterización de su entorno, de forma que se entienda que factores intervienen en la captación de este tipo de energía.
 - Una vez entendidas las bases que sustentan la emisión infrarroja de un cuerpo se pasará al estudio de las cámaras termográficas, dando una explicación de las partes que las conforman y como afectan estas a la medida final de un proceso radiométrico.
- Estudio de las distintas configuraciones de la cámara FLIR Lepton y sus herramientas de procesado de la imagen térmica.
 - Profundizar en las limitaciones técnicas derivadas de trabajar con esta cámara, estudiando sus capacidades para una posible implementación en el seguimiento de líneas de fuego a través de distintas pruebas.

1.3. Motivación

La motivación principal de este Trabajo Fin de Grado es la consecución del título de Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación que habilita profesionalmente para ejercer la profesión de Ingeniero Técnico en Telecomunicación y permite acceder al mercado laboral con dicha acreditación oficial.

La motivación didáctica de este proyecto es estudiar las características de una cámara termográfica de bajo coste para contemplar la posibilidad de integrarla en un sistema de detección y seguimiento de líneas de fuego. La problemática principal de esta premisa es la clara limitación técnica con respecto a otros modelos termográficos del mercado actual. Por otro lado, los puntos fuertes del modelo con el que se trabaja son sus pequeñas dimensiones y facilidad para la integración en hardware compacto o gran variedad de sistemas embebidos.

1.4. Estructura de la memoria

Este documento está organizado en memoria descriptiva, bibliografía, presupuesto y anexos. Los anexos serán referenciados en la memoria descriptiva, teniendo esta la

siguiente estructura:

- Capítulo 1. Se presenta una breve introducción, exponiendo los antecedentes y objetivos, además de la motivación que ha iniciado este trabajo.
- Capítulo 2. Realizar un repaso por los principios teóricos que sustentan y basan a la termografía infrarroja, así como la caracterización general del entorno y factores que se deben tener en cuenta, ajenos al sistema de medidas.
- Capítulo 3. Descripción del sistema de medidas sobre el que se basa este TFG, las cámaras termográficas. Se da una visión de los distintos factores y parámetros que dan significado a los resultados que se le presentan al usuario.
- Capítulo 4. Estudio de la cámara termográfica sobre la que se construye todo el núcleo del TFG, detallando muchos de sus parámetros y campos característicos.
- Capítulo 5. Campaña de medidas para la recogida de información y resultados de interés.
- Capítulo 6. Conclusiones de este trabajo y líneas futuras que se plantean.
- Anexos. Esta memoria tiene tres anexos:
 - El anexo A detalla la integración de la cámara termográfica Lepton en un sistema Windows.
 - El anexo B incluye la integración de la cámara termográfica Lepton en una Raspberry Pi.
 - El anexo C trata de la creación de un programa para la adquisición y representación de datos, además de su corrección radiométrica.

Capítulo 2

Principios básicos de la termografía

2.1. Introducción a la radiometría infrarroja

Todo cuerpo o superficie puede ser estudiado a través de sus niveles de energía, es decir, a partir de la radiación electromagnética que emite. La ciencia que se ocupa del estudio de estas ondas y permite modelar su comportamiento se llama radiometría. Cualquier objeto sometido a una determinada temperatura emite un cierto tipo de radiación, siendo esta el medio base para el cálculo de su respectiva temperatura. A una banda específica de esta energía se la conoce como infrarroja y es un tipo de radiación que se sitúa dentro del espectro electromagnético con una longitud de onda superior a la de la luz visible pero más corta que la de las microondas, tal como se representa en la figura 2.1. La termografía infrarroja hace uso de esta banda espectral basándose en el descubrimiento de William Herschel, donde se demostró que la carga térmica de estas longitudes de onda era más fuerte que en otro lado del espectro electromagnético. De hecho, la proporción de radiación en la banda infrarroja para un cuerpo negro a una temperatura de 1000 y 2000 Kelvin pueden llegar a ser de 99.999 % y 98.593 % respectivamente, según los experimentos referenciados en [5].

Los cuerpos por encima del 0 absoluto (-273.15 Kelvin) emiten este tipo de radiación, que puede ser clasificada en función de su longitud de onda. Las sub-bandas más conocidas son:

- SWIR - Infrarrojo de onda corta (0.9 μm a 1.7 μm).
- MWIR - Infrarrojo de onda media (3 μm a 5 μm).

- LWIR - Infrarrojo de onda larga ($8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$).

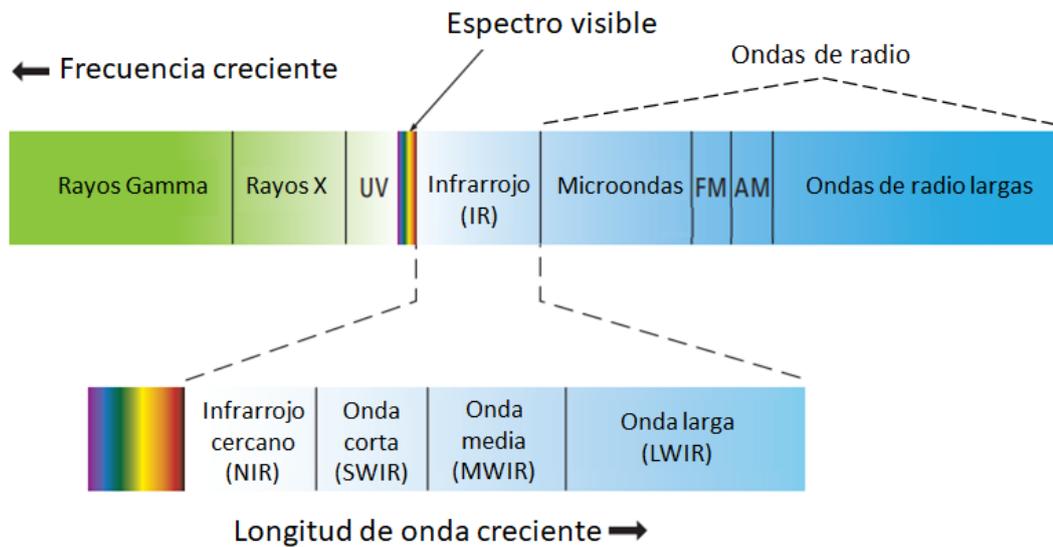


Figura 2.1: Región del infrarrojo en el espectro electromagnético. Adaptado de [6]

La luz visible es el tipo de energía electromagnética con la que los seres humanos están más familiarizados, ya que el ojo distingue sus respectivas longitudes de onda. El ser humano es capaz de ver la luz reflejada sobre un objeto o superficie. Por esto, las cámaras de luz visible, los dispositivos de visión nocturna y el ojo humano funcionan con el mismo principio básico [7]. La radiación visible golpea al objetivo y rebota en este, un detector lo recibe y transforma en una imagen, presentándola finalmente al usuario. Bien se trate de un globo ocular o de una cámara, estos detectores no pueden crear una imagen si no reciben la luz suficiente. Como es de esperar, no hay luz solar durante la noche, por lo tanto, dependen de la luz proporcionada por las estrellas, la luz de la luna o la iluminación artificial. Si no hay suficiente luz, estos detectores serán de poca utilidad para conseguir ver en situaciones donde el ojo humano no pueda.

Por el contrario, la energía infrarroja posee unas longitudes de onda lo suficientemente largas para no ser distinguibles por el ojo humano. La mayor diferencia entre estos dos tipos de radiación es que el infrarrojo expresa reflexión y emisión de calor. Es por esto que las imágenes infrarrojas o térmicas son útiles a la hora de detectar pequeñas diferencias de temperatura en entornos como oscuridad total, a través de humo, polvo, etc. En general, cuanto mayor es la temperatura de un objeto, más energía infrarroja emite [6].

2.2. Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica que permite estimar temperaturas a distancia y sin necesidad de un contacto físico con el objetivo a estudiar, a través de la captación de la intensidad de radiación infrarroja que emiten los cuerpos [8]. Utilizando cámaras térmicas se puede convertir la energía radiada por un cuerpo, debida a la caracterización energética de la materia, en una señal eléctrica y de ahí a una imagen radiométrica. Los distintos dispositivos térmicos detectan y muestran diferencias en energía infrarroja, utilizan estas diferencias para elaborar imágenes a color o en escala de grises. En una imagen térmica los colores oscuros suelen significar bajas temperaturas, los más luminosos son altas temperaturas.

El uso de la termografía como herramienta de estudio permite detectar diferencias de temperatura muy pequeñas en la oscuridad total, así como a través del humo, el polvo y la niebla ligera. Por tanto, cada píxel de la imagen radiométrica es, de hecho, una medición térmica. Para conseguir este propósito se incorporan distintos tipos de algoritmos en los dispositivos de captación de infrarrojos, pues el objetivo final es convertir un flujo determinado de potencia en medidas de temperatura. La utilidad de esta técnica se basa en la medida sobre una determinada superficie, interpretando y procesando la intensidad de energía infrarroja que le llega al detector. Esta es una fuente muy importante de información pues aporta a determinadas distancias un conocimiento preciso sobre un determinado escenario. El análisis de esta radiación puede ofrecer datos sobre las propiedades superficiales y subsuperficiales de un blanco, así como detección temprana de la corrosión o delaminaciones entre otras, además de los procesos de transferencia de calor a los que está sometido.

El estudio de la termografía infrarroja tiene su base en la termodinámica y se fundamenta en una serie de leyes físicas basadas en la idea de lo que se denomina cuerpo negro [9][10].

2.2.1. Radiación de un cuerpo negro

El término de radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo, esta energía es transportada por ondas electromagnéticas que

viajan en el vacío a una velocidad c igual a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Dentro de la teoría de radiación infrarroja se introduce un concepto teórico de radiador ideal, llamado cuerpo negro y representado en la figura 2.2. Este fue principalmente establecido por el físico Gustav Robert Kirchoff, que lo define como un objeto o superficie capaz de absorber todas las longitudes de onda que forman parte de la radiación electromagnética incidente y que, de la misma forma, es el mejor emisor posible de esta radiación, con igual eficiencia incluso en el vacío. Este concepto de cuerpo absorbe toda la energía radiante, impidiendo su reflexión o su paso a través de este, siendo el núcleo base de toda la teoría física detrás de la termografía infrarroja.

La ley de la radiación térmica de Kirchoff

Siguiendo esta línea Kirchoff postuló una serie de bases para el estudio de un cuerpo negro, basándose en lo que se denomina como equilibrio térmico, toda la radiación absorbida por el cuerpo es igual a la emitida. El cociente entre estos dos factores por lo tanto es una cantidad independiente de la naturaleza del material, y solo depende, a lo sumo, de la temperatura a la que se encuentra el objeto. Es decir, un cuerpo es mejor emisor de radiación cuanto mejor la absorbe. A esta serie de postulados se les conoce como la ley de la radiación térmica de Kirchoff [10].

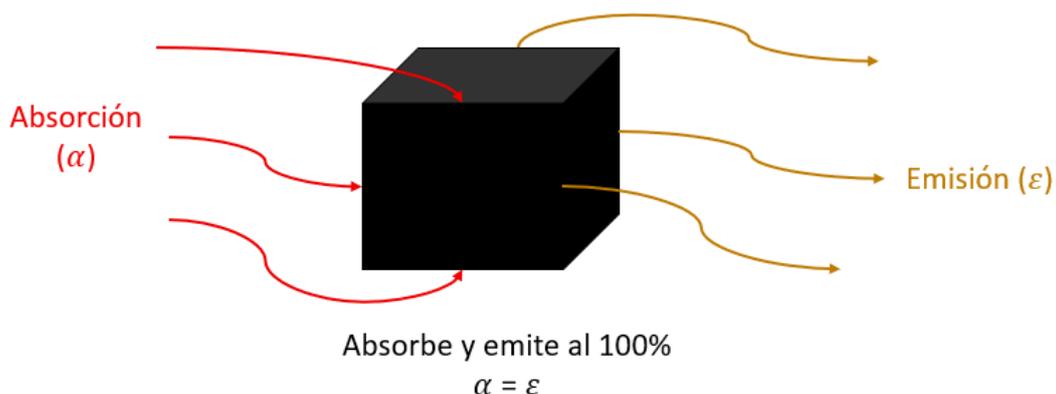


Figura 2.2: Postulado de Kirchoff sobre un cuerpo negro

Por lo tanto, para un cuerpo arbitrario que emite y absorbe radiación en equilibrio térmico, la emisividad es igual a la capacidad de absorción ($\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$). Donde la emisividad no puede ser mayor a 1 ($\varepsilon_\lambda \leq 1$), ya que esto es imposible por la ley de conservación de la energía. No se puede irradiar más energía que un cuerpo negro en equilibrio térmico.

Ley de Planck

Desde antes de que nacieran las leyes en las que se basa la termografía infrarroja actual se ha podido obtener experimentalmente la distribución espectral de la radiación procedente de un cuerpo negro. Esta tiende a la forma de una gráfica de campana, como se observa en la figura 2.3. No obstante, no es hasta la incorporación del físico Max Planck en este campo cuando por fin se pudo deducir una función que explicara este comportamiento.

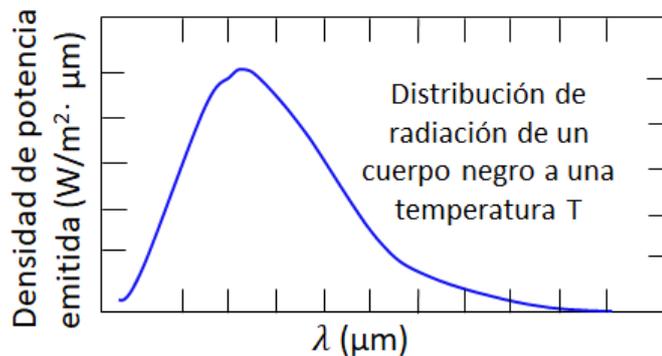


Figura 2.3: Distribución de espectral de un cuerpo negro a una temperatura T

El resultado al que llegó Planck se registra en lo que hoy se llama la ley de radiación de Planck [9]. El concepto fundamental que se debe tener siempre en cuenta es que la curva de Planck para un cuerpo en equilibrio térmico emite radiación (potencia por unidad de área por unidad de longitud de onda) en todo el tiempo observado y en todas las longitudes de onda existentes. Es decir, todo cuerpo emite energía en todo el conjunto de sub-bandas que conforman el espectro electromagnético. Esta distribución espectral es modelada por (2.1), teniendo en cuenta que la densidad de potencia de un cuerpo negro se referencia a una temperatura definida.

$$W_{b\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1)} (W/m^2) \quad (2.1)$$

Las constantes de esta ecuación son:

- La constante de Planck, $h = 6.6 \cdot 10^{-34} J \cdot s$
- La constante de Boltzmann, $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$
- La velocidad de la luz, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$

Ley de desplazamiento de Wien

Hasta este momento se sabe que toda materia emite radiación a lo largo del espectro y en todas las longitudes de onda, aunque existe un matiz, resulta que la materia no emite radiación de igual forma para todas ellas. Se sabe que el pico de emisión en una determinada λ es inversamente proporcional a la temperatura del emisor. Es decir, a medida que se aumenta la temperatura de un cuerpo, la longitud de onda de la energía radiada se desplaza hacia longitudes de onda más cortas (2.2). En equilibrio térmico el producto de la temperatura del cuerpo y la longitud de onda donde emite la máxima potencia siempre es constante ($T \cdot \lambda_{max} = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$), de esta manera se define la ley de Wien [11]:

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976 \text{ m} \cdot \text{K}}{T} \quad (2.2)$$

Donde:

T es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin y λ_{max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros.

Explicado gráficamente la ley de Wien resalta que el producto entre T y λ_{max} siempre presenta el mismo resultado, una constante. Entonces haciendo uso de este modelo se puede hallar a que longitud de onda se tiene el pico de radiación, como se ve en la figura 2.4.

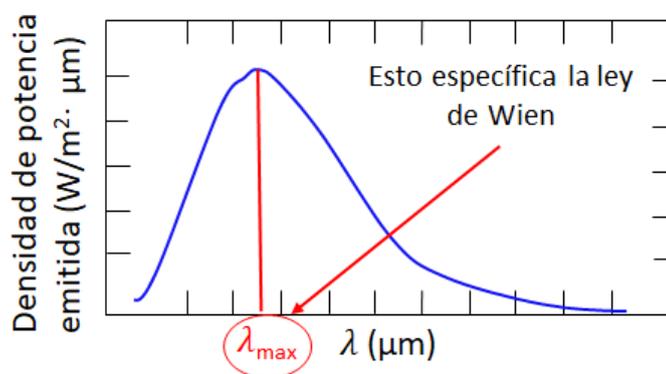


Figura 2.4: Concepto gráfico de la ley de Wien

Ley de Stefan-Boltzmann

Esta ley postula que al integrar toda el área bajo la curva descrita por la distribución de Planck (figura 2.5) se obtiene la potencia total por unidad de área emitida por el cuerpo en todas las longitudes de ondas [10]. En otras palabras, al integrar en todas las longitudes de onda, se elimina la dependencia de esta. La ley de Stefan-Boltzmann demuestra que el total de potencia emisiva por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura multiplicada por una constante física σ , que depende de h , c y K_B . Con este nuevo resultado es sencillo entender que dependencia existe entre la temperatura de un cuerpo frente la potencia que emite, al aumentar esta también lo hace la cantidad de potencia por unidad de área (2.3), por ello, los cuerpos calientes emiten más que los fríos.

$$W_b = \sigma \cdot T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

Siendo $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$

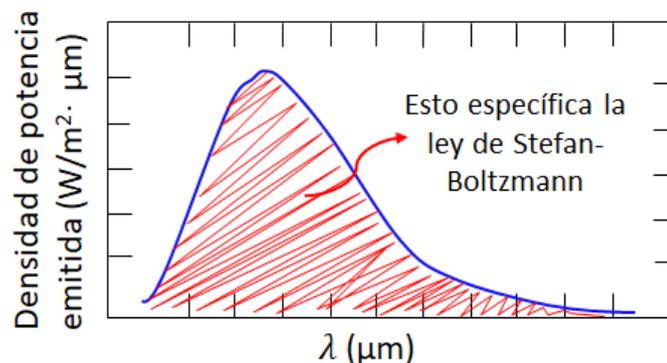


Figura 2.5: Concepto gráfico de la ley de Stefan-Boltzmann

2.2.2. Radiación de un cuerpo no negro

Toda la teoría física que sustenta el cálculo de la potencia radiante de un objeto está basada en la idea teórica de cuerpo negro, esta potencia emisiva supone un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos reales, que por supuesto es menor. La ley de Kirchoff describe la relación que existe entre la capacidad que tiene un objeto de absorber radiación con su habilidad para emitir en la misma longitud de onda. Al contrario que con el cuerpo negro ideal, en el caso de los cuerpos reales hay que tener en

cuenta los términos de reflexión y transmisión (figura 2.6) existentes en la transferencia térmica. Para que exista conservación de la energía siempre se tiene que cumplir que:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.4)$$

Siendo α_λ la absorptividad, ρ_λ la reflectividad y τ_λ la transmisividad.

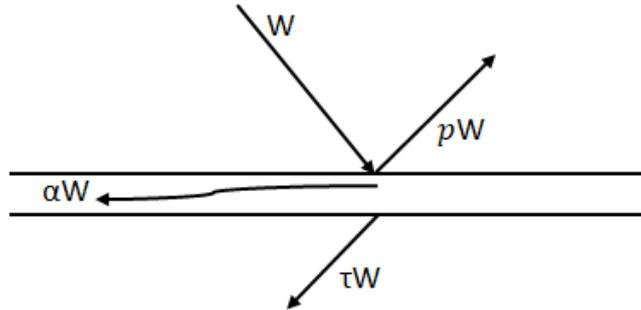


Figura 2.6: Resultado de la energía que incide sobre una superficie cualquiera

Por supuesto, aquí entra la cuestión de la naturaleza física de un objeto real [12], dependiendo de esta se tienen que sopesar distintos escenarios posibles:

- Para un cuerpo muy cercano al radiador ideal se considera su absorptividad es 1, igual que su emisividad, es decir, $\rho_\lambda = \tau_\lambda = 0$.
- Para un cuerpo o materiales opacos la transmitancia es cero y se tiene que la energía sólo se absorbe y refleja, es decir, la relación se simplifica a $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$.
- En una superficie blanca la reflectividad es 1 y, por tanto, $\alpha_\lambda = \tau_\lambda = 0$.
- Para superficies muy pulidas ε_λ se acerca a 0, de modo que actúan como materiales perfectamente reflectantes, en otras palabras, $\rho_\lambda = 1$.

Teniendo en cuenta la naturaleza del blanco estudiado se puede prever si será un buen emisor de radiación, teniendo esto relación con las otras tres propiedades nombradas anteriormente. La emisividad de ese blanco es definida según la ecuación (2.5) como la relación que existe entre la energía emitida por un cuerpo frente a la radiación que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura [11].

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda B}} \quad (2.5)$$

Normalmente la emisividad es dependiente de la longitud de onda y temperatura a la que se someta el cuerpo. No obstante, los sensores infrarrojos actuales operan en una región concreta del espectro. Por tanto, una estimación que se suele hacer es aproximar esta emisividad a un valor constante, de tal forma que $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$. A las superficies y objetos que se les aplica esta estimación se les llama cuerpos grises. En la realidad los objetos son radiadores selectivos, su emisividad cambia dependiendo de la longitud de onda y temperatura. Para obtener la radiación de un cuerpo no negro, se introduce su emisividad, que puede variar de 0 a 1 en (2.3), quedando la expresión de la intensidad de radiación según se detalla en la ecuación siguiente:

$$W_b = \varepsilon_\lambda \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.6)$$

2.3. Caracterización del radiador y del entorno

Todo proceso que incumbe la medida radiométrica viene condicionado por tres factores importantes:

- Modelado de la superficie radiante.
- Caracterización del entorno.
- Estudio del sistema de captación.

En el apartado anterior se ha hablado de forma breve sobre las leyes físicas que sustentan las bases de la radiación infrarroja de un cuerpo. No obstante, en situaciones reales se debe tener en cuenta una serie de condicionantes que provocarán cambios en esta energía, es decir, la radiación emitida por un cuerpo no recorre todo el trayecto hacia el sistema de captación sin que su información se vea afectada. Algunos de estos factores son derivados del propio cuerpo radiante y del entorno físico donde se encuentra, mientras que otros son resultado del propio sistema de medida. En muchas ocasiones se tienen que aplicar términos de corrección sobre la escena estudiada, ya que existen variables tanto intrínsecas como extrínsecas a la superficie estudiada que intervienen en el proceso de toma de datos radiométricos. El resultado final de este tipo de medidas siempre viene condicionado por el dispositivo de captación y por el modelado de su entorno.

Se procede a explicar aquellos factores ajenos al sistema de medición que intervienen en el proceso de medida radiométrica [6][13]. Los factores que implican parámetros derivados de este sistema, en este caso cámaras térmicas, serán tratados en un capítulo posterior.

- **Emisividad.** Como se ha nombrado antes, no todos los cuerpos emiten radiación infrarroja en la misma proporción, ni eso significa que emitan más de forma proporcional a la temperatura a la que están sometidos. El parámetro que rige esto es la emisividad, que se define como la medida de la eficiencia que tiene una superficie de emitir energía térmica al someterle a una determinada temperatura, tomando como referencia la que emitiría un cuerpo negro. La emisividad toma valores entre 0 y 1.
- **Reflectividad.** A la hora de proceder con medidas radiométricas hay que tener en cuenta que los experimentos no solo vienen condicionados por el objetivo estudiado. El sistema encargado de recabar datos sobre una determinada superficie está tomando medidas de esta y de la reflexión de las emisiones de todo su alrededor. Por lo tanto, la imagen es influenciada por las reflexiones del entorno, que pueden provocar una interpretación incorrecta de la lectura.
- **Temperatura del entorno.** La matriz de sensores de una cámara no solo capta la energía térmica proveniente del objetivo, como se ha dicho antes las reflexiones ajenas a este también afectan a la medida total. Si se tiene una superficie a una temperatura T_1 la integración total de los sensores no vendrá solo condicionada por esta temperatura, en el caso más sencillo estará influenciada por la temperatura ambiente del entorno T_{amb} . La integración final depende de muchos factores, si $T_1 > T_{amb}$ es probable que se tenga una medida final relativamente fiable. Sin embargo, si $T_1 < T_{amb}$ el resultado final podría estar condicionado por el entorno, afectando así a la superficie estudiada. Calibrar este fenómeno es parte del trabajo del usuario, pues es este el que se enfrenta a los distintos escenarios posibles, donde puede existir muchas más temperaturas no homogéneas que caracterizar.
- **Transmisividad de la atmósfera.** La atmósfera terrestre afecta a la formación de imagen térmica absorbiendo y emitiendo radiación infrarroja basada en la temperatura de esta, densidad del aire, humedad relativa y distancia entre la

superficie de estudio y la cámara. Este factor ($0 < \tau_{atm} < 1$) caracterizado entre la cámara y el blanco puede cambiar la lectura de flujo y por lo tanto de temperatura del experimento, sobre todo a medida que se aumenta la distancia. En definitiva, puede conllevar que las medidas tomadas por la cámara difieran de la actual temperatura de la superficie. La transmisividad de la atmósfera τ_{atm} es uno de los parámetros más importantes que afectan a la potencia que llega al dispositivo de captación [14] y que servirá para obtener la temperatura equivalente. Es uno de los parámetros que justifica la necesidad de conocer, o en su defecto estimar, la distancia asociada a cada uno de los píxeles de la cámara.

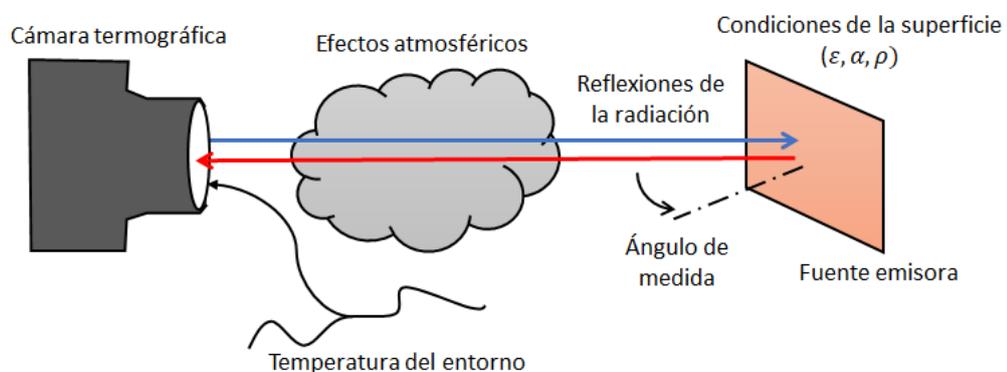


Figura 2.7: Efectos que caracterizan la medida radiométrica. Adaptado de [13]

2.3.1. Efecto de la caracterización en las medidas térmicas

La temperatura de un objeto puede ser calculada directamente despejando de la ecuación (2.6). Sin embargo, este método no tiene en cuenta la caracterización del entorno anteriormente nombrada, pues resulta que cada uno de los agentes externos a la superficie radiante condicionan las medidas finales de un sistema térmico. Basándose en la figura 2.7, se puede dividir las distintas aportaciones de radiación en 3 partes:

$$W_{tot} = W_{obj} + W_{amb} + W_{atm} \quad (2.7)$$

W_{obj} es la radiación debida a la emisión de la superficie, W_{amb} representa la radiación que se refleja en la superficie debida a la temperatura del entorno y W_{atm} es el resultado de la componente radiométrica debida a la temperatura de la atmósfera.

- La radiación emitida por el objeto ya ha sido descrita anteriormente, W_{obj} es el producto de la constante σ por ε_{obj} y T_{obj}^4 .
- Los cuerpos reales tienen una reflectividad mayor que 0, por esto, reflejan parte de la radiación infrarroja emitida por el entorno donde se encuentran. Teniendo en cuenta que el coeficiente de reflexión puede ser calculado a través de la emisividad del objeto ($\rho_{obj} = 1 - \varepsilon_{obj}$), la emisión captada del cuerpo queda como lo mostrado en la figura 2.8.

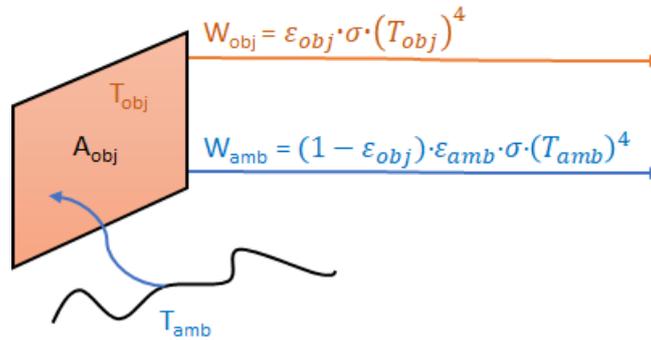


Figura 2.8: Emisión y reflexión de una superficie estudiada

- Otra componente para tener en cuenta es la atmósfera que atraviesa la onda para llegar al sistema de captación. Se tiene que añadir el factor correspondiente a la propia radiación de esta, además del término atenuante que introduce en las demás componentes. Teniendo en cuenta que la emisividad de la atmósfera ε_{atm} se puede escribir en función de su transmisividad ($\varepsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm}$), la emisión captada del cuerpo queda como lo mostrado en la figura 2.9.

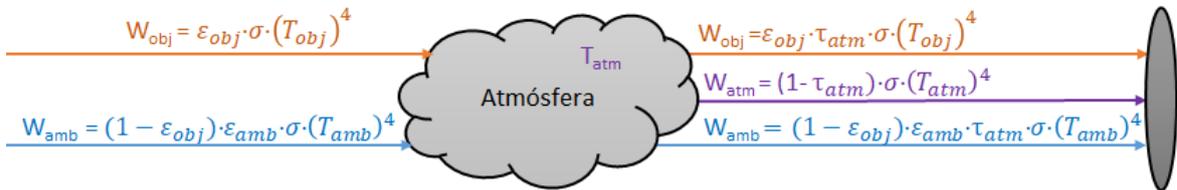


Figura 2.9: Efectos de la atmósfera en las medidas

Con este modelo se resaltan los ajustes necesarios para tener en consideración el peso de las respectivas aportaciones derivadas de caracterizar el entorno. Por lo tanto, la temperatura equivalente del objeto T_{obj} tendría que ser despejada de todo el cálculo

referenciado en la figura 2.9. No obstante, para perfeccionar el modelo todavía se necesitan incluir otros factores que dependen del medio de captación, como, por ejemplo, el efecto de la óptica, una posible protección extra o recubrimiento adicional sobre la cámara que modifique el total de flujo incidente, etc. Por ello, el flujo final recibido será tratado y modelado en capítulos posteriores de este trabajo, cuando se especifique la cámara sobre la que se basa este.

La ecuación (2.6) describe en gran medida la densidad total de potencia que emite un cuerpo, a esto hay que aplicarle las distintas aportaciones referenciadas en la figura 2.9 y se tendría una buena aproximación del total de potencia radiada que incide sobre un sistema de captación concreto. Sin embargo, una gran cantidad de sistemas actuales no operan en todas las longitudes de onda, por ello, no necesariamente se trabaja con el flujo total incidente caracterizado hasta ahora. Por ejemplo, este TFG se desarrolla sobre las cámaras termográficas como medio de captación. Los sensores de estas cámaras vienen preparados para trabajar en un rango determinado de longitudes de onda (MWIR y LWIR, sobre todo), incorporando filtros que eliminen aquellas aportaciones no pensadas en el diseño de estos. De la misma forma, en la actualidad no es de extrañar que se encuentren dispositivos que no trabajen directamente con las ecuaciones físicas descritas en apartados anteriores, aunque si se basen en gran medida sobre ellas, pues sientan las bases principales y teóricas de la termografía actual.

Capítulo 3

Cámaras termográficas

3.1. Introducción y definición del sistema

El sistema predilecto para la captación, procesado y presentación de una imagen térmica infrarroja es la cámara térmica, cuya función es mostrar diferencias en las intensidades relativas de la energía infrarroja emitida o reflejada desde un blanco de estudio. Este proceso termina creando imágenes a partir de estas diferencias de energía térmica, por lo tanto, tal como se ha comentado anteriormente, todo cuerpo que emita energía puede ser visto desde una perspectiva térmica. Se caracterizan por ser dispositivos que no necesitan de un contacto directo con la superficie u objeto estudiado para poder medir temperatura aparente a partir de la radiación infrarroja recibida. Estos datos térmicos son valiosos para labores donde la medida directa de la superficie no puede ser llevada a cabo debido a la poca seguridad o nula captación de la información deseada, por ejemplo, en localización de fugas, efectos térmicos en dispositivos electrónicos, salvamento y seguridad, etc. Proporcionan de esta manera una respuesta rápida con información crítica para asistir incidentes, seguimiento de fuegos, localizar víctimas o establecer rutas de escape. Personas, animales, sistemas electromecánicos y procesos industriales, todos tienen firmas de calor individuales que se pueden observar con estos dispositivos.

Las cámaras térmicas suelen ser sensibles a ciertas bandas del espectro infrarrojo. Este trabajo referencia aquellas dentro del rango MWIR y LWIR, comúnmente llamadas “bandas de imagen térmicas” y son en las que se basan la mayoría de los estudios

sobre termografía infrarroja, pues la emisión de radiación es pasiva y viene de la propia superficie estudiada. En la banda de MWIR se suele trabajar con detectores refrigerados (refrigeración sobre los 77 Kelvin) para poder crear una imagen térmica. Sin embargo, esto conlleva un aumento de tamaño, peso y coste, requiriendo un mantenimiento periódico de los dispositivos. Por otro lado, las cámaras que operan en LWIR han ido evolucionando para integrar detectores no refrigerados que trabajan y detallan imágenes en condiciones de temperatura ambiente. Consiguiendo además un tamaño menor, ligero y de menos coste. Actualmente existen dos enfoques diferentes para la fabricación de cámaras: pasivo y activo.

- **Enfoque activo.** Utiliza un haz infrarrojo integrado en la cámara o ubicado cerca de ella para alumbrar el blanco estudiado. Este enfoque es principalmente usado para excitar la emisión de radiación del objeto o para conocer su distancia gracias al trayecto ida/vuelta del rayo. El problema de este sistema se basa en el propio alcance máximo del rayo infrarrojo. Su equivalente en las cámaras de luz visible podría ser el *flash*.
- **Enfoque pasivo.** La radiación que proviene de un objeto o superficie se mide sin ninguna estimulación térmica artificial. No tienen ningún tipo de reflectores y captan la radiación infrarroja emitida de forma pasiva por un cuerpo. Actualmente son las más comunes y también llamadas cámaras termográficas. Este trabajo está centrado en el área de estas cámaras.

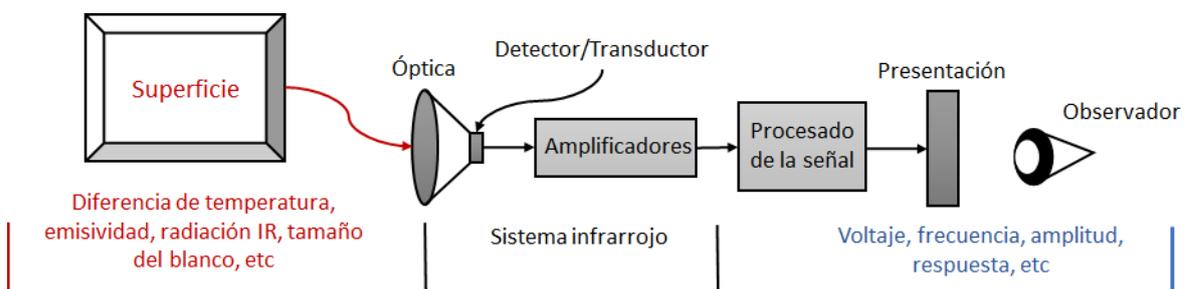


Figura 3.1: Captación, procesamiento y presentación de datos térmicos. Adaptado de [15]

Una cámara termográfica es un sistema complejo resultado de unir distintos componentes [15]. Cada uno de estos componentes cumplen o tienen que cumplir con un propósito determinado, derivando en la transformación de la radiación IR en una imagen radiométrica legible por los ojos humanos. Tal como se referencia en la figura 3.1,

el flujo térmico incidente, modelado anteriormente por las leyes de la termografía, incide en la lente de la cámara y es concentrado en el detector. La señal generada por este es procesada en una señal de vídeo o imagen codificada en binario y enviada a la presentación para mostrarse al usuario.

Gracias a lo recogido en apartados anteriores se sabe que un cuerpo emite una energía electromagnética en función de la temperatura a la que se somete. La finalidad de una cámara termográfica es proporcionar una estimación de esta temperatura a partir de la energía infrarroja recibida en su matriz de sensores. La precisión del cálculo de la temperatura asociada a cada uno de los píxeles que componen la matriz depende de numerosos factores, muchos de ellos ya han sido comentados. Sin embargo, otros tantos dependen del propio sistema de medida. Se puede dividir el estudio de este tipo de dispositivos en tres partes:

- La óptica implementada.
- Su tecnología de sensores/transductores.
- El procesado de datos.

En este capítulo se pretende explicar las ideas básicas para entender los 3 subsistemas. De la misma forma, en el capítulo siguiente se especificará de forma más profunda el procesado de datos, centrándose este en una cámara específica del fabricante FLIR.

3.2. Óptica implementada y parámetros derivados

Toda cámara viene con una determinada óptica definida de fábrica, cuya función principal es la focalización de la radiación IR que le llega y su distribución hacia el sensor/transductor, como se observa en la figura 3.2. Las condiciones de fabricación de la lente intervienen en sus propiedades físicas, por lo que su morfología caracteriza los factores conocidos como FOV (*Field Of View*), IFOV (*Instantaneous Field Of View*), distancia focal, etc. Estos tienen relación directa con el ángulo abarcable de la cámara y el área captada por la misma. El estudio de la óptica será abarcado desde el punto de vista de la formación de imagen radiométrica, más que desde su efectividad para captar y distribuir el flujo electromagnético incidente.

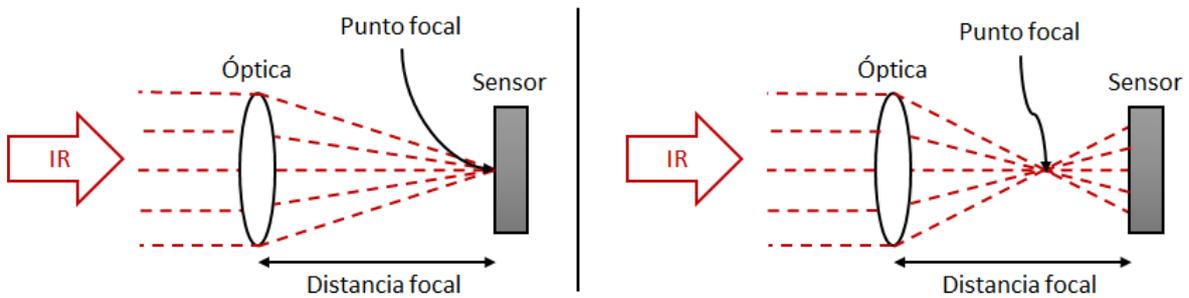


Figura 3.2: Distintos puntos focales para la energía infrarroja

3.2.1. Campo de visión o FOV

El campo de visión o FOV de una cámara termográfica describe el área localizada y modelada finalmente por el sensor, como se referencia en la figura 3.3. Normalmente se expresa en ángulos, independientemente de la distancia física entre el blanco y esta. Depende tanto de la distancia focal como del tamaño del sensor, de tal forma que se convierte en un parámetro con relación a la apertura vertical y horizontal. Lo ideal es que el blanco estudiado abarque todo el campo de visión, pero a veces esto no es posible debido a las altas temperaturas del objetivo y al peligro que podría suponer para la cámara o el operador. En la práctica, un ángulo grande, es decir, el uso de un objetivo gran angular es importante si se quiere obtener un campo de visión amplio. Este parámetro suele ser desglosado en tres tipos distintos de FOV: El horizontal, cuyo significado físico queda reflejado en las filas Y de una matriz. El vertical, representado de la misma manera por las columnas X de una matriz. El diagonal, usado normalmente para detallar de forma implícita los dos anteriores.

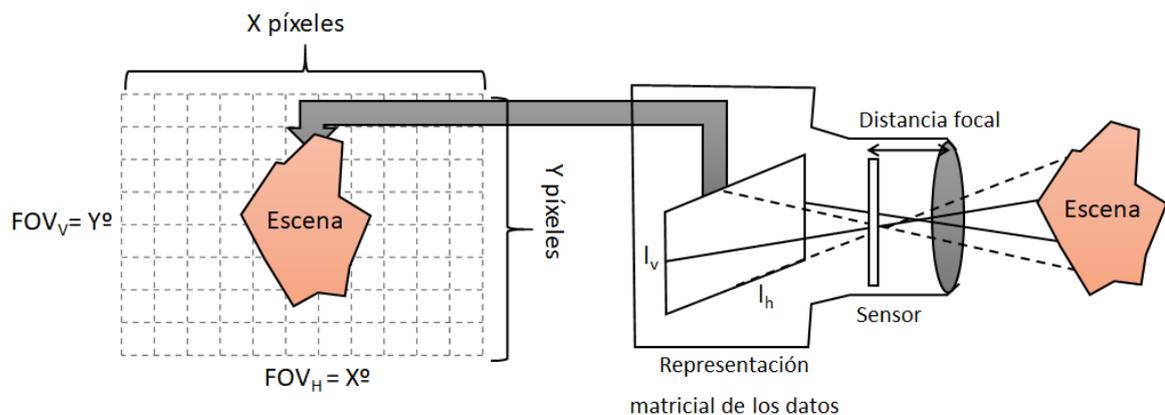


Figura 3.3: Representación gráfica de la conversión escena a matriz

Este parámetro interviene en dos cálculos importantes: el área mínima detectable por una cámara y el área total abarcable, siendo ambas mayores cuanto más grande es el factor de FOV, en definitiva, es un multiplicador. No obstante, el aumento de este factor tiene como resultado el aumento de la dispersión de los píxeles, necesitando más resolución para mayor precisión en los datos. Por otro lado, si este factor es pequeño se consigue que la distribución de píxeles para un área dada sea lo más precisa posible.

3.2.2. Distancia focal

Distancia, dada en milímetros, entre la lente de la cámara y el punto donde todos los rayos captados por la óptica convergen, normalmente el sensor. Este parámetro determina de forma directa la resolución espacial instantánea (IFOV, o FOV entre dos píxeles contiguos) de la cámara. La relación entre FOV y distancia focal queda detallada de la siguiente forma:

- Distancias focales cortas: campo de visión amplio.
- Distancias focales largas: campo de visión estrecho.

Dependiendo del objetivo que tenga la cámara (conjunto que incluye la lente, sistema de enfoque, obturación, etc.) se tienen distintas configuraciones de distancia focal y FOV, un ejemplo de esto queda referenciado en la figura 3.4.

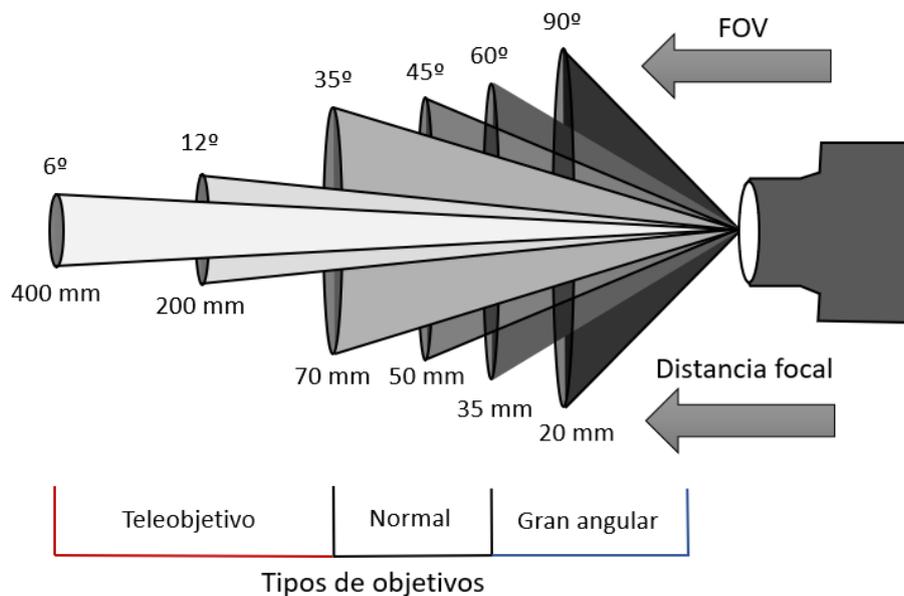


Figura 3.4: Área barrida dependiendo de la distancia focal

- Los angulares y grandes angulares condicionan un FOV muy amplio.
- Con objetivos focales medios se obtiene un FOV que se asemeja bastante a la percepción de una escena al contemplarla con ojos propios.
- Los objetivos focales largos o teleobjetivos muestran un FOV cada vez más estrecho, asociado de forma clásica a un mayor alcance en la visión de una escena.

Las aportaciones del FOV y la distancia focal suelen ser tomadas en cuenta de forma conjunta, pues al final un factor siempre depende del otro. Normalmente la variable dependiente para cualquier estudio es sin duda la distancia física entre la cámara y el blanco. Teniendo una determinada distancia focal se podrá enfocar a mayor o menor distancia, a costa del área total captada por la cámara.

3.2.3. Resolución espacial

Relacionado directamente con el campo de visión instantáneo o IFOV. Se puede definir como el detalle físico más pequeño que se detecta en un blanco, basado en el área más pequeña que cubre un píxel de la cámara. El número de píxeles necesarios para la detección, reconocimiento e identificación de un blanco vienen dados en definitiva por el IFOV, siendo este más pequeño cuanto mayor es la distancia focal. En la práctica se tiene en cuenta el valor teórico de resolución espacial para hacerse una idea de la superficie mínima radiante que se pueda captar. Su valor, representado en miliradianes, corresponde al tamaño del punto visible (dado en milímetros) de un píxel a una distancia de 1 metro, como se ve en la figura 3.5.

Según se referencia en [16][13] el IFOV de una cámara termográfica puede ser calculado de dos formas distintas:

- A partir del FOV y el número de píxeles del sensor:

$$IFOV = \frac{FOV}{n_{píxeles}} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

- A partir del tamaño de los píxeles p del sensor y de la distancia focal f :

$$IFOV = \frac{p}{f} \quad (3.2)$$

Para resolver si existen diferencias térmicas en la escena estudiada no se necesitan más de 1 o 2 píxeles de la cámara. Sin embargo, puede que no sea suficiente para ofrecer una representación de la temperatura media de un área, pues con estos datos es complicado resolver si el valor medido es correcto. Esto define un nuevo término, el objeto medible más pequeño o $IFOV_m$, siendo su valor la designación del objeto más pequeño cuya temperatura se puede medir de forma fiable con una cámara termográfica.

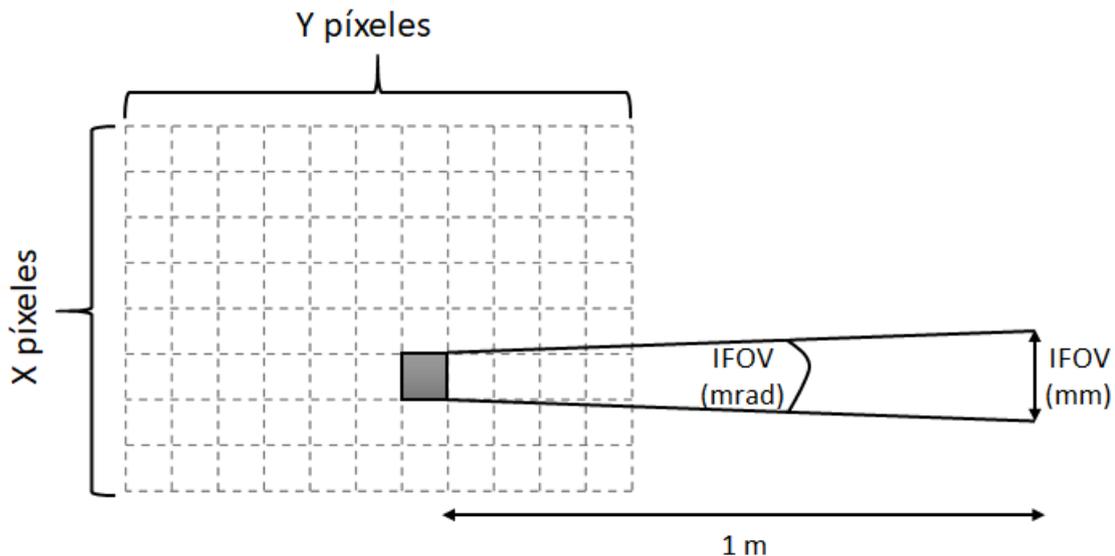


Figura 3.5: Representación visual del IFOV referente a 1 metro de distancia

El convenio actual [16] sostiene que este debe ser de al menos 3 veces la dimensión del IFOV (3.3) para así evitar medidas erróneas sobre determinados blancos y mejorar la precisión, con la finalidad de estimar su temperatura de la forma más exacta posible. Haciendo una analogía, el IFOV es similar a ser capaz de ver una señal de tráfico en la distancia, mientras que el $IFOV_m$ sería parecido a poder leer el contenido de esa señal.

$$IFOV_m = 3 \cdot IFOV \quad (3.3)$$

Para entender mejor este concepto se va a suponer que un determinado blanco de estudio es un punto sobre cualquier plano. Siguiendo esta línea, se pueden esperar 3 casos diferentes [17] en la medida radiométrica de este punto: el caso real, caso ideal y, por último, la regla general que se suele utilizar.

- **Caso real.** El punto solo llena una parte del píxel. Por lo tanto, la temperatura medida por el sensor no corresponde ni con la temperatura de ese punto ni con la del plano. El sensor hace un cálculo en base a la medida de los dos valores.

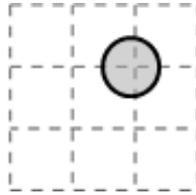


Figura 3.6: Caso real

- **Caso ideal.** El punto medido cubre casi por completo un píxel entero del detector. La temperatura medida por el mismo es cercana a la temperatura verdadera del blanco.

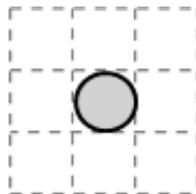


Figura 3.7: Caso ideal

- **Regla general.** Sólo si un objeto es tres veces mayor que el tamaño del blanco visible más pequeño se considera que un píxel del sensor queda cubierto por completo. En este píxel se detecta la temperatura del objeto medido.

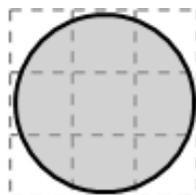


Figura 3.8: Regla general

Una representación completa que muestra este concepto queda referenciada en la figura 3.9.

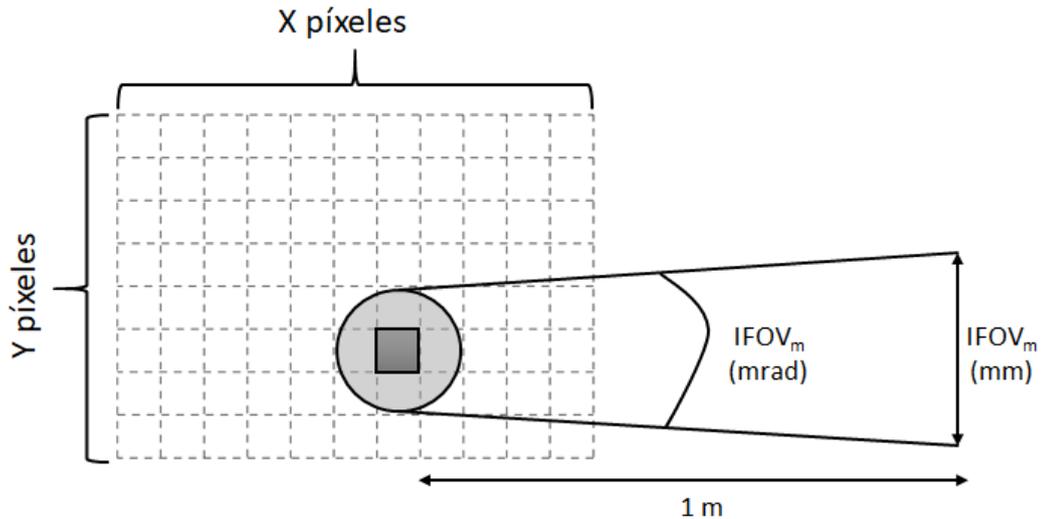


Figura 3.9: Representación visual del IFOV_m referente a 1 metro de distancia

3.2.4. Número f de la óptica

Este parámetro determina como la radiación térmica llega al transductor. La apertura de una cámara, también conocida como número f, indica la capacidad de que llegue al sensor más o menos radiación a través del diafragma de la lente.

- Un número f menor significa una apertura mayor, y, por tanto, más cantidad de radiación absorbida por la lente.
- Un número f mayor significa una apertura menor, y, por tanto, menos cantidad de radiación absorbida por la lente.

Imaginando el diafragma de forma análoga a la pupila del ojo humano. Cuando se encuentra en condiciones de baja visibilidad, la pupila se dilata permitiendo un mayor paso de la luz, por el contrario, en condiciones de mucha iluminación, la pupila se contrae por lo que disminuye la cantidad de luz que llega a la retina. En realidad, es una cantidad adimensional resultante de dividir la distancia focal por el diámetro del diafragma, como se ve en (3.4):

$$N = \frac{f}{D} \quad (3.4)$$

Aunque normalmente los fabricantes de cámara dan este dato despejando D :

$$D = \frac{f}{N} \quad (3.5)$$

D resulta ser la N parte de la distancia focal f del objetivo.

Como se observa en la figura 3.10, si f se reduce, es decir, se cierra el orificio, la profundidad de campo incrementa, permitiendo capturar una mayor cantidad de elementos a diferentes longitudes en un espacio amplio desde la posición de la cámara. Sin embargo, la cantidad de radiación que llega al sensor es menor.

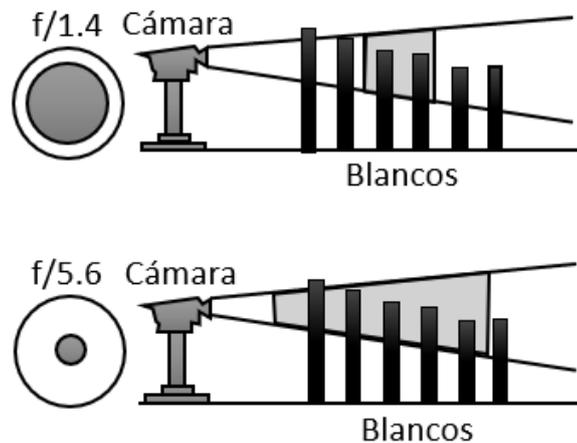


Figura 3.10: Ejemplo de distintos enfoques según el número f

En el apartado 3.6.3.1 se explica como el número f de la óptica entra en juego para calcular los cambios en la sensibilidad térmica de una cámara termográfica, lo que interesa en este caso es tener un número f pequeño.

3.2.5. Consideraciones prácticas del cambio de óptica

A la óptica de una cámara termográfica se le atribuye una capacidad única, esta es, que proporción de la escena estudiada se lleva al sensor para su posterior digitalización en una matriz de datos. Un ejemplo sencillo para abordar este concepto se puede hacer a través de simuladores como el “Fieldometer” de FLIR [18], que presenta una serie de modelos de cámaras para entender cómo afectan parámetros como la resolución, la distancia o el FOV en una determinada escena. Para la prueba se ha seleccionado la cámara Tau 2 de 640 píxeles y una distancia del blanco de 3 metros. La variable que se cambia es el FOV_H , en una primera prueba se selecciona el de 45° y en la segunda el de 69° . Se tiene en cuenta de esta manera, que al cambiar el parámetro FOV también lo hace el IFOV y la distancia focal. Con esta simulación se refleja, contando la física y morfología de la propia lente, como la escena se representa y transforma en una matriz de datos. El resultado visual de esto se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11: Resultados de la herramienta de simulación Fieldometer

No se necesita del rectángulo rojo para notar las diferencias por el cambio del FOV_H . Un FOV menor permite tomar datos a mayores distancias, pues la proporción y representación del blanco estudiado es mayor, lo que deriva en un mayor número de píxeles para describir este blanco frente a su entorno. Con un FOV mayor ocurre justo lo contrario, para una misma distancia el blanco parece más alejado, lo que deriva en menos píxeles para describir su forma. Solo este parámetro ya tiene mucho efecto en la imagen final que se le presenta al usuario, para muchas aplicaciones la solución de ciertos inconvenientes radica en ser capaz de modificar este parámetro, por ejemplo, cambiando la lente. Las cuestiones que se deben tener en cuenta son en esencia las dimensiones del blanco a estudiar y la distancia que separa a este de la cámara.

3.3. Sensores de una cámara termográfica

Los detectores infrarrojos son normalmente clasificados en detectores fotónicos y térmicos [19]. Los primeros son más rápidos y sensibles si se comparan con los segundos, normalmente usados en aplicaciones relacionadas con la astronomía o la creación de herramientas concretas de la medicina. Los detectores térmicos han adquirido mucha influencia desde el nacimiento de los llamados detectores no refrigerados. La diferencia fundamental entre ambos tipos de detectores es que los primeros estudian fotones, desde el punto de vista de su emisión y reflexión, mientras que los segundos se centran en diferencias térmicas relativas de flujo o radiación infrarroja.

Hasta hace algunos años los sensores térmicos se basaban en detectores ópticos que necesitaban de una refrigeración continua para operar de forma correcta, tal como se ha explicado en el párrafo anterior. Debido a que su propia emisión de energía térmica

dificultaba el proceso de adquisición de datos. Sin embargo, tienen una serie de ventajas que les permite continuar en el mercado, como por ejemplo su alta sensibilidad térmica, estos sistemas tienen el nombre de detectores refrigerados.

- **Detectores de estado sólido refrigerado.** Están basados en el efecto fotoeléctrico, son semiconductores que se exponen a radiación IR y producen una corriente proporcional a la radiación recibida. Los electrones excitados por esta radiación pasan a la banda de conducción, esto genera un cambio en la conductividad, en el voltaje o en la corriente eléctrica del circuito. Las cámaras que integran estos sensores requieren de un tiempo de enfriamiento antes de poder operar correctamente. De esta función se encarga el refrigerador criogénico, que lleva la temperatura del sensor a valores cercanos a los $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si este proceso no se llevara a cabo en estos sensores, se mostrarían medidas erróneas causadas por su propia radiación térmica. Los sistemas refrigerados trabajan normalmente en la zona MWIR, pero pueden llegar a la LWIR según el tipo de diseño que presenten. Sus inconvenientes son que producen corrientes de oscuridad y que su respuesta depende de la longitud de onda estudiada.
- **Detectores de bolómetro no refrigerado.** Este tipo de detector está diseñado y basado sobre una tecnología del bolómetro. Un bolómetro es en esencia una resistencia-termómetro que muestra una determinada respuesta en función de la radiación a la que está sometido. Estos, al contrario que los refrigerados, son más lentos y su sensibilidad es menor. No obstante, que su respuesta sea igual para todo el espectro hace que sean utilizados para ciertas aplicaciones, como por ejemplo la termografía infrarroja, trabajando sobre todo en la región LWIR.

La llegada de los microbolómetros (bolómetros con escala de μm) de forma comercial cambió el panorama de cámaras termográficas hasta ese momento, creando sistemas más baratos, con menor consumo y de un pequeño tamaño. Se puede decir que el diseño y venta de este tipo de detectores cuenta con un mercado de nicho, donde son relativamente pocas las empresas que se dedican a su fabricación. No obstante, existen diversas corrientes de investigación en esta área, encontrando una gran cantidad de artículos científicos sobre el tema, como, por ejemplo, los detallados en [20] y [21].

3.4. Microbolómetros: fundamentos generales

La cámara termográfica que se estudiará en este TFG opta por la tecnología de bolómetro no refrigerado, al igual que gran parte de cámaras del mercado. Su elección viene condicionada por su bajo precio y la capacidad de elaborar dispositivos más compactos para aplicaciones específicas, siendo este uno de los núcleos claves para el estudio de este tipo de dispositivos. Por ello, se contemplarán los conceptos básicos sobre el funcionamiento de la tecnología no refrigerada en la que se basan muchos de estos sensores, además de explicar cómo funcionan o que factores los caracterizan. Antes de nada, conviene dar una definición formal de lo que es un bolómetro y de que partes está constituido.

3.4.1. Definición, diseño de un bolómetro y funcionamiento

Un bolómetro está formado generalmente por un elemento que absorbe radiación y por otro elemento sensor. El estudio de estos detectores empieza con un modelo térmico simple, referenciado en la figura 3.12:

- El detector está conectado por un enlace térmico a un disipador de calor, normalmente el sustrato.
- Absorbe de forma continua una potencia constante P_0 aumentando su temperatura a $T_0 + T_1$.

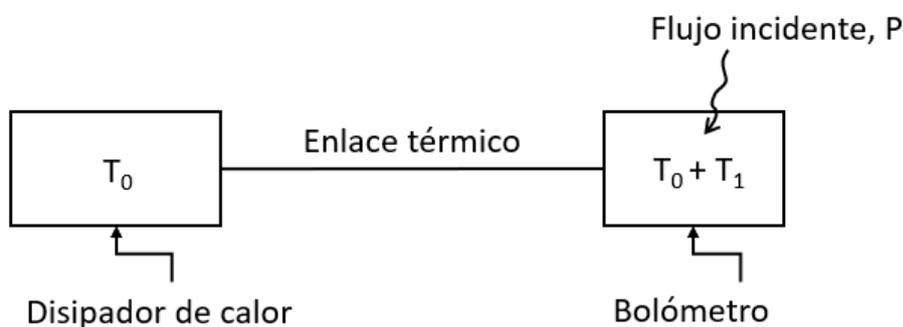


Figura 3.12: Modelo térmico del bolómetro (I)

El modelo se vuelve un poco más complejo cuando se somete el sensor bajo iluminación infrarroja, por tanto, la potencia que recibe ya no es constante, sino variable

por el radiador que la emite. Siguiendo la misma línea, se caracterizan las variables de conductancia y capacitancia térmica:

- El nuevo incremento de potencia es dependiente del tiempo, con una eficiencia que caracteriza a la fuente. La nueva potencia es $P(t) = P_0 + \eta P_v(t)$.
- El enlace térmico tiene una conductancia G expresada en W/K y el dissipador una capacitancia C expresada en J/K , como se observa en la figura 3.13.

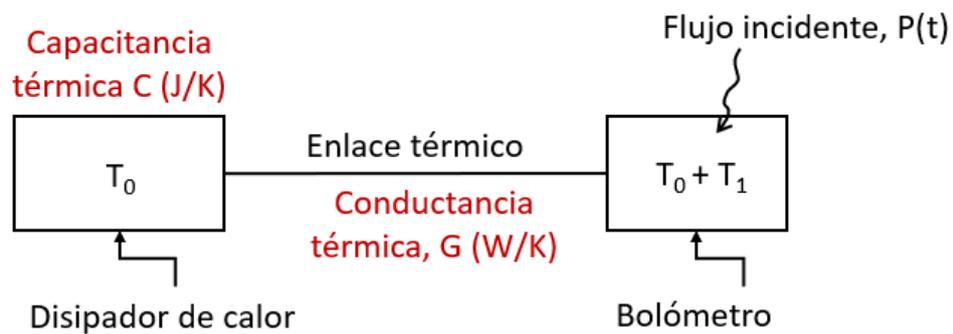


Figura 3.13: Modelo térmico del bolómetro (II)

- El medio absorbente está diseñado sobre un material cuya emisividad sea lo más cercana posible a 1 en la región del espectro de radiación donde se desea medir [22].
- El elemento sensor debe ser capaz de cambiar la temperatura individual de cada píxel en respuesta a pequeños cambios en la energía radiante. Suele ser planificado sobre un material con una determinada propiedad física, cuya variación con la temperatura sea notable. En muchas ocasiones esta propiedad es la propia resistencia eléctrica del material, cuya dependencia con la temperatura viene caracterizada por el coeficiente de temperatura α , aunque existen muchas variantes, por ejemplo, con la variación de la constante dieléctrica. Para el caso más común, la radiación absorbida por el transductor se mide con la variación de la resistencia cuando el bolómetro se encuentra expuesto a dicha radiación (figura 3.14).

Este estudio se centra en bolómetros comúnmente hechos de un material termistor que se dividen en una capa absorbedora en la parte superior y una capa reflectora en la

parte inferior, unidas ambas por un puente como el de la figura 3.15, para así maximizar la energía absorbida. El detector se coloca en delgadas guías de apoyo, patas metálicas que tienen dos propósitos: por un lado, son conectores eléctricos al circuito de lectura y por el otro forman un aislamiento térmico entre el detector y los elementos cercanos. Dentro de la gran variedad de termistores existen los elaborados sobre metales o basados sobre materiales semiconductores, este apartado trata la segunda opción (silicio amorfo, óxido de vanadio, etc.), especificando las prestaciones generales para estos.

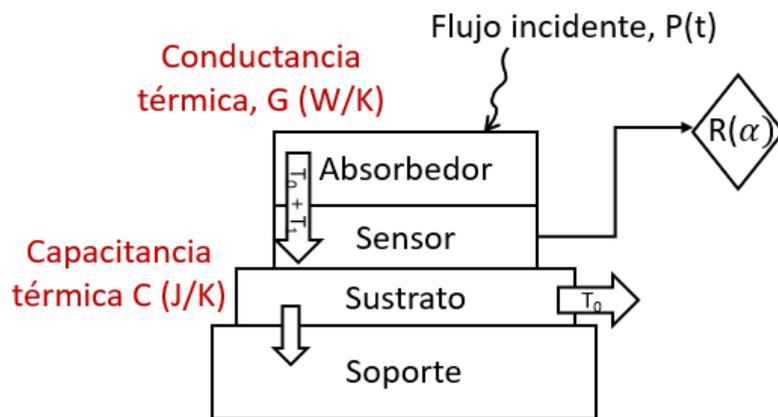


Figura 3.14: Esquema genérico de un bolómetro

La diferencia entre un bolómetro y un microbolómetro es en esencia su tamaño. Por lo demás presenta una igual estructura, siendo usado como detector en cámaras termográficas por sus pequeñas dimensiones y alta sensibilidad. La caracterización de estos se basa principalmente en estudiar su comportamiento eléctrico, al ser transductores potencia/señal eléctrica, en diferentes condiciones de polarización y entornos de iluminación. Cuando se expone a una determinada fuente de radiación, el detector absorbe una parte de la potencia que incide, por lo tanto, aumenta su temperatura [23]. La señal adquirida se convierte en un parámetro eléctrico medible y luego pasa al ROIC (*Readout Integrated Circuit*). Este convierte la señal mediante un ADC (*Analog-to-Digital Converter*) para, a continuación, ser dirigida a la unidad de procesamiento de señales digitales, que produce la imagen térmica final y la envía a las salidas. Con la finalidad de mantener una buena sensibilidad, el material termómetro se mantiene aislado del sustrato al que va unido el ROIC. Este aislamiento se logra alojando el sensor en un paquete vacío o VPA (*Vacuum Package Assembly*), para eliminar la brecha de aire que de otro modo existiría entre los termistores y el ROIC.

Los microbolómetros están diseñados para operar a temperatura ambiente, al contrario que los sensores de tecnología refrigerada. El estudio operativo de un microbolómetro inicia cuando este empieza a captar energía infrarroja, por lo tanto, se puede decir que trabaja con diferencias de temperatura más que con una temperatura específica. Al conjunto de estos detectores se les denomina IRFPA (*Infrared Focal Plane Array*) y su tamaño oscila entre muchos valores, dependiendo de las prestaciones requeridas por el fabricante del dispositivo final. Actualmente el estándar se mantiene entre los $12 \mu\text{m}$ y $17 \mu\text{m}$. En definitiva, un píxel de una cámara termográfica es básicamente un microbolómetro.

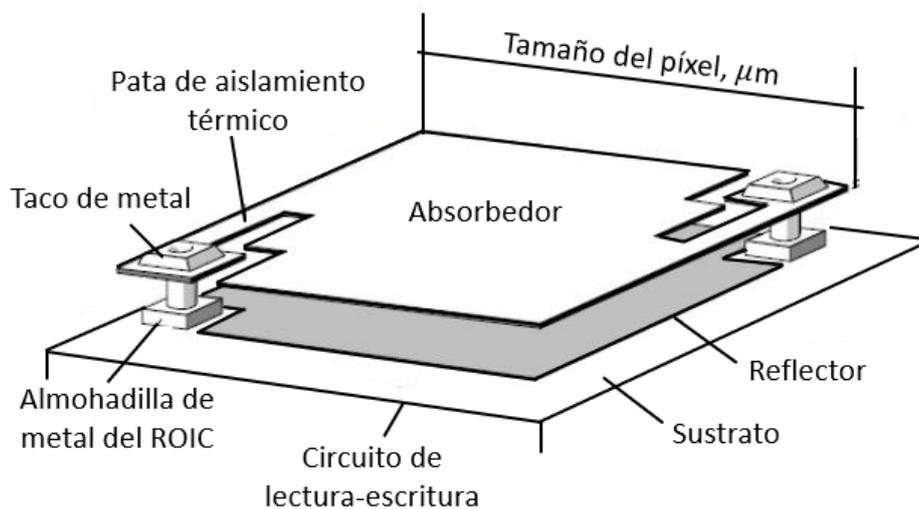


Figura 3.15: Estructura del microbolómetro-puente. Adaptado de [21]

3.4.2. Características fundamentales y resistencia del sensor

Una de las mayores ventajas de este tipo de tecnología es que su respuesta térmica teórica es plana para todas las longitudes de onda, esto significa que su estudio no presenta tanta dependencia por el barrido de frecuencias de la ley de Wien. La potencia de calentamiento tiene una dependencia constante de la temperatura del radiador estudiado en cualquier longitud de onda [22]. Esto se comprueba experimentalmente aumentando la temperatura de un cuerpo negro y observando su potencia de calentamiento frente a la potencia emitida por el cuerpo negro, siguiendo la expresión (3.6):

$$P = \eta \cdot F \cdot W \quad (3.6)$$

F es un factor derivado del estudio geométrico del cuerpo negro y η el coeficiente de absorción del material absorbedor del microbolómetro.

- La idea fundamental es que la variación de la temperatura interna del microbolómetro es independiente a la longitud de onda captada por este.

Para modelar el comportamiento de un microbolómetro desde un punto de vista térmico hay que basarse en el calentamiento que experimenta este al ser expuesto a una fuente de radiación. El coeficiente α desvela que relación existe entre los cambios de temperatura en el detector y los cambios en el valor su resistencia. Se procura mantener el α alto [21] para poder visualizar los cambios de señal cuando la temperatura del entorno cambia con relación a miliKelvin. La resistencia de la mayoría de los semiconductores depende en gran medida de la temperatura. Por ello, estos materiales son apropiados para ser utilizados como elemento sensible de un microbolómetro. Contextualizando, la resistencia R_{bol} del material semiconductor que forma este sensor cambia con una temperatura T , cumplimiento la relación de Arrhenius [24]:

$$R_{bol}(T) = R_0 \cdot e^{\frac{-\alpha \cdot T^2}{T - T_{amb}}} \quad (3.7)$$

De la misma manera, para un material semiconductor, el coeficiente asociado al cambio en la resistencia del material es:

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{dR}{dT} \right) = -\frac{\Delta E}{k \cdot T^2} \quad (3.8)$$

Donde:

R_0 es la resistencia del bolómetro a una temperatura ambiente T_{amb} (normalmente constante), ΔE es la energía de activación y k es la constante de Boltzmann, $k = 8.33 \cdot 10^{-5} eV/K$.

- La energía de activación se define como la energía necesaria para iniciar una determinada reacción química y es obtenida de forma experimental. Este factor puede estimarse a partir de la pendiente de las respectivas curvas y gráficas modeladas según el trazado de Arrhenius, dependiendo del material semiconductor implementado y el dopaje usado. Un ejemplo de este trazado es referenciado en la figura 3.16.

- Esta α en termistores puede ser un coeficiente de temperatura positivo o negativo. En los materiales semiconductores suele ocurrir que la resistencia disminuye con el aumento de la temperatura y también lo hace α , lo que concluye en un factor negativo final [25].

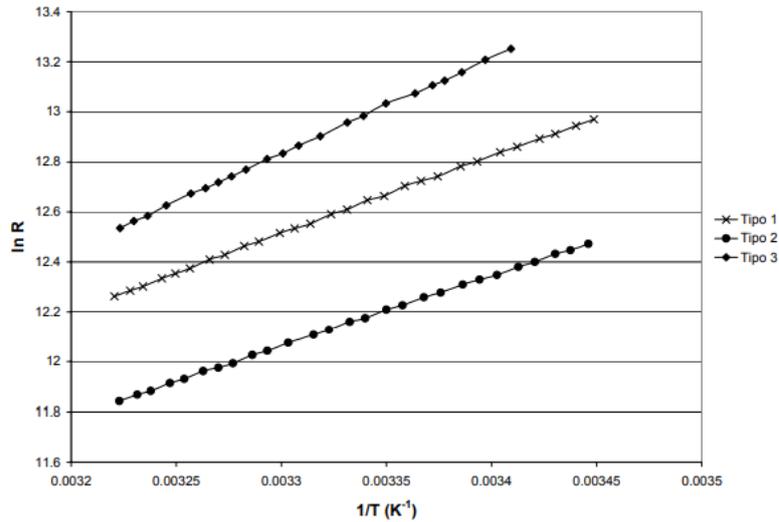


Figura 3.16: Trazado de Arrhenius. Sacado de [22]

De forma análoga y simple, en muchas publicaciones tienen en cuenta que el coeficiente α describe cambios en la resistencia debido a incrementos de temperatura [26], por esto simplifican la ecuación en una forma empírica y mucho más intuitiva como:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} \tag{3.9}$$

Siendo ΔR la variación de la resistencia del bolómetro y ΔT el incremento de temperatura.

Normalmente los resultados derivados de estas operaciones suelen ser bastante amplios, pues se realizan bajo distintas condiciones de temperatura, emisión de radiación, materiales, etc. Por ello, suele ser de ayuda registrar los datos en curvas que representan la variación de la resistencia de los microbolómetros con respecto a la temperatura que se ha registrado, como es el caso de la figura 3.17. Para este ejemplo la variación de la resistencia con la temperatura tiene pendiente negativa, esto es $\alpha < 0$, cuanto mayor sea el valor absoluto de esta pendiente más sensible será el dispositivo. El trabajo original de donde se sacan estas gráficas referencia las mismas a una presión atmosférica de condiciones normales y en el vacío (10^{-5}) *mBar*.

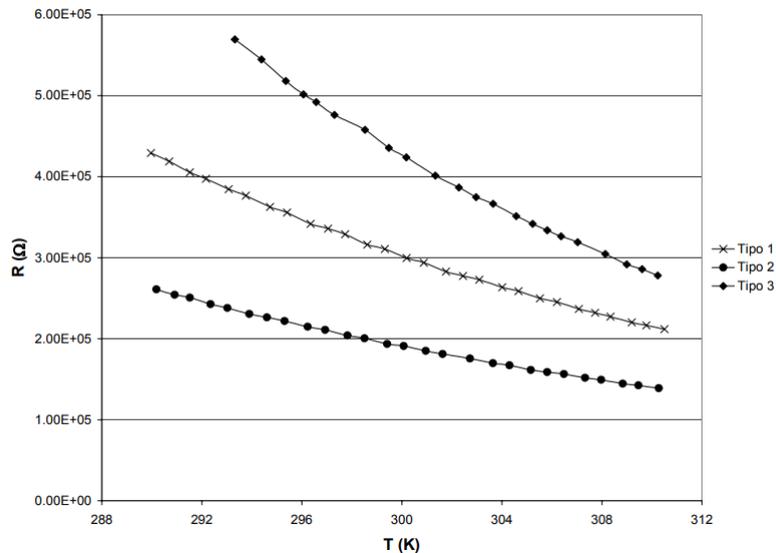


Figura 3.17: Curvas $R(T)$ para los distintos tipos de bolómetros. Sacadas de [22]

3.4.3. Consideraciones necesarias en el estudio del sensor

La tecnología de microbolómetros es fabricada y probada en distintos laboratorios a partir de ciertos sistemas de medidas. El entorno es controlado y se utiliza instrumental óptico, láser, distintos circuitos de polarización y amplificadores como los de la figura 3.18, que no tienen por qué implementarse junto al detector en el ensamblaje final de una cámara. Por lo tanto, es lógico pensar que el funcionamiento de este sensor en una aplicación real tiene una desviación ratificada respecto al comportamiento especificado por su fabricante.

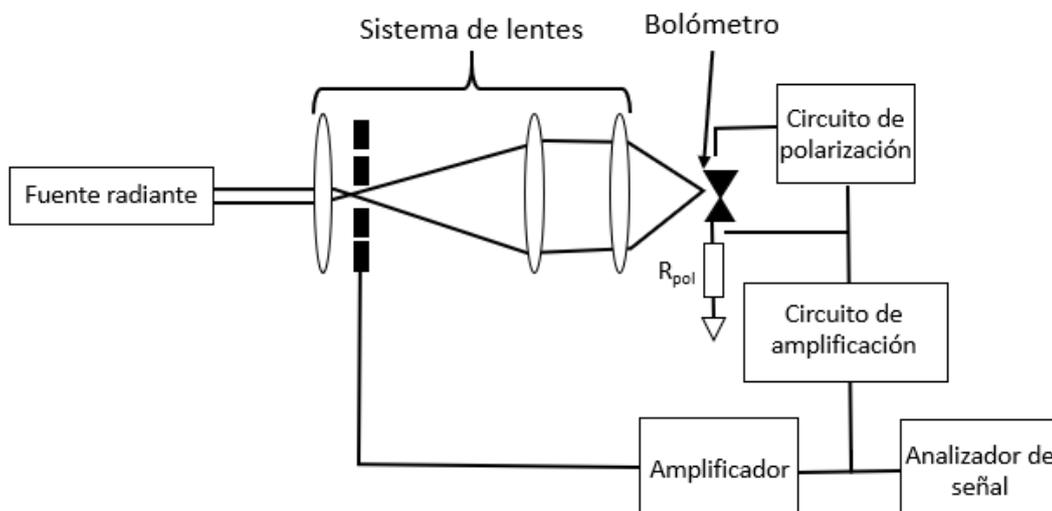


Figura 3.18: Esquema de la caracterización de un microbolómetro. Adaptado de [27]

Por ejemplo, si uno solo se centra en la fuente radiante de la figura anterior. Muchos sensores referencian sus datos al ser sometidos a fuentes de radiación ideales y guiadas. No obstante, durante los despliegues de cámaras termográficas no se tiene una fuente que esté radiando directamente a la óptica, existe la posibilidad de que el sensor reciba energía de un conjunto distribuido de radiadores a diferentes distancias y con distintas componentes térmicas.

A la hora de modelar y referenciar las prestaciones de un microbolómetro los fabricantes suelen usar un circuito de polarización en sus laboratorios. Cuando los detectores térmicos se exponen a la radiación infrarroja, su temperatura cambia debido al flujo radiante incidente. Para monitorizar este cambio, los detectores deben estar eléctricamente polarizados, en la figura 3.19 se muestra un esquema básico de este proceso.

La energía recibida por la radiación incidente es convertida en calor por el absorbedor, llevando a un aumento de temperatura. Una corriente I_{bias} , generada por una resistencia de carga y un voltaje de polarización V_{bias} , fluye a través del microbolómetro. En este caso la potencia, $P_{bias} = V_{bias} \cdot I_{bias}$, se mantiene constante hasta que la señal incidente P , absorbida por el detector causa que la temperatura T del microbolómetro aumente a $T = T + T_0$. El cambio de temperatura produce un cambio en la resistencia, que para el caso de semiconductores se modela con (3.7) y por lo tanto también cambia el voltaje que cae en bornas de la resistencia. Este voltaje es amplificado, medido y leído por el ROIC [20].

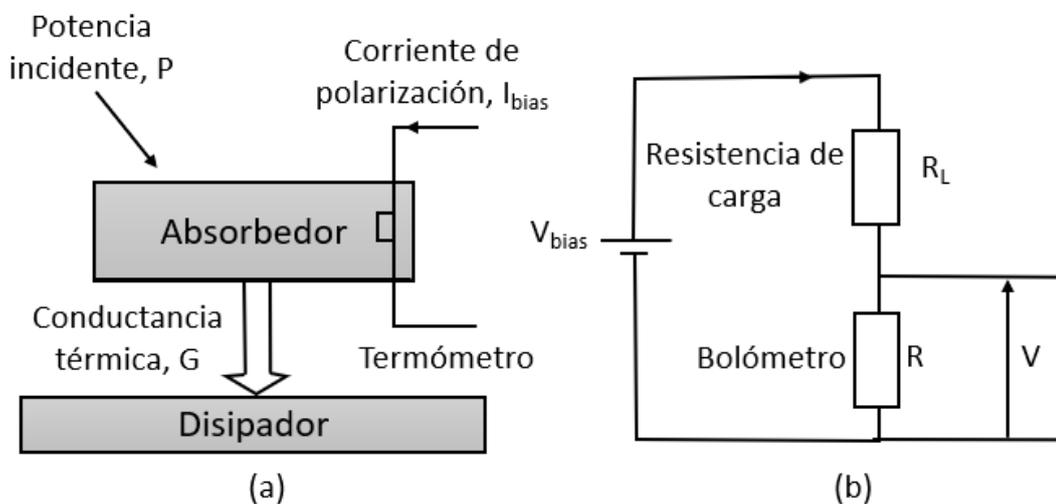


Figura 3.19: Funcionamiento y polarización del microbolómetro. Adaptado de [20]

3.5. Microbolómetros: parámetros derivados

Los parámetros principales que caracterizan el comportamiento de un microbolómetro son su responsividad R_v y su constante de tiempo térmica τ , todo lo demás se suele derivar de estos dos. La primera se puede definir como la señal digital de salida que genera por unidad de potencia recibida, mientras que la segunda da una idea de la rapidez con la que actúa el dispositivo. Siguiendo la misma línea, resulta necesario al menos conocer los conceptos de NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) y rango dinámico del sensor, pues se utilizan mucho por los fabricantes de cámaras termográficas a la hora de su comercialización.

Todos estos parámetros pueden relacionarse con propiedades eléctricas del elemento sensible de los microbolómetros, susceptibles de ser medidas en condiciones controladas.

3.5.1. Constante de tiempo térmica τ - Velocidad de fotogramas

Derivada de la capacitancia térmica C del área de un píxel y conductividad térmica G de la estructura. Estos son valores importantes, pues su cociente $\frac{C}{G}$ devuelve el tiempo de respuesta térmica τ . Esta constante determina el tiempo de enfriamiento del microbolómetro y está relacionada con la respuesta en frecuencia del dispositivo, afectando a su sensibilidad. Para un FPA con una velocidad de fotogramas de 9 Hz, el tiempo de respuesta de un píxel debería ser menor que 1/9 s. Una práctica común es tomar ese tiempo de respuesta como un tercio del tiempo de fotograma, en este caso un máximo de 37 ms. Debido a esto, la forma de diseñar el detector puede basarse en especificar esta relación.

En una cámara termográfica esto indica, en definitiva, el tiempo que le toma en mostrar un cambio repentino en la temperatura de un objeto en la salida del vídeo.

3.5.2. Responsividad del sensor

La responsividad de un píxel dado se define como la señal de salida frente a la entrada de un flujo de radiación en ese mismo píxel [21], siguiendo la relación:

$$R_v = \frac{V_s}{P_o} \quad (3.10)$$

De la misma forma que lo anterior, se utiliza un circuito de polarización y distintas estrategias para estudiar cuál es la responsividad del sensor. Estos datos, por supuesto, son referenciados a partir de estudiar su comportamiento eléctrico bajo diferentes condiciones de polarización e iluminación. Cambiar la metodología, fuente de radiación o material semiconductor conlleva a nuevos valores o desviaciones sobre la medida inicial, existiendo actualmente una gran cantidad de publicaciones en este aspecto, cada una estableciendo su propio método de medida, el tipo de semiconductor o simplemente el dopaje del sustrato. Por esto se necesitan unas curvas que muestren valores de responsividad bajo las condiciones en las que se probaron el sensor, una tabla de valores típicos obtenidos en ciertas pruebas o incluso conocer en qué condiciones se hicieron las pruebas para determinar esos valores.

3.5.3. Ruido del sensor

En este tipo de sistemas se suelen referenciar muchas fuentes distintas de ruido: ruido térmico en la resistencia, ruido de parpadeo (o rosa) en la resistencia, fluctuaciones térmicas en la temperatura del microbolómetro, ruido en la radiación IR que incide, ruido en el circuito de lectura-escritura, etc.

La capacidad y funcionamiento de un microbolómetro viene limitada por estas fuentes de ruido. Sin embargo, muchos fabricantes tienen solo en cuenta aquellos con mayor peso durante la prueba de rendimiento del microbolómetro. Por ejemplo, el fabricante FLIR [28] desarrolla y considera solo los dos primeros ruidos. Las medidas suelen ser referenciadas a un intervalo de tiempo determinado, un mayor intervalo de pruebas deriva en un aumento del tiempo de medida y por tanto en la fiabilidad de esta, definiendo el tiempo de exposición de una cámara. No obstante, esto lleva a un calentamiento más sustancial del termistor, lo que resulta en un aumento del ruido total. Actualmente existe una base unificada a la hora de comparar la exactitud o precisión en la sensibilidad de un modelo de microbolómetro, estas pueden ser medidas con factores como el NEP (*Noise Equivalent Power*) y NETD [29][30]. Suelen ser términos normalmente confundidos porque tienen mucha relación entre ellos:

- **NEP.** Se define como la potencia incidente en el detector que genera una señal de salida igual al valor eficaz del ruido interno del mismo. Con otras palabras,

que señal tiene que llegar al microbolómetro para producir una SNR (*Signal to Noise Ratio*) unitaria. En muchas ocasiones este factor suele estar referenciado al ancho de banda del sensor, expresando valores de vatios por raíz cuadrada de Hercios. A la hora de diseñar el detector se pretende mantener un valor de NEP tan bajo como sea posible, ya que corresponde de forma proporcional a un ruido eficaz menor y por lo tanto una mayor sensibilidad. Teniendo en cuenta que se entiende esta última como la capacidad del microbolómetro para detectar valores de señal de entrada menores.

- **NETD.** Es el término que compara el valor eficaz de la señal de salida del sensor, sometida al ruido anteriormente nombrado y a una temperatura T , con la diferencia de la señal producida al calentar la superficie observada, llevándola del estado T al $T + \Delta T$. En palabras más simples, la NETD es el cambio en la temperatura del blanco que produce una señal en el sensor, la NEP, igual al valor eficaz total del ruido. Distintas pruebas y publicaciones referenciadas en este trabajo, véase por ejemplo lo registrado en [29] y [30], demuestran que grandes valores de este factor implican que el ruido a la salida es demasiado grande para detectar el cambio de ΔT en el blanco observado.

En resumen, la NEP cuantifica el cambio necesario en la potencia emitida por un objeto para igualar el ruido interno del detector. La NETD es la variación de temperatura que propicia la emisión de esa radiación, siendo el mínimo cambio detectable de temperatura en la escena que la cámara puede medir. Debido a la definición formal anterior y por su facilidad de comprensión se suele encontrar la NETD en distintas publicaciones como uno de los parámetros más referenciados por los fabricantes, como por ejemplo FLIR en [28] y [31]. Cuanto menor sea el parámetro NETD mayor será la calidad de las medidas.

3.5.4. Rango dinámico de trabajo

A la hora de comparar las prestaciones de distintos dispositivos se necesita usar una buena figura de mérito. Se puede optar por comparar su rango dinámico de trabajo, que establece los cambios que sufre la resistencia del microbolómetro, debidos a cambios en la temperatura de escena y la naturaleza del semiconductor, frente al valor perceptible

base. Los cambios en el valor de esta resistencia establecen dos límites; existe un valor base que normalmente equivale a la temperatura ambiente y otro máximo, especificando la máxima variación de dicha resistencia con una determinada temperatura capaz de ser binarizada por el conversor. Esto se suele expresar en términos del número de niveles de intensidad digital de los que se compone la imagen térmica [10]. Con esta relación se puede establecer el rango dinámico operativo del sensor:

$$R.D = \frac{\Delta R_{bol}}{R_{bol}} \quad (3.11)$$

Este rango mínimo y máximo es binarizado por el conversor digital del ROIC para luego ser estudiado por el usuario. La generación actual de cámaras proporciona una conversión A/D de 14 bits, que permite medir pequeñas diferencias de datos incluso en presencia de un gran rango de temperaturas en la escena estudiada.

3.5.5. Rango espectral de trabajo

Independientemente de la distancia y la radiación que le llegue a la óptica, uno de los factores más importantes a la hora de elegir una cámara termográfica es su rango espectral de trabajo. Este factor marca el rango mínimo y máximo de longitud de onda donde el sensor opera. La emisividad de una superficie varía en función de la longitud de onda, mientras que la termografía trabaja sólo dentro de un espectro limitado de rangos. Por ello, estos sensores vienen con filtros que solo dejan pasar su longitud de onda de trabajo, recortando por ejemplo la visual o la infrarroja no necesaria.

3.5.6. Resolución de la cámara termográfica

Viene directamente dada por las características del sensor implementado, en definitiva, del FPA. Un microbolómetro del *array* proporciona una medida individual que al final es transformada y digitalizada en un píxel de datos. La matriz resultante de tomar una foto con una cámara termográfica proporciona las medidas radiométricas de todos los microbolómetros que conforman el sistema, por lo tanto, cuanto mayor sea el número de sensores mejor quedará definida la imagen radiométrica. Por ello se dice que cuantos más píxeles se tengan en la matriz, mayor será la precisión en una medida, como se observa en la figura 3.20. Sin embargo, también se debe tener en cuenta la

distancia de separación de estos píxeles, porque interviene directamente con el valor de resolución espacial. Ante igualdad en el número de píxeles habrá energía que no es captada con suficiente precisión debido a la distancia entre ellos.

Usando una cámara con una resolución amplia se puede cubrir un objeto de gran tamaño en una sola imagen. Con una resolución inferior, se necesitan más imágenes para cubrir la misma zona con el mismo nivel de detalle. Normalmente, si se quiere detectar la existencia de un objeto puede que un solo píxel de la cámara sea suficiente. No obstante, si se requiere identificar de que objeto se trata y su naturaleza (si es humano, animal, mecánico, etc.) se necesitará todo un grupo de píxeles para poder modelar estas características.

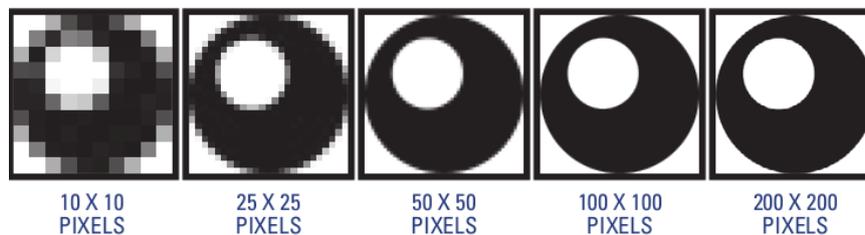


Figura 3.20: Diferencias de resolución sobre un cuerpo dado

La resolución de este tipo de cámaras es relativamente baja si se compara con cámaras de luz visible. Esto es debido al tamaño del propio microbolómetro, cuya dimensión es mayor que los detectores usados en las cámaras de imagen visible. En las cámaras termográficas el tamaño del píxel es de alrededor 12-17 μm , mientras que en las visibles es de alrededor 1-2 μm . La razón detrás de esto es simple, los detectores térmicos tienen que ser capaces de percibir energía con una longitud de onda más grande comparada con la visible. Por lo tanto, se necesitará un tamaño de sensor significativamente más grande. A raíz de esto se entiende el por qué las cámaras termográficas tienen una resolución pequeña en comparación con las visibles, a mayor tamaño de píxel, menos píxeles se pueden integrar en una óptica dada.

De la misma manera, aunque una determinada cámara tenga un menor número de píxeles que definan la escena, si se es capaz de respaldar que los datos captados por esa región son relativamente fiables, se podrá estudiar su viabilidad para diversos campos de aplicación.

3.6. Parámetros derivados del conjunto óptica-sensor

Se necesitan nombrar aquellos factores que surjan del estudio conjunto de los subsistemas nombrados anteriormente. Algunos de estos son referenciados por los fabricantes de cámaras termográficas, mientras otros tienen que ser descubiertos a través de una serie de cálculos por el usuario.

3.6.1. Distancia y umbral de detección de una superficie

La detección depende de la capacidad de resolver si la temperatura del área de observación supera cierto umbral que hace activar los píxeles de la cámara. Si toda la superficie captada por el píxel emite radiación de forma homogénea, será posible obtener el valor de esta temperatura con mayor precisión. Este factor no es algo que suelen dar los fabricantes del mercado, normalmente tiene que ser descubierto por el usuario mediante distintas pruebas y experimentación. Su valor deriva de otros muchos factores que se necesitan estudiar a parte: la óptica, la capacidad que tiene el transductor para captar y transformar energía IR a ciertas temperaturas y determinadas distancias, el ángulo de observación de la cámara, etc.

En la misma línea, la distancia entre la cámara y el objeto a estudiar es un parámetro difícil de modelar, ya que las cámaras termográficas están mayoritariamente calibradas para entornos cercanos. Por ejemplo, si se mide a 1 metro de distancia se conseguirán unas medidas de radiación y un área total estudiada por el sistema, siempre referentes a ese metro. Estas medidas de flujo no se mantienen constantes a medida que uno se aleja del objetivo, pero este hecho no sucede solo por la calibración del dispositivo. Se debe tener en cuenta que el área total integrada por la cámara cambia, es decir, se necesita redistribuir una cantidad fija de píxeles para modelar el comportamiento y situación de ese nuevo escenario, por lo tanto, la aportación energética de cada píxel (debida a reflexiones, atmósfera, etc.) no es la misma. En este caso, existe la posibilidad de que se registren diferentes aportaciones de calor a diferentes distancias, como se observa en la figura 3.21. De tal forma que se necesita de un buen modelado y calibración para poder parametrizar estos valores.

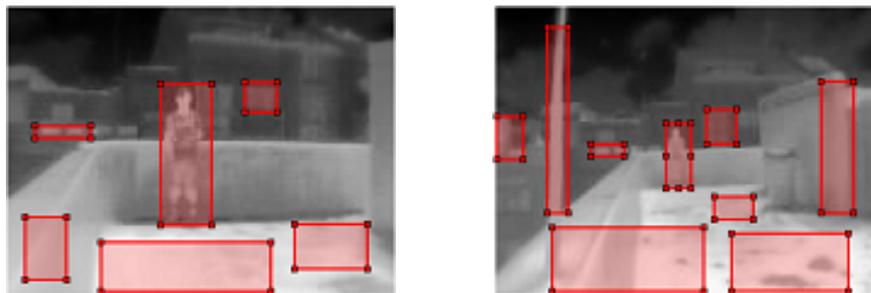


Figura 3.21: Aportaciones térmicas para distancias distintas

3.6.2. Precisión de las medidas

Cualquier tipo de medida puede presentar errores, la termografía infrarroja, por supuesto, no es una excepción. La precisión se relaciona con la proximidad entre los valores medidos, obtenidos y contrastados en mediciones repetidas sobre una misma superficie, bajo condiciones específicas de trabajo. En los documentos técnicos de cada fabricante se especifica una precisión en forma de porcentajes y grados centígrados, la temperatura medida puede variar desde la temperatura real al porcentaje mencionado. El estándar del sector actual está sobre precisiones de $\pm 2\% / \pm 2^\circ C$.

Este factor depende de la capacidad de la óptica implementada, parámetros del sensor como la NETD e incluso, del propio procedimiento llevado a cabo para recabar datos. Se tiene que subrayar que la precisión dada por los fabricantes suele estar referida a un cuerpo negro, obtenida en escenarios muy controlados como laboratorios de prueba. Por lo tanto, en la realidad de los experimentos no se suelen tener exactamente los valores marcados por la hoja de datos de la cámara.

3.6.3. Sensibilidad térmica

La sensibilidad de una cámara viene en gran parte definida por el transductor, expresando la mínima diferencia de temperatura que la cámara puede detectar. De esta forma, mientras mejor sea la sensibilidad térmica, menor será la diferencia de temperatura mínima que la cámara termográfica puede captar y resolver. La sensibilidad depende fundamentalmente del parámetro NETD, como se ha comentado anteriormente, es un factor relacionado con la SNR y suele expresarse en $^\circ C$ o mK. Este término ha sido ampliamente estudiado a lo largo de los años. Sin embargo, es necesario saber

cómo cuantifican los fabricantes de cámaras termográficas el valor real y práctico de esto. Al fin y al cabo, una cosa es el valor teórico dado por el transductor y otra muy diferente es el valor real de NETD que tiene un sistema final.

- Primero, se necesita estimar el ruido temporal de la cámara de forma empírica, calculado a partir de la desviación estándar por cada valor de píxel a lo largo de muchas muestras.
- En segundo lugar, hay que tomar distintas muestras sobre un buen radiador, preferiblemente un cuerpo negro y calcular la respuesta por grado a través de, por ejemplo, la media de sus valores.
- La división de estos dos términos expresada en miliKelvin expresa el resultado aproximado que se busca.

Se debe tener cuidado a la hora de estimar la NETD de una cámara, pues existe una fuerte dependencia con el ruido interno de esta. El ruido puede aumentar dependiendo de cómo se estabilice internamente la cámara, si el dispositivo se expone a una temperatura muy alta, por ejemplo, durante situaciones de extremo calor o gran influencia del sol.

3.6.3.1. Relación del número f de la óptica con el factor NETD

Los dispositivos no refrigerados requieren normalmente de una óptica relativamente rápida para un desempeño fiable. El número f de esta afecta a la cantidad de radiación absorbida, que tiene un resultado directo en el valor de la NETD. Cuando la intención es comparar de forma sencilla el rendimiento entre sistemas de imágenes térmicas con distintas ópticas, no es necesario recurrir a ecuaciones complejas como las referenciadas en [20]. Para estimar como afecta el cambio de relación focal al valor de sensibilidad térmica se suele normalizar esta a $f/1.0$. El proceso necesario se detalla en los pasos siguientes, adaptados de [31]:

1. Conocer el número f de la óptica que se utiliza en la cámara.
2. Estimar la NETD típica de la cámara con esa óptica.
3. El número f al que se debe normalizar el rendimiento de la cámara.

Se comienza asignando el valor de f a la variable X y el valor de la NETD a la variable Y . De esta manera, el valor normalizado Z puede calcularse como:

$$Z = \left(\frac{1,0}{X}\right)^2 \cdot Y \quad (3.12)$$

Por ejemplo, siguiendo (3.12) y suponiendo un NETD de 50 mK para una cámara termográfica con lente de $f/1.1$, el resultado que se obtiene es de 41 mK. Esto se traduce en que con esa óptica se tiene 1.2 veces menos sensibilidad térmica que la misma cámara con un objetivo de $f/1.0$. Esta es una forma de estimar la relación que existe entre una lente específica y el valor de sensibilidad de la cámara.

3.6.3.2. Consideraciones prácticas de la sensibilidad

Generalmente las cámaras termográficas vienen con más de un rango de medición de temperatura calibrado. El ruido de estas tiende a variar en función del rango de trabajo en el que se encuentre y también de la temperatura del objeto. Por supuesto, existen casos donde el factor de la NETD pueda no afectar tanto en la precisión de las medidas, esto es en las situaciones donde existe un buen contraste térmico o cuando la temperatura de la superficie estudiada sea mucho más alta que la temperatura de fondo. El contraste térmico se considera bueno cuando existen diferencias apreciables en la escena. No es exactamente una diferencia tan pequeña como la NETD, sino cuando se puede distinguir de forma clara el blanco estudiado respecto al fondo. Si toda la escena tiende al mismo valor de temperatura medio, la cámara distingue peor los matices. No obstante, al introducir una fuente radiante con mayor temperatura se aprecia un cambio en el resultado visual, los colores claros se superponen a los oscuros. Un ejemplo de esto queda referenciado en la figura 3.22.

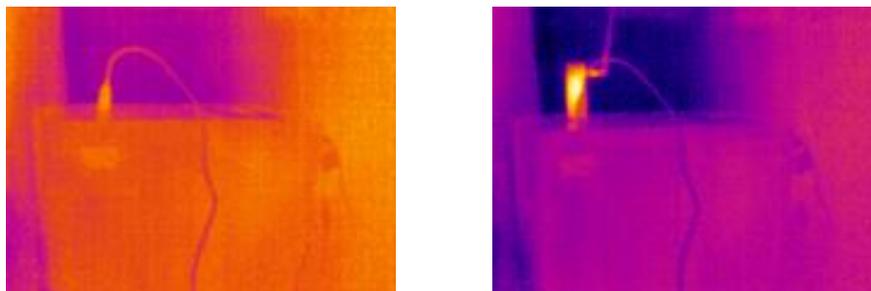


Figura 3.22: Poco contraste térmico frente un buen contraste térmico

El contraste térmico no solo se nota al introducir en una escena un buen radiador, como se aprecia en la figura 3.23 existen diferencias entre enfocar un determinado radiador frente a enfocar dos tipos distintos de radiadores. En ese caso la foto de la izquierda muestra una gama de naranjas para definir el radiador, mientras que el fondo permanece con un color muy frío. Sin embargo, al introducir un objeto más frío que el fondo en la escena, las tonalidades cambian. El color oscuro pasa al objeto frío mientras que el fondo se define con una tonalidad intermedia a ambos radiadores.

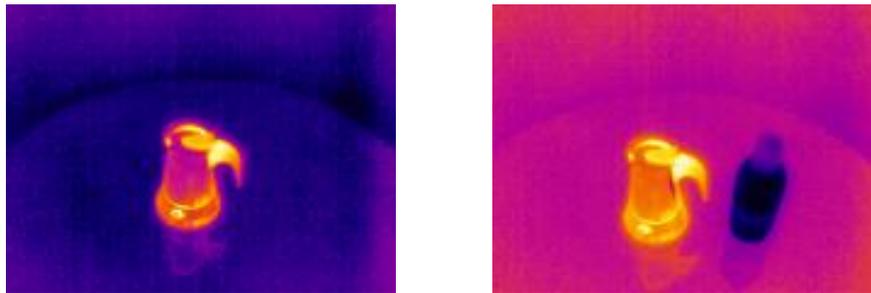


Figura 3.23: Diferencia de contraste entre radiadores

Otra manera de entender visualmente el factor sensibilidad es apoyar la palma de una mano sobre una superficie, en este ejemplo una pared, tal como se observa en la figura 3.24. Luego tomar distintas muestras a lo largo del tiempo para ver cómo evoluciona la captación de su huella térmica.



Figura 3.24: Modelo de mano para la comprobación de la sensibilidad

- Durante el primer minuto que la cámara enfoca a la huella térmica resultante (figura 3.25) se observa que se mantiene más o menos clara la silueta resaltada por el sensor, discerniendo de forma íntegra que existen diferencias de temperatura entre el lugar enfocado y el fondo.

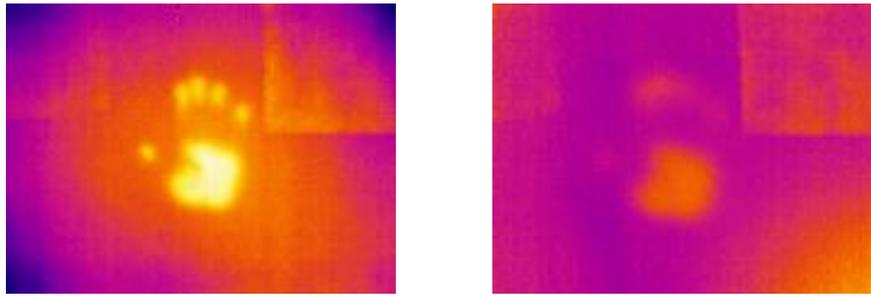


Figura 3.25: Izq: Huella térmica de la mano | Dcha: Misma huella a los 60 s

- Después de 2 minutos y medio (figura 3.26) la silueta de la huella térmica se va desvaneciendo, solo se distingue la palma de una mano. Incluso en la peor muestra la cámara sigue reconociendo una diferencia clara de temperatura.

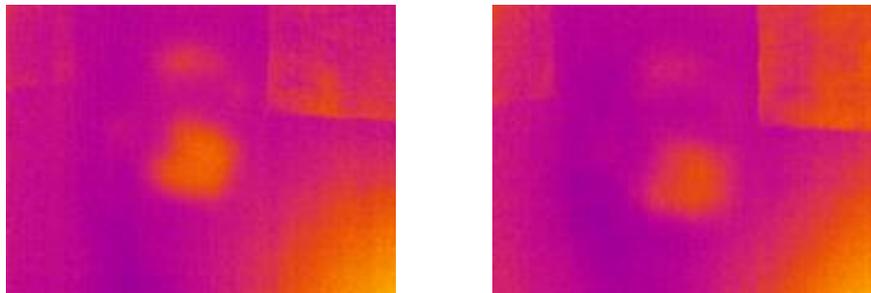


Figura 3.26: Izq: Huella térmica de la mano a los 90 s | Dcha: Misma huella a los 150 s

Una vez se alcance el momento donde la cámara sea incapaz de resolver que en el lugar enfocado exista un diferencial claro de temperatura, se puede establecer la cota límite de sensibilidad térmica. En definitiva, se obtiene visualmente cual es la mínima indicación para mostrar que ahí ha estado apoyada una mano y concluir que, a esa distancia, bajo las condiciones en las que se hizo el experimento, se alcanza la mínima sensibilidad térmica de la cámara.

3.7. Introducción al procesamiento de datos

La primera idea que se tiene que entender para poder explicar el funcionamiento de una cámara termográfica es la siguiente, estos dispositivos no son capaces de saber la temperatura de un objeto de forma directa. Una cámara termográfica, como se ha ido explicando en este trabajo, se basa en la captación de energía infrarroja de un blanco, esta energía se concentra en la óptica y se encamina al sensor. El transductor convierte

la energía IR en valores digitales binarizados, para que puedan ser leídos por la parte electrónica de la cámara. No obstante, es un hecho que, si se compra una cámara de este tipo, lo que se desea es que te muestre datos de temperatura sobre un blanco deseado. Por lo tanto, esta conversión tiene que ser hecha de forma software en la propia cámara.

Para este desglose se necesita tener en cuenta 3 consideraciones distintas: los modelos físicos actuales, la distribución del espectro y el modelo real implementado en la cámara.

Consideración 1 - Modelos físicos actuales

Para estimar la temperatura de un objeto a partir de su radiación térmica infrarroja uno suele basarse en dos modelos fundamentales. Por un lado, se tiene la ley de Planck (2.1), que describe la radiación emitida por un cuerpo negro en forma de potencia emisiva por unidad de área y longitud de onda, estando en función de λ y T . De la misma forma, la potencia emisiva hemisférica total se obtiene al integrar a través de todas las longitudes de onda esta ecuación y viene en función de la cuarta potencia de su temperatura. La ley de Stefan-Boltzmann (2.6) se especifica si se añade el factor de emisividad correspondiente a la superficie estudiada.

Consideración 2 - Distribución del espectro

El espectro electromagnético es dividido en una serie de intervalos de λ llamadas bandas. Con la finalidad de diversificar y concentrarse en un determinado campo de aplicaciones, las cámaras termográficas detectan solo una de estas bandas, incorporando filtros para eliminar las componentes residuales de las otras. Este es uno de los motivos por el que muchas medidas de termografía infrarroja tienden a basarse en la ley de Planck en vez de la ley de Stefan-Boltzmann.

Consideración 3 - Modelo implementado en la cámara

Este trabajo utiliza como base el modelo basado en los términos RBF [32], una aproximación semi-empírica para la ley de Planck. Básicamente discretiza todas las variables de la ecuación y obtiene una serie de valores proporcionales a través de diversos experimentos de calibración.

Para ver la relación entre estos dos modelos se toma como origen la ley de Planck añadiendo un término de emisividad (3.13). Todo lo que es constante en la ecuación de convierte en los términos C_1 y C_2 :

$$W_{b\lambda} = \varepsilon \cdot \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} (W/m^2) \quad (3.13)$$

El modelo sobre el que se trabajará representa la señal W_{obj} mediante los términos R, B y F, teniendo en cuenta la temperatura del objeto estudiado. Este flujo viene dado por la ecuación (3.14):

$$W_{obj} = \varepsilon \cdot \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{obj}}} - F} \quad (3.14)$$

En la práctica esta fórmula es mucho más sencilla de manejar por el usuario y por el procesamiento interno de la cámara. R es función del tiempo de integración y la longitud de onda, B depende solo de la longitud de onda y F es un factor positivo muy cercano a uno. De hecho, si se comparan (3.13) y (3.14) se ve claramente las similitudes entre ambas. Entonces, la temperatura que te daría una cámara con este modelo matemático introducido y teniendo en cuenta que el factor de emisividad ya está aplicado, se detalla en (3.15):

$$T = \frac{B}{\ln(\frac{R}{W} + F)} \quad (3.15)$$

La ventaja del uso de esta fórmula es que cuenta de forma intrínseca que el flujo ya ha sido binarizado por el conversor del sensor.

Capítulo 4

Estudio y caracterización de la Lepton

4.1. Introducción al módulo principal del sistema

La cámara termográfica Lepton, mostrada en la figura 4.1, es un sistema con prestaciones limitadas del fabricante FLIR, capaz de trabajar con radiación infrarroja de onda larga. Se considera un dispositivo radiométrico de muy sencilla implementación debido a su tamaño, bajo consumo y simple integración en dispositivos compactos, como pueden ser los teléfonos móviles o distintos sistemas embebidos. La justificación de este capítulo viene dada por la necesidad de conocer en profundidad cuáles son los distintos campos ajustables de la cámara y que parámetros son los que afectan a la medida del flujo radiométrico captado por esta. Con la intención de completar esta tarea se intentará proveer de unos ejemplos gráficos para entender mejor los conceptos tratados en el capítulo, así como distintas pruebas para respaldar las características dadas por el fabricante de la cámara. La mejora que implementa esta revisión respecto a modelos anteriores es su capacidad de estimar la temperatura equivalente de una escena mediante diversas operaciones software. De hecho, referenciar como trabaja la cámara con el flujo que le llega al sensor y su respectiva conversión a temperatura es en gran parte una meta de este capítulo.

4.1.1. Calibración por defecto de la cámara

De forma comercial la Lepton se vende con la ventaja de tener una salida radiométrica calibrada para cada uno de los píxeles activos del sensor [33], 19.200 en el caso de la Lepton 3.5 y 4.800 en el caso de la Lepton 2.5. Esta “calibración” se explica en

la ficha técnica correspondiente [34]. Básicamente se refiere a un tipo de ajuste que presenta la cámara por defecto, pudiéndose resumir en 4 puntos:

- El fabricante asegura unas medidas precisas para una emisividad en la escena del 100 % a una distancia próxima de la cámara, es decir, el cuerpo usado para la calibración se supone muy próximo al radiador ideal. En situaciones reales el factor emisividad no se mantiene de ninguna manera cercana a la unidad para todas las medidas, por lo que se tiene que aplicar factores de corrección a los parámetros relacionados con la radiación de la escena estudiada.
- Por parte del usuario se tiene que modelar la influencia de las señales no deseadas de fuentes distintas a la propia escena, que terminarán afectando en la precisión de los datos, sobre todo para distancias más largas.

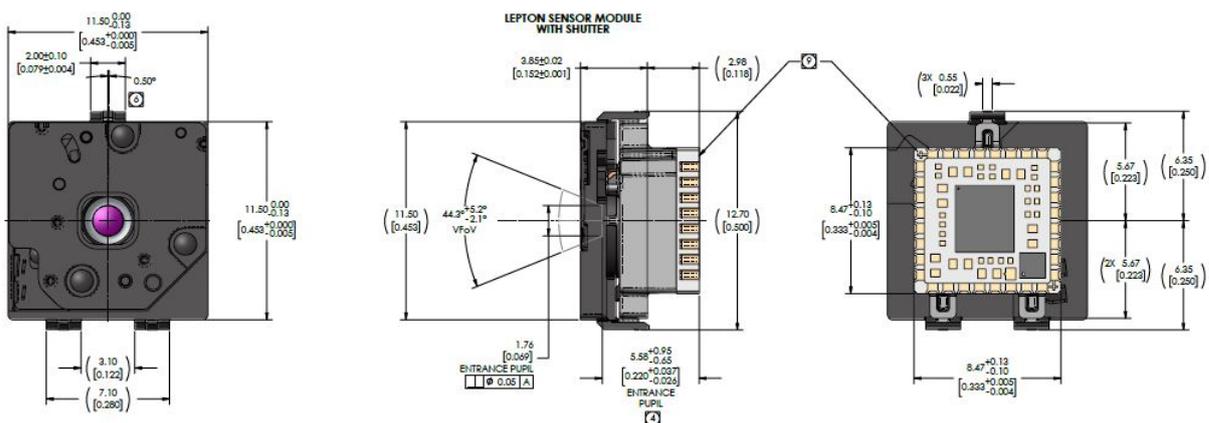


Figura 4.1: Esquema y dimensiones de la Lepton

- Por defecto, la ventana de transmisión atmosférica viene modelada con un 100 % de transmisividad. Esto es lo mismo que decir que no existe ninguna ventana, toda la energía fluye directamente hacia el sensor de la cámara sin pérdidas. Estas condiciones son propias de medidas muy cercanas al objetivo donde puede que los valores no necesiten ser totalmente precisos o las pérdidas atmosféricas puedan ser despreciadas. Para modelar bien la ventana de transmisión hay que considerar una transmisividad suficiente en la banda LWIR, este factor depende en gran medida del grado de humedad actual de la atmósfera o la concentración de gases como H₂O y CO₂.

- La temperatura de la ventana también tiene que ser caracterizada por el usuario, determinando la radiación adicional que se le introduce al sistema. En la práctica, se pueden compensar las medidas con la ayuda de un sensor de temperatura externo a la cámara o marcando un valor de temperatura concreto y luego relacionándolo con la temperatura de los sensores, incluido el del módulo Lepton.

4.2. Procesado de datos

En esta sección se pretende modelar y centralizar todos los procesos que se incluyen en la arquitectura de la cámara y que permiten captar, procesar y presentar datos térmicos al usuario. El funcionamiento simplificado de la cámara se observa en la figura 4.2, centrándose en el bloque “Procesamiento térmico de imágenes”. Es decir, las técnicas usadas por el fabricante para llevar un flujo de datos determinado a través de módulos software para su procesamiento y presentación. La Lepton 2.5 y 3.5 vienen configuradas de fábrica para presentar datos equivalentes a temperatura al usuario. Esto quiere decir que muchos de los ajustes hechos a la matriz de datos resultante son invisibles para el desarrollador, pero eso no significa que no puedan ser cambiados por este y guardados como los nuevos ajustes por defecto con el *Set User Defaults*, un modo que permite inicializar la cámara con los parámetros que el usuario considere oportunos para la aplicación deseada.

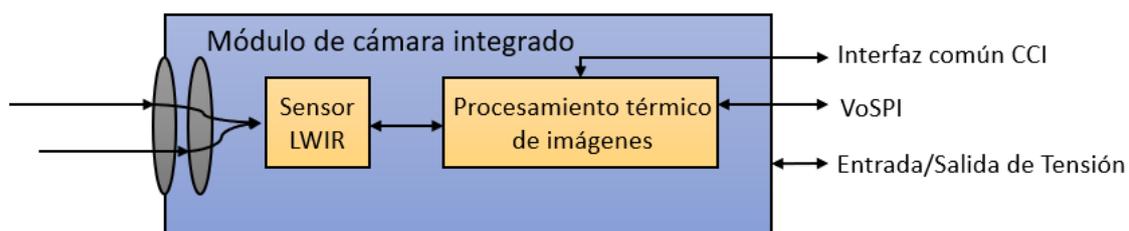


Figura 4.2: Diagrama de bloques simplificado del funcionamiento de la Lepton

El punto entonces es aclarar todos los posibles caminos que puede recorrer la señal, así como desactivar pasos que dificulten el visionado de los datos crudos que en este caso se busca. Lo primero es detallar cómo se especifica el pipeline de vídeo o imagen de la cámara. Como se observa en la figura anterior los datos crudos de la escena son captados por la cámara y pasan a su procesamiento interno, este proceso inicial se detalla en la figura 4.3, donde el pipeline de vídeo presenta una serie de niveles en el ajuste de

la señal. Los datos crudos de flujo pueden ser obtenidos sin necesidad de pasar por el AGC (*Automatic Gain Control*). Sin embargo, antes del paso por este, suceden unos ajustes que se deben tener en cuenta y que no pueden ser evitados:

- **NUC (*Non-Uniformity Correction*)**. Esta técnica aplica términos de corrección para asegurar una salida uniforme para cada píxel al tomar imágenes de una escena térmica. Para mejorar la precisión, la cámara mide la radiación infrarroja de su propia óptica y luego ajusta la imagen en base a esas lecturas. Este proceso ajusta la ganancia y el desplazamiento de cada píxel, produciendo una imagen de mayor calidad y precisión. Durante un NUC, el obturador de la cámara baja entre la óptica y el detector, haciendo un sonido de “clic”, congelando el flujo de imagen momentáneamente. El obturador actúa como una fuente de referencia plana para que el detector se calibre y se estabilice térmicamente. Para ajustar efectos no deseados, el NUC también aplica un término de compensación que puede actualizarse de forma continua mientras la cámara se está ejecutando, este término se llama FFC (*Flat Field Correction*) o corrección de campo plano.
- **Reemplazamiento de defectos**. Se procede a la sustitución de los píxeles identificados como defectuosos durante la calibración de la cámara o durante su tiempo de ejecución. Es básicamente un algoritmo que evalúa los píxeles vecinos y calcula un valor de reemplazo óptimo.
- **Filtrado espacial/temporal**. Incluye toda la serie de filtros diseñados para mejorar la relación señal/ruido eliminando el ruido temporal y la no uniformidad restante de aplicar los dos campos anteriormente nombrados.

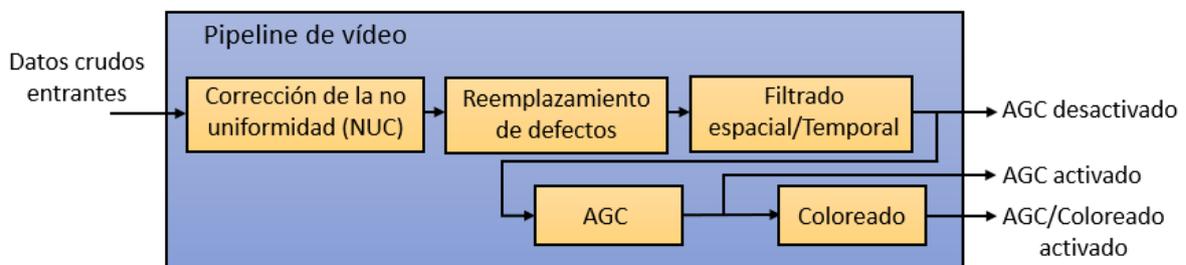


Figura 4.3: Diagrama de bloques del pipeline de vídeo

Tanto el AGC como el coloreado serán explicados en el punto siguiente, debido a que son las últimas etapas de la salida de vídeo que pueden ser aplicadas a la señal. No obstante, entre medias existen modos de interés que tienen que ser explicados, pues muchos de ellos cambian el modo de procesar la señal térmica.

Actualmente la Lepton 2.5 y 3.5 proporcionan una serie de configuraciones para modificar la salida de la imagen [35]. Entre los más importantes se encuentran los modos de radiometría y ganancia, aunque se hace especial mención a los modos FFC y distintos formatos de salida de vídeo. Para poder cambiar estos modos y sus respectivos campos se necesita hacer uso del CCI (*Command and Control Interface*), un protocolo que facilita una interfaz de comunicación con la cámara. Con esto se puede cambiar el valor de los campos de la Lepton y solicitar su estado actual.

4.2.1. Modos FFC

En el apartado anterior se explicó el concepto del NUC, este aplica un determinado *offset* que puede ser actualizado periódicamente por el FFC. FLIR asegura que su cámara está calibrada de fábrica para objetivos cercanos y que produce una imagen bastante uniforme. Sin embargo, pueden originarse problemas con las imágenes captadas, principalmente debido a efectos bruscos de movimiento a lo largo del tiempo (figura 4.4). Este modo aplica la corrección oportuna para estos casos, existiendo tres configuraciones posibles: externa, manual y automática. El modo predefinido es el automático, ejecuta el *offset* después de 3 minutos o si la temperatura interna de la cámara experimenta cambios, por defecto, de 1.5 °C.

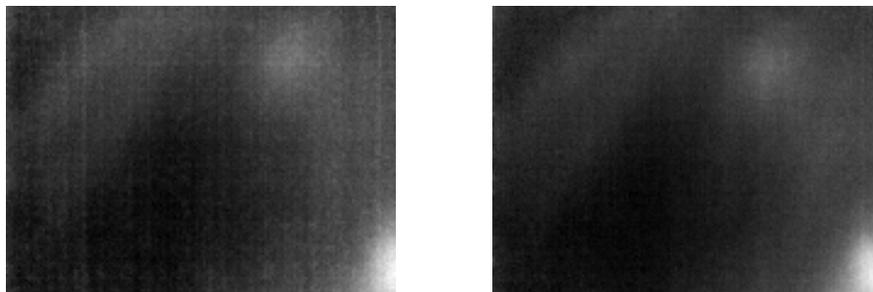


Figura 4.4: Izq: Sin aplicar FFC | Dcha: Aplicando FFC

Se observa que en la imagen izquierda de la figura anterior aparecen unas rayas verticales, esto es resultado de un determinado tipo de ruido espacial que afecta también

a la información resultante de la matriz de datos. Es posible compensar este efecto aplicando la corrección del FFC.

4.2.2. Modos radiometría

Se podría decir que es el modo de interés que prima sobre los otros. En esta revisión de la cámara se han implementado, por primera vez en la familia Lepton, herramientas software para la conversión de datos crudos a temperatura. Sin embargo, para poder entender en qué consisten estos cambios se debe tener en cuenta que probablemente el resultado es una estimación de temperatura, más que datos verídicos al 100 %. Existen dos modos de radiometría que afectan a la salida de la señal de vídeo, más concretamente a la matriz de datos que se le presenta al usuario. Pero antes de proceder con dichos modos, se necesita entender la base principal sobre la que se sustentan, esta tiene su origen en el flujo total que le llega al sensor.

4.2.2.1. Flujo total incidente en el sensor de la cámara

La Lepton utiliza un modelo similar a la cámara termográfica Tau 2 de FLIR [36], siendo el flujo total que le llega al sensor el que se muestra en la figura 4.5 y en la ecuación (4.1). En este modelo se aprecian todos los parámetros que intervienen en la captación del flujo, por lo tanto, es posible a través de este aplicar los términos de corrección pertinentes.

El flujo S que incide sobre el sensor de la cámara se modela con la siguiente ecuación:

$$S = \tau_{Win} \cdot \{(\tau_{atm} \cdot [\varepsilon \cdot W(T_{obj}) + (1 - \varepsilon) \cdot W(T_{amb})] + (1 - \tau_{atm}) \cdot W(T_{atm}))\} + r_{Win} \cdot W(T_{refl}) + (1 - \tau_{Win} - r_{Win}) \cdot W(T_{Win}) \quad (4.1)$$

Donde:

- ε = emisividad de la escena estudiada.
- $W(T_{obj})$ = flujo del objeto/escena estudiada por la cámara.
- $W(T_{amb})$ = flujo debido a la temperatura de fondo de la escena o temperatura ambiente.

- $W(T_{Win})$ = flujo debido a la temperatura que conforma la ventana.
- τ_{Win} = coeficiente de transmisividad de la ventana de transmisión.
- $W(T_{atm})$ = flujo debido a la temperatura de la atmósfera.
- τ_{atm} = coeficiente de transmisividad de la atmósfera.
- $W(T_{refl})$ = flujo debido a la temperatura reflejada en la ventana de transmisión.
- r_{Win} = coeficiente de reflectividad de la ventana de transmisión.

El concepto nuevo de “ventana” es introducido en este modelo respecto al comentado en el capítulo 2 de este trabajo. Lo que detalla es en esencia que existirán situaciones donde se necesite resguardar la cámara con una cubierta protectora. Ese recubrimiento necesitará de una ventana de infrarrojos para que la radiación pase a través de ella hacia la óptica, por esto se le asigna su propia transmisividad y temperatura.

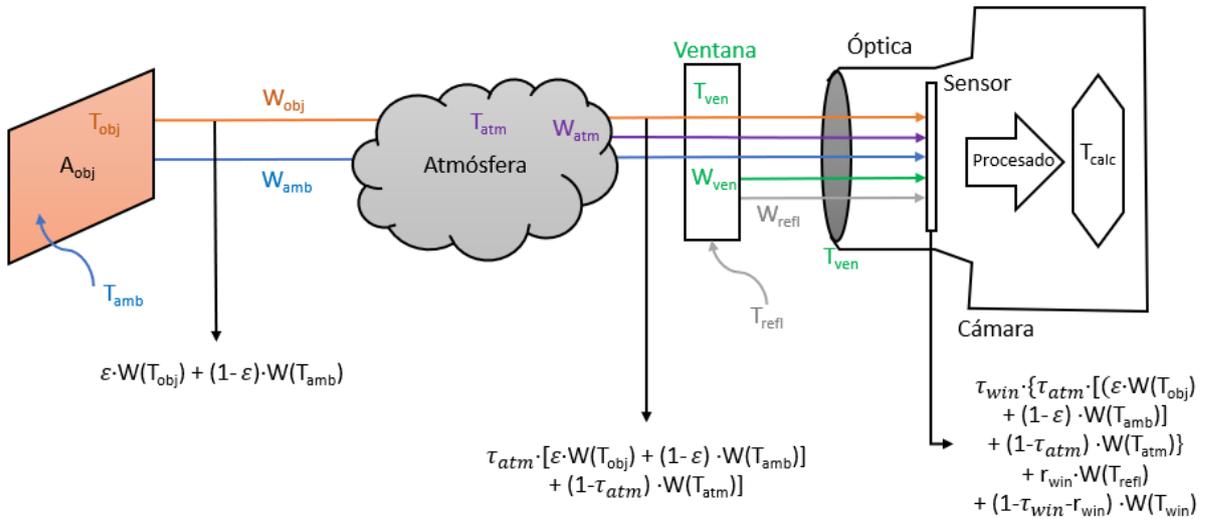


Figura 4.5: Flujo total recibido por el sensor de la Lepton

4.2.2.2. Radiometría desactivada

La respuesta del sensor, que se define como el cambio en el valor de salida de píxeles frente un cambio en la temperatura de la escena, varía según el rango de temperatura de funcionamiento de la cámara. Este modo no es recomendable por FLIR si lo que quiere el usuario es tomar muestras para calcular la temperatura de una escena, básicamente no proporciona datos radiométricos compatibles.

4.2.2.3. Radiometría activada

Este modo tiene en cuenta el flujo electromagnético incidente frente la salida de cada píxel, es decir, modela la función de transferencia entre ambos. Con este modo activado el fabricante asegura un nivel de señal a la salida indiferente de la propia temperatura de la cámara. De esta manera, la salida del píxel es en su mayoría dependiente de la radiación del entorno evaluado, mientras que la respuesta es en este caso independiente de la temperatura de la cámara. Para aplicaciones relacionadas con la medida de temperaturas este modo tiene que estar activado, teniendo acceso a la calibración y características software como el TLinear y Spotmeter:

- **TLinear.** Habilitar el comando TLinear convierte el valor de flujo a la salida del píxel, codificado en 14 bits, en un valor de temperatura, medido en grados Kelvin con un factor de escala x100 o x10 dependiendo de la resolución especificada. La cámara viene con el modo radiometría y TLinear activados de fábrica. En un apartado posterior están recogidos las diferencias entre activar o no este campo.
- **Spotmeter.** Este campo devuelve la media, máximo y mínimo de temperatura leída en Kelvin para un píxel dado, vía CCI o telemetría. Bastante útil para aplicaciones donde se puedan superponer estos datos a la propia imagen sacada por la cámara.

La pregunta que toca responder ahora trata sobre las ecuaciones que modelan la conversión de flujo electromagnético a temperatura. Tanto la Lepton radiométrica como otras cámaras termográficas de FLIR no aplican de forma estricta las fórmulas de Planck o Stefan-Boltzmann recogidas en capítulos previos de este trabajo. Actualmente se implementa una herramienta derivada de los términos RBF comentados en el capítulo anterior, al que se les ha añadido un *offset* O [34]. Estos nuevos términos, los RBFO, son calibrados de forma semi-empírica en laboratorios, con la capacidad de ser leídos y modificados mediante el SDK (*Software Development Kit*) que proporciona el fabricante, permitiendo así aproximar un nivel de flujo S a una determinada temperatura. En definitiva, los parámetros RBFO son los que modelan la función de transferencia que convierten datos crudos en temperatura.

De esta manera, la temperatura para cada píxel de la cámara se estima vía RBFO mediante la ecuación (4.2):

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{W-O} + F\right)} \quad (4.2)$$

El comando TLinear comentado anteriormente existe para este propósito, es la herramienta que modela la interacción de estos efectos con el flujo. Cabe destacar que aplica una serie de términos calibrados de fábrica, estos valores son recogidos y referenciados en la tabla 4.5. No obstante, este comando va un paso más allá, lo que en realidad hace es despejar del flujo total S el equivalente al flujo de la escena u objeto estudiado W_{obj} , obteniendo como resultado la ecuación (4.3):

$$W_{obj} = \frac{((((S - d - c)/\tau_{Win}) - b)/\tau_{atm}) - a}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

De tal forma que:

- $a = (1 - \varepsilon) \cdot W(T_{amb})$
- $b = (1 - \tau_{atm}) \cdot W(T_{atm})$
- $c = (1 - \tau_{Win} - r_{win}) \cdot W(T_{Win})$
- $d = r_{Win} \cdot W(T_{refl})$

En este caso, la temperatura correcta que te da la cámara es T_{obj} , es decir:

$$T_{obj} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{W_{obj}-O} + F\right)} \quad (4.4)$$

Esto permite despejar el flujo binarizado invirtiendo la ecuación de la siguiente manera:

$$W(T_{obj}) = \frac{R}{e^{\left(\frac{B}{T_{obj}}\right)} - F} + O \quad (4.5)$$

Se debe tener en cuenta que FLIR especifica que los términos RBFO solo deben ser aplicados a los datos resultantes teniendo el modo radiometría activado, tal como se detalla en su hoja de características. En el apartado 4.3 se muestra una tabla donde se referencia la importancia de no aplicar estos términos a los datos captados por la cámara si se desactiva este modo.

A continuación, se muestran una serie de medidas hechas por el proyectando para comprobar cómo funcionan los distintos modos de radiometría. Se han dispuesto 3 vasos de cristal con agua a distinta temperatura (figura 4.6), no para tomar datos del agua en sí, sino para ver el cambio en los contrastes de cada vaso. De forma teórica, el vaso a temperatura ambiente será transparente para la cámara, pues el cristal deja pasar la luz visible, pero actúa como una barrera para el infrarrojo. Sin embargo, por muy bueno que sea el aislamiento de este calor, los vasos que contienen agua fría y agua caliente aparecerán caracterizados en la imagen con un color cercano al negro y al blanco respectivamente, por el tiempo de exposición a la propia agua. A las imágenes representadas a continuación se les ha aplicado el código del AGC lineal planteado en el Listing 4.2, para mejorar el resultado visual de estas ante el ojo humano.

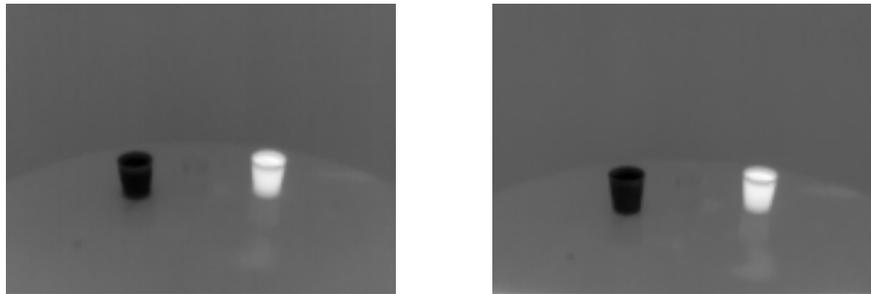


Figura 4.6: Izq: Radiometría activada | Dcha: Radiometría desactivada

Tal y como dice el fabricante ambos modos tienen un rendimiento similar, por lo menos, se observa que las imágenes son exactamente iguales. No obstante, al procesar la matriz de datos si se notan las diferencias. En la figura 4.7 se han dibujado diferentes rectángulos para evaluar los datos resultantes de integrar esos valores. De la misma forma, FLIR proporciona dos gráficas que muestran el comportamiento de estos modos bajo distintas condiciones de temperatura [35]. Si bien no son una base 100% representativa, deberían ser de utilidad, pues los cambios en la temperatura interna de la cámara no se producen con brusquedad en el experimento planteado. De esta forma, se aprovecharán para reforzar los resultados de esta medida.

Los valores que se han registrado en esta prueba quedan reflejados en la tabla 4.1, estando dentro de lo esperado según las herramientas dadas por el fabricante. Este experimento ha sido realizado en un entorno relativamente cerrado, con una temperatura ambiente de entre 19 °C-22 °C y a una distancia bastante cercana a las muestras. De

la misma forma, si se hicieran consecutivos experimentos en un entorno mucho más controlado, se podría estimar la temperatura interna de la cámara, si es que eso aporta algún dato interesante para la aplicación deseada.

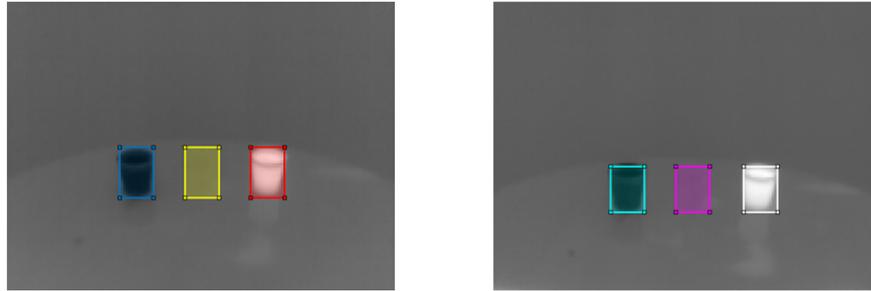


Figura 4.7: Izq: Radiometría activada (ROI) | Dcha: Radiometría desactivada (ROI)

Con el código del Listing 4.1 se dibuja un ROI (*Region Of Interest*), se extraen las coordenadas y se consiguen valores correspondientes a estas coordenadas.

Listing 4.1: Código del ROI rectangular en MATLAB

```

1  %Se importan las imagenes tomadas
2  imR = imread("VasoRadOFF.png");
3  imRL = AGC(imR);
4  imC = imread("VasoCrudo.png");
5  imCL = AGC(imC);
6
7  %Se muestra primero la imagen post-AGC para tomar las coordenadas XY
8  imshow(imCL)
9  %Se dibuja el rectangulo y se extraen sus vertices
10 r = drawrectangle('Color','r');
11 pos = get(r, 'Vertices');
12
13 %Se guardan las posiciones de los vertices y crea la matriz N2
14 initCol = round(min(pos(1:end,1)));
15 endCol = round(max(pos(1:end,1)));
16 initRow = round(min(pos(1:end,2)));
17 endRow = round(max(pos(1:end,2)));
18
19 %Con las coordenadas de antes se inicia una nueva matriz
20 %tomando como base la imagen pre-AGC
21 N2 = imCL(initRow:endRow, initCol:endCol)
22 N2mean = mean(mean(N2))

```

| Salidas | Datos integrados (media) | | |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|
| | Zona fría | Zona temperatura ambiente | Zona caliente |
| Radiometría activada | 2564 | 2946 | 3556 |
| Radiometría desactivada | 3539 | 3784 | 4141 |

Tabla 4.1: Resultados de la integración del ROI

4.2.3. Modos de ganancia programables

Una cualidad interesante de la cámara es su capacidad para cambiar el nivel de ganancia, esto implica un cambio en su rango dinámico de trabajo. Se pueden distinguir entre tres configuraciones: ganancia alta, baja y automática. Un ejemplo ilustrativo y práctico de cómo cambian las medidas según los modos de ganancia queda referenciado en el apartado 4.3.2.

- **Alta.** Es la configuración por defecto que tiene la cámara. Su uso deriva en un NETD bajo, es decir una mayor calidad en las medidas y un rango dinámico de la escena bajo (mínimo valor detectable en escena de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximo valor detectable en escena de $140\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uno de los factores de calidad es su precisión radiométrica, que se estima sobre $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 5% .
- **Baja.** Usada para tomar medidas que impliquen un mayor rango de temperaturas de trabajo, puede ser seleccionada en cualquier momento por el usuario. Su uso deriva en un NETD alto y un rango dinámico de la escena alto (mínimo valor detectable en escena de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximo valor detectable en escena de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este modo tiene una peor respuesta porque su precisión radiométrica se estima sobre $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 10% . Por otro lado, el flujo captado por el sensor es aproximadamente $1/3$ del que se esperaría con el modo de ganancia alta. Por ejemplo, si en ganancia alta se referencian valores de 3600-3700 observando la piel humana, en ganancia baja estos valores oscilan sobre los 1200. Con este ajuste se comprimen los valores de entrada para aumentar el rango de trabajo de la cámara y así poder llegar a resolver mayores temperaturas, supliendo de esta manera la limitada capacidad del conversor.
- **Automática.** Funciona con modo radiometría activado y FFC en automático, cambia de forma dinámica dependiendo del entorno donde se encuentre.

4.2.4. Modos AGC - Control automático de ganancia

El AGC es una técnica que convierte el amplio rango dinámico del sensor infrarrojo a uno que sea más apropiado para mostrar al usuario, esto es una conversión de 14 bits a 8 bits [37]. En otras palabras, la salida de vídeo es mostrada en una escala de 0 a 255 en vez de utilizar toda la resolución del sensor, lo que significa que deben usarse ciertos algoritmos de compresión para conseguir datos en un formato de estas características. La Lepton distingue dos políticas distintas de AGC, la conversión lineal y el HEQ (*Histogram Equalization*), este segundo basado en histogramas. Este modo es principalmente usado para conseguir una mejor presentación de datos final al usuario.

En situaciones donde solo la medida térmica es necesaria se recomienda usar el modo radiometría con el AGC desactivado, de lo contrario las diferencias quedan oscurecidas por el propio algoritmo de procesado [35]. A continuación, se pretende explicar los conceptos básicos detrás del control automático de ganancia, su definición y las conversiones en las que se basa.

4.2.4.1. AGC lineal

El primero de ellos actúa como una conversión lineal de 14 bits a 8 bits para así mejorar el contraste del blanco estudiado con la escena y posibilitar una mejor lectura visual de los datos. La mayoría de los píxeles son mapeados como negros o blancos, con poco uso de capas de grises en medio. Todo AGC lineal sigue el arquetipo de $y = mx + b$ [38], una aproximación de esta conversión (parecido a lo que hace el comando *imtool* de MATLAB) puede ser modelada como:

Listing 4.2: Ejemplo de conversión lineal en MATLAB

```
1   frame = double(IRframe);
2   minVal = min(min(frame));
3   maxVal = max(max(frame));
4   count = max(maxVal - minVal, 1);
5
6   % ajuste al rango de 255 bits
7   for x = 1:length(frame)
8       conversion = uint8((frame - minVal) * (255 / count));
9   end
```

Los resultados de aplicar este código sobre una imagen de amplio rango dinámico son los siguientes:

1. En primer lugar, se ha probado esta aproximación en una imagen tomada desde la Lepton a una distancia cercana. Como puede observarse, la imagen de la izquierda tiene muy poco contraste, siendo los datos de la matriz proporcionales a temperatura en formato de Kelvin x100.

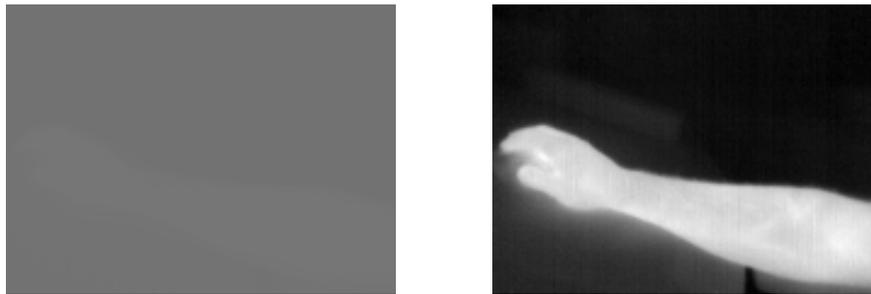


Figura 4.8: Izq: Visual de la imagen térmica | Dcha: Misma imagen aplicando el AGC

2. Por otro lado, se ha probado este mismo código en una imagen con aún menos contraste. Los datos de la matriz representan flujo binarizado, el crudo que presenta la cámara al usuario.

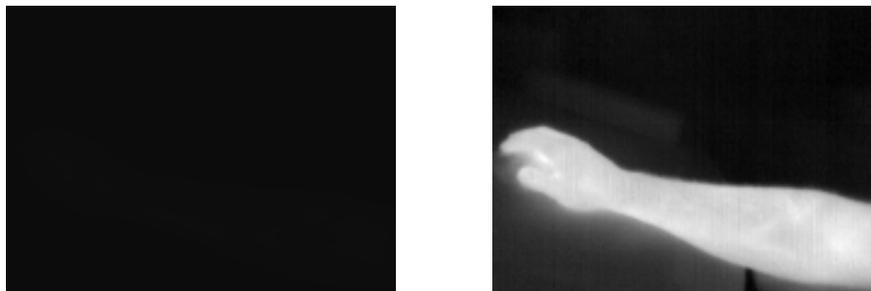


Figura 4.9: Izq: Visual de los datos de flujo | Dcha: Misma imagen aplicando el AGC

A lo largo del este proyecto se ha decidido optar por el AGC lineal para la presentación visual de resultados, debido a su simpleza y flexibilidad para implementarse en código. En otras palabras, como se controla de forma precisa la conversión de 16 a 8 bits existe la posibilidad de:

- Transformar la escena de poco contraste en una imagen radiométrica visible.
- Tomar los puntos de interés de la matriz, principalmente las coordenadas XY.

- Llevarlas a la matriz original y obtener los valores correspondientes a esas coordenadas.

Un ejemplo de este proceso es el mostrado en el Listing 4.1 referenciado anteriormente.

4.2.4.2. Ecualización de histograma

Esta política está basada esencialmente en un histograma, es decir, una clasificación de valores de píxeles según su respectiva intensidad, lo que significa en este caso que un valor de bit es mayor al aumentar el contenido radiométrico del píxel. Los algoritmos de ecualización de histogramas clásicos utilizan funciones de mapeo donde gran parte de los tonos grises van a aquellas regiones ocupadas por la mayoría de los píxeles. Un ejemplo aportado por el fabricante queda representado en la figura 4.10. En comparación con el AGC lineal, el histograma hace uso eficiente de los tonos grises disponibles. Sin embargo, este tipo de técnica tiene desventajas, como la falta de contraste del blanco estudiado en contraposición a un fondo mucho más frío o caliente que este.

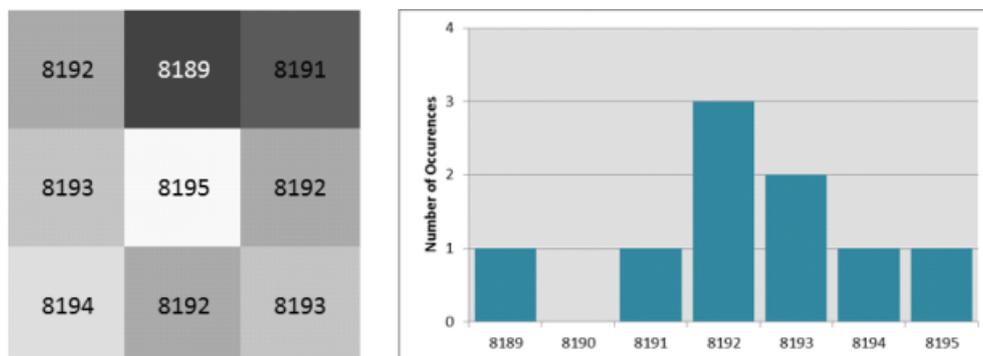


Figura 4.10: Número de ocurrencias y peso de estas (3x3). Imagen sacada de [35]

En el caso de la conversión lineal, como ya se ha demostrado, se pueden hacer diversas aproximaciones para este método, pero una vez conocido el algoritmo se entiende que es lo que ocurre con los datos radiométricos. Sin embargo, no queda tan claro con el HEQ de FLIR, al estar basado en un histograma está sujeto a otros métodos de procesado, no se sabe con certeza que es lo que ocurre con los datos crudos o térmicos una vez aplicado este algoritmo.

Esto no quiere decir que no se pueda implementar el HEQ de forma correcta y obtener datos de temperatura o flujo. La cuestión radica en tener un buen manejo

del SDK y del comando Spotmeter, nombrado en el modo radiometría. El Spotmeter da una serie de valores que se pueden usar para completar la imagen resultante de aplicar la conversión HEQ, consiguiendo un buen resultado visual y datos de interés. Un ejemplo del resultado dado al aplicar este algoritmo se muestra en la figura 4.11, donde se distinguen tonos grises para modelar los distintos matices térmicos.



Figura 4.11: HEQ aplicado a la muestra anterior

4.2.5. Modos y control de la salida de vídeo

Solo queda hablar de las distintas salidas de vídeo proporcionadas por la cámara, que estarán claramente influenciadas por el AGC. Existen dos posibles, el “Raw14” y “RGB888”. El primer modo puede alternar con 3 variantes:

- Muestra un formato de 14 bits de datos (en realidad son 16, pero dos de los bits están a “0”), teniendo el AGC deshabilitado. Esto es lo que FLIR llama “crudo” de la imagen.
- Muestra un formato de 16 bits (todos los bits a “1”).
- Muestra un formato de 8-bits, con el AGC funcionando.

El segundo modo es una forma de mostrar los datos con una paleta de colores, 24 bits de datos RGB (8 bits x 3 dimensiones, es decir, aplicando AGC), generando un falso color que convierte cada valor de la escala de grises en un color específico.

En la tabla 4.2 se observan las salidas de vídeo que serán de interés para distintas aplicaciones. Con el nombre de “útil” se clasifican aquellos modos que muestran el crudo que recibe la cámara y su valor correspondiente a temperatura, mientras que

“estético” establece aquellos modos que convierten el crudo en una imagen más fácil de visualizar, pero que no poseen datos interesantes para el estudio radiométrico.

| Modos de salida de Vídeo | útil | estético |
|---|------|----------|
| Raw14 (TLinear desactivado AGC desactivado) | ✓ | x |
| Raw16 (TLinear activado AGC desactivado) | ✓ | x |
| Raw8 (AGC activado) | x | ✓ |
| RGB24 (AGC activado Salida coloreada) | x | ✓ |

Tabla 4.2: Salidas de vídeo de la Lepton

Existen muchas maneras de afrontar una presentación de datos final para el usuario. La idea más general que se suele tener de una imagen térmica es la de un color anaranjado, por ejemplo, la que se referencia en la figura 4.12. Aunque el nivel de brillo de la imagen pueda ser más o menos equivalente a un nivel de carga térmica, el formato es representado en RGB. Por ello, si se observa su matriz de valores no aparecerán los datos térmicos correspondientes al blanco o superficie estudiada.

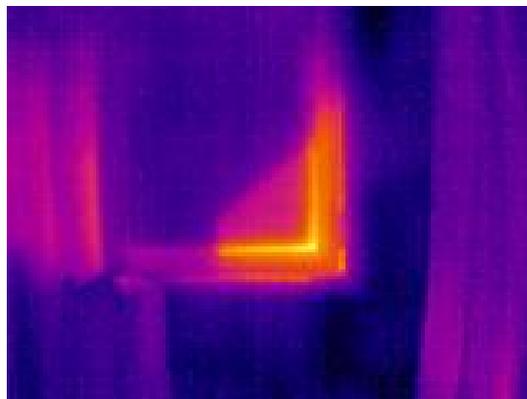


Figura 4.12: Coloreado de una imagen post-HEQ

Por otro lado, es posible que una representación más fiel a la temperatura sea algo con muy poco contraste, como lo representado en la izquierda de la figura 4.8. La diferencia visual es muy notoria, esto es debido al amplio rango dinámico que tiene la imagen. Normalmente el rango de valores de temperatura se codifica con 16 bits, este amplio espectro dificulta la visualización de imágenes, por ello muchas veces se transforman para una mejor observación.

En muchas ocasiones lo que quiere el usuario final es una representación visual y legible de una escena, en la mayoría de los casos con datos de temperatura capaces de ser mostrados en una pantalla, como se visualiza en la figura 4.13. Una forma sencilla de hacer esto es elaborar rutinas que muestren valores de temperatura correspondientes a la matriz sin procesar, mientras que la escena es una imagen ya convertida a RGB, UYVY o a cualquier otro formato fácil de leer. Por ejemplo, aplicando un AGC simple y presentando los valores máximos y mínimos registrados por la cámara.

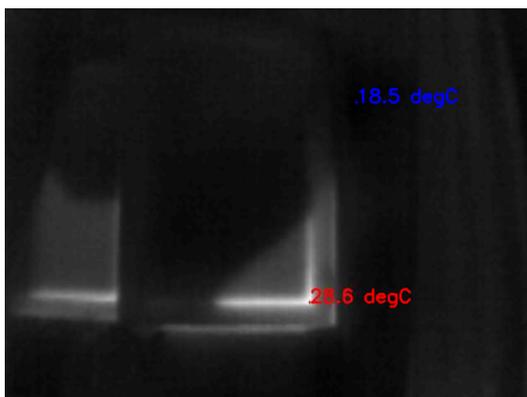


Figura 4.13: Presentación de máximos y mínimos después del AGC lineal

4.3. Control de radiometría y ganancia

Una vez comprendidos los distintos campos y técnicas internas de la cámara, se evaluará la posibilidad de implementar manualmente estos procedimientos. El argumento detrás tiene como base que en muchas plataformas no se dispone de un SDK apto para el ajuste de estos campos. Sin embargo, existe la posibilidad de usar herramientas de código abierto para llegar a la misma solución, de esta manera, se obtendrá a un sistema final mucho más flexible. El uso principal de estas herramientas queda referenciado en el anexo II y III de este trabajo, donde se integra la cámara en un sistema Linux sin el SDK que proporciona FLIR.

Esta sección tiene como objetivo comprobar la veracidad de la función de transferencia que transforma un flujo electromagnético determinado en una lectura equivalente de temperatura. Como se ha nombrado en el apartado correspondiente, esto se hace a través de los términos RBFO que proporciona el fabricante, que pueden ser obtenidos o

cambiados por el usuario. En este caso los términos serán implementados manualmente en MATLAB y Python, utilizando las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5) para el procesamiento del flujo.

Por defecto, la cámara almacena los siguientes parámetros: R con escala x1 y BFO con escala x1000. Estos términos han sido calibrados por FLIR previamente y se inicializan por defecto siempre que se enciende la cámara [39].

- RBFO ganancia alta.

$$R = 355178, B = 1435000, F = 1000, O = 390474.$$

- RBFO ganancia baja.

$$R = 102000, B = 1470000, F = 1000, O = 362643.$$

De la misma manera que se puede calibrar la cámara teniendo en cuenta los parámetros del flujo, también existe la posibilidad de hacerlo con los términos RBFO. Teniendo un medidor de respaldo para poder tomar datos externos a la Lepton y fijando los términos F y B, se puede encontrar un R y O que mejoren la precisión de las medidas, dependiendo del método de calibración elegido. Los valores F y B son típicamente establecidos como 1 (salvo para mediciones de una gran temperatura fuera del rango dinámico de la cámara) y 1428. Se recuerda que los términos RBFO son expresamente diseñados para los datos de flujo que son captados por la cámara, teniendo activado el modo radiometría. De hecho, cuando se desactiva el modo radiometría en la Lepton con la ayuda del SDK, el TLinear se desactiva automáticamente. Por otro lado, si se activa el TLinear, también se activa el modo radiometría de forma automática.

En la tabla 4.3 están recogidas unas muestras de lo que ocurre si se aplica la ecuación (4.4) con los términos de ganancia alta en el área integrada de la figura 4.7.

| | Datos integrados (media) | | |
|---|--------------------------|---------------------------|---------------|
| | Zona fría | Zona temperatura ambiente | Zona caliente |
| Radiometría activada ($^{\circ}C$) | 8.18 | 17.4 | 30.33 |
| Radiometría desactivada ($^{\circ}C$) | 30.09 | 34.92 | 41.57 |

Tabla 4.3: Resultados de la integración de los rectángulos - Temperatura

Respecto a la tabla anterior, el objetivo no es establecer con exactitud la temperatura de los objetos estudiados, sino más bien corroborar la fidelidad de los datos con respecto a su valor real. Tomando el crudo dado por la primera fila de datos de la tabla anterior se tienen unos resultados relativamente válidos. Sin embargo, para la segunda fila de datos esto no ocurre, la temperatura de la zona fría de la imagen no se corresponde a una temperatura de 30 °C, referenciando esto a un vaso de agua fría, lo mismo pasa con la temperatura ambiente, que en el momento de la medida no llegaba a los 35 °C.

4.3.1. Influencia de la emisividad en las medidas

Con los entornos de programación nombrados se pretende hacer un pequeño experimento sobre la temperatura de la piel humana, que teóricamente se encuentra sobre los 33-36 °C. Esto se hace a partir del flujo captado por la cámara en dos muestras distintas, una en modo ganancia alta y otra en ganancia baja, acto seguido se utilizan las ecuaciones implementadas para transformar estos datos en temperatura. El primer tema que se quiere tratar es la comparación entre la temperatura tomada directamente por la cámara frente a la conversión manual hecha por uno mismo, que en principio debería mostrar resultados similares. Para que sea más sencillo, se aplica la media a cada matriz y se comparan, tal como se referencia en la tabla 4.4.

| | Ganancia Alta | | Ganancia baja | |
|------------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | Medida de la cámara | Conversión | Medida de la cámara | Conversión |
| Flujo binarizado | 3376 | 26.56 °C | 1101 | 24.68 °C |
| Temperatura | 27.28 °C | 3410 | 25.95 °C | 1117 |

Tabla 4.4: Resultados de medidas sobre la piel humana

Como se puede comprobar en los resultados anteriores, apenas hay una diferencia de 1-2 °C respecto a las medidas que facilita la cámara al tomar una foto. Esto es debido porque la toma fue hecha de forma poco precisa y sin soporte fijo. Por lo tanto, hay ciertos cambios debido a la posición relativa y al movimiento de la cámara después de cada captación de datos. Del mismo modo, se tiene acceso a un campo llamado *Flux Linear Parameters* que modelan los parámetros de flujo externos a la cámara termográfica, previamente nombrados en el capítulo correspondiente de este trabajo.

Por defecto, el parámetro de emisividad está dispuesto en su máximo valor (tabla 4.5), es decir, emula la emisividad que tendría un cuerpo negro. La emisividad de un cuerpo negro es 1 y está binarizado con el valor 8192, sin embargo, la emisividad de la piel es de aproximadamente 0.97 (7946 si se aplica una regla de tres).

| Parámetros | Rango de valores | Unidades | Factor de escala Valor por defecto |
|-----------------|------------------|------------|--------------------------------------|
| sceneEmissivity | 82 - 8192 | Porcentaje | 8192/100 (8192 = 100 %) |
| TBkgK | 0 - 65535 | Kelvin | 100 (29515 = 295.15 K) |
| tauWindow | 82 - 8192 | Porcentaje | 8192/100 (8192 = 100 %) |
| TWindowK | 0 - 65535 | Kelvin | 100 (29515 = 295.15 K) |
| tauAtm | 82 - 8192 | Porcentaje | 8192/100 (8192 = 100 %) |
| TAtmK | 0 - 65535 | Kelvin | 100 (29515 = 295.15 K) |
| reflWindow | 0 - 8192 | Porcentaje | 8192/100 (8192 = 100 %) |
| TRefK | 0 - 65535 | Kelvin | 100 (29515 = 295.15 K) |

Tabla 4.5: Parámetros de flujo de la Lepton

Los cambios resultantes de aplicar esta corrección con la fórmula (4.3) están recogidos en la tabla 4.6. Esta vez se han tomado directamente los datos de flujo y usado la ecuación RBFO para pasarlos a temperatura.

| | Inicial | | Corregido | |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Ganancia alta | Ganancia baja | Ganancia alta | Ganancia baja |
| Flujo binarizado | 3376 | 1101 | 3382 | 1102 |
| Temperatura ($^{\circ}C$) | 26.56 | 24.68 | 26.69 | 24.76 |

Tabla 4.6: Resultados de medidas sobre la piel humana corregidos

Por otro lado, se debe tener en cuenta un factor importante, en muchas ocasiones la superficie estudiada no ocupa todos los píxeles de la matriz de datos. Es decir, $W_{scene} \neq W_{obj}$, entonces es probable que la media que se ha hecho hasta ahora no ofrezca unos resultados correctos del blanco estudiado, en este caso la piel humana. Para que las medidas sean más precisas se necesitaría aplicar los términos de emisividad a una región de interés específica. Es decir, aplicar el 0.97 a los píxeles que han captado las regiones de piel. Al integrar solo un área de interés, como se ve en la figura 4.14, se

obtienen datos más cercanos a la realidad, que de otra forma no se consiguen integrando la matriz completa. Esto es porque los valores que corresponden al entorno ya no son tomados en cuenta para la integración de estos datos, hasta este momento estaban falseando las medidas que debían corresponder al blanco estudiado.

Para aplicaciones donde los valores finales dependen de un buen post-procesado el uso de una región de interés es de mucha importancia. En este caso se aísla con un ROI rectangular los píxeles cercanos a la mano y luego se utiliza una máscara para resaltar los valores integrados. Sin embargo, si se necesitan datos de temperatura con una continuidad alta y de forma dinámica, lo que hay que intentar es que el área de interés medida sea lo mayor posible, teniendo muchas más muestras de dicha área que del entorno. Los resultados finales se recogen en la tabla 4.7.

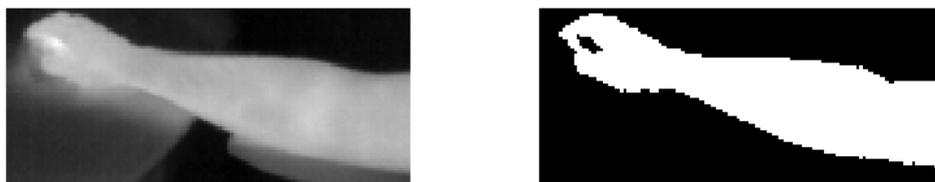


Figura 4.14: Imagen al aplicar un ROI rectangular y máscara usada

En la misma línea, puede que para otro tipo de medidas solo se necesite saber la temperatura de un píxel del sensor. Con un solo píxel de datos se podría resolver si se ha rebasado una determinada cota de temperatura, o si ese píxel concreto corresponde a un determinado objeto radiante en la escena. No obstante, esta conclusión sería dependiente de la precisión de este, pues mínimos cambios relativos en la posición del instrumento de medida pueden derivar en cambios sustanciales para un solo píxel. Por ello, se suele preferir un área de más píxeles para un estudio fiable.

| | ROI Inicial | | ROI corregido | |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Ganancia alta | Ganancia baja | Ganancia alta | Ganancia baja |
| Flujo binarizado | 3661 | 1176 | 3677 | 1179 |
| Temperatura ($^{\circ}C$) | 32.37 | 30.62 | 32.69 | 30.85 |

Tabla 4.7: Resultados de medidas sobre la piel humana - ROI corregido

Como era de esperar, los valores resultantes de aplicar la emisividad humana no son muy distintos a los que se tenía inicialmente, pues el factor de 0.97 apenas afecta en el

rango de temperaturas donde se sitúa la prueba. Sin embargo, esos decimales observados después del factor corrector pueden ofrecer una precisión necesaria según determinadas aplicaciones. Por otro lado, el efecto de la emisividad es mucho más notorio para grandes temperaturas, donde el porcentaje corrector mejora la lectura final de la cámara, esto aumenta cuanto más disminuye el término emisividad. Finalmente, esto sucede solo ajustando el término emisividad, en experimentos donde los resultados finales son muy vinculantes se necesitan parametrizar todos los factores que afectan al flujo incidente sobre el sensor.

4.3.2. Comprobación del rango dinámico

En esta sección se trata un pequeño experimento sobre cómo afecta los distintos rangos de temperatura en las medidas de la cámara, así como sus modos de ganancia. Como superficie estudiada se ha usado una sartén mayoritariamente de color negro, que se dispone en tres estados: frío, temperatura ambiente y caliente. Todas las medidas han sido contrastadas con un termómetro infrarrojo AICER, con un rango de trabajo teórico de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $320\text{ }^{\circ}\text{C}$. La fiabilidad de las medidas del termómetro se considera válida para la distancia a la que se hizo la toma de datos, por lo tanto, se estima una buena forma para respaldar los resultados de la cámara.



Figura 4.15: Termómetro infrarrojo AICER

- Para tomar medidas en frío se ha guardado la sartén (figura 4.16) en una nevera durante aproximadamente 120 minutos. La cámara ha llegado a registrar mínimos de $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximos de $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, estos últimos corresponden a la temperatura del entorno.

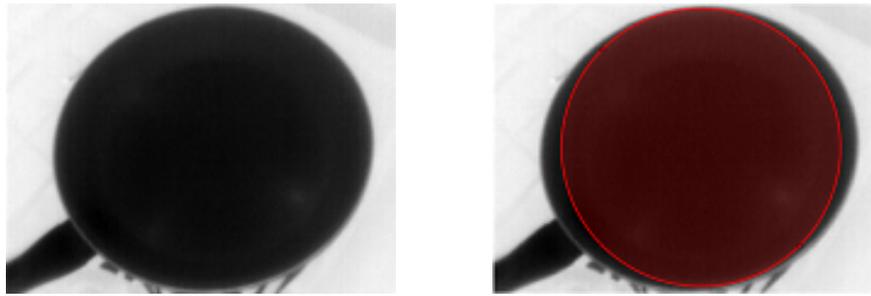


Figura 4.16: Muestra de la sartén fría y ROI aplicado

- En las medidas a temperatura ambiente (figura 4.17) se han registrado por la cámara mínimos de $20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximos de $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

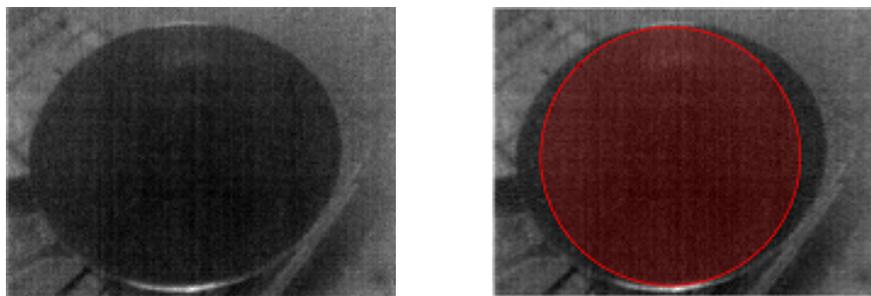


Figura 4.17: Muestra de la sartén a temperatura ambiente y ROI aplicado

- Para tomar medidas de la superficie caliente (figura 4.18) se procedió a encender un fogón durante aproximadamente 1 minuto. Los datos obtenidos contrastan la especificación del fabricante, existe una cota máxima de temperatura que la cámara, según su configuración de fábrica, puede captar. En ganancia alta la Lepton capta mínimos de $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un máximo tope de $183\text{ }^{\circ}\text{C}$.

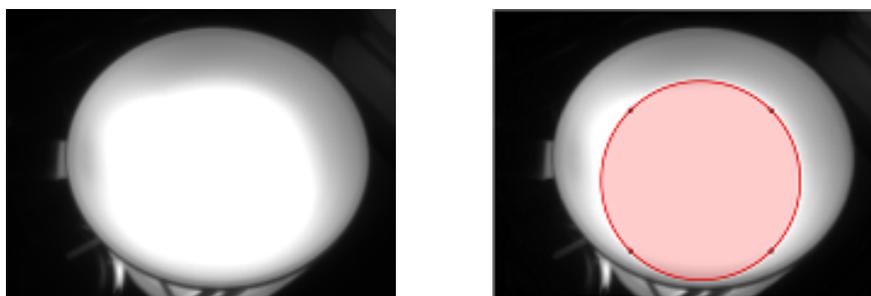


Figura 4.18: Muestra de la sartén caliente (HG) y ROI aplicado

- En el mismo caso, pero cambiando el campo de la ganancia, se obtienen unos resultados mucho más cercanos a la realidad. En ganancia baja la cámara capta mínimos de $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un máximo tope de $251.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

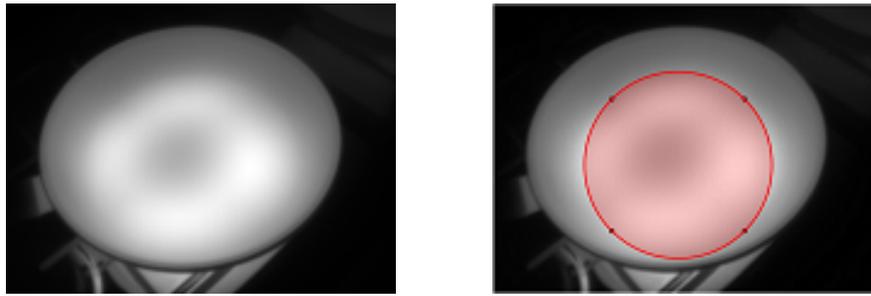


Figura 4.19: Muestra de la sartén caliente (LG) y ROI aplicado

Para comparar estas medidas con las que muestra el termómetro se decide hacer la media de los datos dentro del círculo dibujado. La región de interés del sartén sometido a altas temperaturas es más pequeña que las dos medidas anteriores, esto es porque se ha calentado el sartén con un fogón de gas, por lo tanto, el calor no se reparte igual por toda el área de esta.

| | Flujo binarizado | Temperatura ($^{\circ}C$) | Medidas del termómetro ($^{\circ}C$) |
|-------------|------------------|-----------------------------|--|
| Frío | 2611 | 9.32 | 6-9 |
| T. ambiente | 3091 | 20.66 | 18.2-18.5 |
| Caliente HG | 15586 | 175.67 | 200-220 |
| Caliente LG | 5537 | 210.67 | 200-220 |

Tabla 4.8: Resultados del experimento sobre la sartén

Como se observa en la tabla 4.8, se encuentra una mayor desviación en los datos del sartén caliente teniendo la cámara en ganancia alta. Esto se debe al rango máximo de temperatura que permite este estado, la suma de valores no supera cierto umbral, por ello no llegan a los datos marcados por el termómetro, que en este caso muestra registros de hasta $220^{\circ}C$. La finalidad de esta medida era comprobar el rango dinámico de la cámara en un entorno relativamente controlado, sin ningún impedimento o problemas derivados de fenómenos atmosféricos. A raíz de los resultados se puede contrastar que el modo de ganancia baja será necesario para aplicaciones donde se requieran medir valores por encima de $250^{\circ}C$. Sin embargo, aún no se ha evidenciado el máximo rango dinámico que detalla el fabricante de la cámara.

Esto se comprueba con otra de las pruebas realizadas con la cámara, que consistía en estimar la temperatura del metal sobre el que se sitúa el fuego de una bussy, por si

estos datos fueran de utilidad como referencia para futuras medidas. Teóricamente se superarán los $251.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ alcanzados en el experimento de la sartén y de paso se estará más cerca de la cota máxima de temperatura del rango dinámico. En este caso ocurre una situación interesante, implementando las ecuaciones RBFO para el cálculo de la temperatura a partir del flujo y en modo ganancia baja, se obtiene la imagen de la izquierda de la figura 4.20, registrando una temperatura límite máxima de $382.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto ya se esperaba, pues se recuerda que los datos se almacenan en contenedores de 16 bits, de tal modo que:

- $2^{16} - 1 = 65535$, siendo este dato Kelvin x100. Por lo tanto, la temperatura máxima que lee la cámara es $655.35 - 273.15 = 382.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lo que utiliza la cámara para ampliar este rango dinámico es una operación software, que consiste en ajustar la resolución del TLinear y, por lo tanto, de los datos. En vez de obtener Kelvin x100 se referencian en Kelvin x10. Este detalle se puede entender desde el punto de vista de la memoria, con esta compresión de datos no se alcanzará la cota máxima limitada por los 16 bits de la cámara. Lo que antes era 65535 ahora es 6553.5, pudiendo aumentar hasta el límite teórico de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ según el fabricante. De hecho, a la hora de medir temperaturas superiores a $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ se procederá con esta opción. Ajustando las ecuaciones RBFO para conseguir este resultado se obtiene:

- Un máximo de 7104 (derecha de la figura 4.20), que se traduce en 710.4 Kelvin o $437.25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- El máximo valor teórico de flujo que la cámara puede registrar es entonces 16383, que se corresponde con un valor de 736.1 Kelvin, es decir, $462.95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

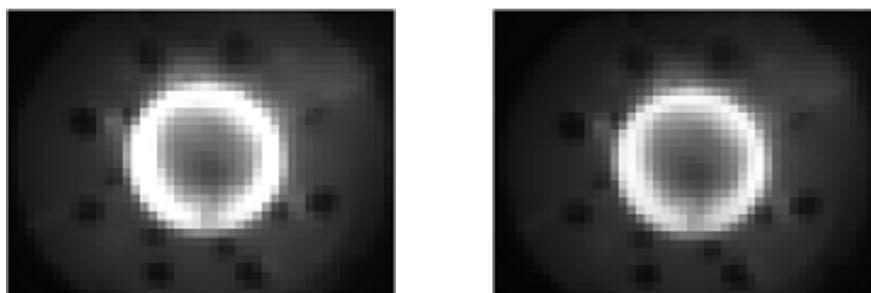


Figura 4.20: Izq: Imagen Kelvin x100 | Dcha: Imagen Kelvin x10

4.4. Hitos en la caracterización de la cámara

El hilo de este capítulo se puede resumir en los siguientes puntos:

- Las diferencias que presenta la cámara Lepton frente a otras alternativas del mercado son básicamente su bajo precio y pequeñas dimensiones, que derivan en una sencilla implementación en distintos sistemas compactos.
- Por un lado, durante este capítulo se ha detallado la calibración que presenta de fábrica la cámara, referenciando donde tiene que intervenir el usuario para una correcta corrección radiométrica.
- Por otro lado, se explican los distintos campos software que definen el funcionamiento general de la cámara, así como el efecto que tiene cada uno en el dato final que se le presenta al usuario:
 - **Modos FFC.** Ajuste necesario para corregir efectos no deseados en el flujo captado por la cámara.
 - **Modos de Radiometría.** Interviene directamente en el flujo electromagnético que incide sobre la cámara, el modelo físico que se implementa y su respectiva conversión a temperatura con las ecuaciones RBFO.
 - **Modos de ganancia.** Registra fundamentalmente el rango dinámico de trabajo y su respectiva precisión en las medidas. El modo HG (*High gain*) presenta una mayor precisión que el LG (*Low gain*), principalmente debido a la compresión de datos que existe en el segundo.
 - **Modos AGC.** Técnicas para optimizar la presentación final al usuario. La Lepton distingue dos políticas: la conversión lineal de datos y la ecualización de histogramas.
 - **Modos de Vídeo.** Distintos tipos de salida que presenta el flujo de una escena, dependiendo si se le aplican algoritmos de corrección, RBFO, AGC, etc.
- Por último, una idea justificada para entender el funcionamiento interno del dispositivo es la realización de distintas comprobaciones prácticas, validando en cada una de ellas las prestaciones que detalla el fabricante en la hoja de características.

Para lograr esto se han implementado de forma manual ciertas operaciones que realiza el SDK de la cámara, de tal forma que se consigue el mismo resultado a través de un post-procesado. Entre las pruebas realizadas se encuentra la corrección de la emisividad en una escena, (validando el modelo físico implementado por la cámara), la comprobación de rango dinámico, la conversión a temperatura, etc.

Capítulo 5

Campaña de medidas

Durante el desarrollo de este capítulo se tratarán dos puntos fundamentales: El comportamiento de la cámara termográfica Lepton para medidas hechas a distancias cercanas, que en este caso corresponden a menos de 30 metros, y distancias lejanas, correspondientes a más de 30 metros.

Por un lado, se usarán las pruebas y resultados tratados en la sección correspondiente a distancias cercanas para referenciar gran parte de las capacidades y rendimiento de la Lepton. Entre otros aspectos se estudian las diferencias que existen al tomar medidas sobre superficies de distinto tamaño, como decae el flujo recibido por el sensor para cierto rango de distancias y temperaturas, la diferencia apreciada al cambiar entre los distintos modos de ganancia programables, etc.

Por otro lado, siguiendo con el objetivo principal del TFG se pretende comprobar cómo reacciona la cámara ante una situación que puede derivar en el seguimiento de líneas de fuego. La prueba piloto se basará en la toma de datos de una quema controlada, hecha cerca del municipio de Gáldar (Gran Canaria). El objetivo es estudiar los resultados sacados de esta quema, detallando el desempeño del dispositivo en este tipo de tareas, teniendo en cuenta la energía total que le llega al sensor en una situación de grandes distancias, orografía abrupta y sin georreferenciación previa del foco radiante. Se pretende comprobar entonces si la cámara, después de formar una imagen radiométrica de dicha quema, es capaz de discernir que a una distancia bastante alejada de ella está sucediendo un escenario que se corresponde con la existencia o el avance de fuego.

5.1. Consideraciones previas

Existe una serie de consideraciones nombradas en el capítulo 3 del TFG que se deben tener en cuenta con respecto a la cámara. Entre ellos, se encuentra la estimación y efecto de la dimensión de una superficie estudiada frente las medidas que recoge la cámara de esta. Para poder empezar con estos cálculos se necesitan conocer parámetros de la cámara que no son proporcionados por el fabricante, pero si pueden ser obtenidos a partir de datos facilitados en su hoja de características. Concretamente se hablará del cálculo teórico del IFOV y de la distancia focal f de la Lepton. En la misma línea, se intentará especificar las distintas operaciones teóricas que derivan en los parámetros nombrados, donde se tienen en cuenta tanto la óptica de la cámara como su resolución.

Todo el cálculo descrito en esta sección se relaciona con el concepto de IFOV medible. Se parte de ese criterio considerando una medida radiométrica fiable aquella que cumple con la premisa que define este concepto, tratado anteriormente en el capítulo correspondiente a cámaras termográficas.

5.1.1. IFOV y distancia focal de la cámara

La pregunta de «a qué distancia puede medir una cámara» viene dada por factores como la resolución, la óptica, las propias dimensiones del blanco estudiado, etc. En relación con estas medidas, tener en cuenta la relación de tamaño de punto es un factor clave. Esto es un valor que indica la distancia a la que puede obtenerse una medición fiable de temperatura respecto a un objetivo con un determinado tamaño, utilizando un concreto número de píxeles. Lo primero que se necesita hacer es calcular el valor del IFOV [16]. En palabras simples, lo que desvela este factor es el objeto detectable más pequeño que una cámara puede resolver a una distancia d . En la termografía, el tamaño de este objeto se suele corresponder a un píxel.

Para calcular este factor se parte de la siguiente base: la Lepton tiene una resolución de 160x120 píxeles y su campo de visión horizontal y vertical son 57° y 42° respectivamente. A través de estos datos se pueden calcular el IFOV y la distancia focal:

- Tomando como dato el FOV_H , los 160 píxeles horizontales de la matriz y aplicando (3.1) se obtiene un $IFOV = 6.217$ mrad.

- Con este resultado y teniendo en cuenta el tamaño del píxel del sensor p , que es de $12 \mu\text{m}$, se puede despejar la distancia focal f de (3.2). Aplicando esto se obtiene una distancia focal de aproximadamente 2 mm.

5.1.2. Superficie mínima para activar los píxeles del sensor

Si se quiere estimar el número de píxeles que se necesita para resolver el área de un objeto [13] hay que tener en cuenta la dependencia con el tamaño de los píxeles, la distancia focal, la distancia blanco-cámara y la propia dimensión del blanco. Por ello, el número de píxeles usados para resolver un objeto de superficie s , a una distancia d , con un determinado IFOV es:

$$N = \frac{d}{s} \cdot IFOV \quad (5.1)$$

Siendo N el número de píxeles que corresponden a filas y columnas, esto es en realidad $N \times N$. Teniendo en cuenta el IFOV de la Lepton y usando, por ejemplo, 30 píxeles de la cámara, se puede referenciar en la tabla 5.1 algunos valores resultantes de aplicar la fórmula anterior:

| Dimensión mínima de la superficie (cm^2) | Máxima d (m) para un $N = 30$ píxeles |
|---|---|
| 5 | 2.41 |
| 20 | 9.65 |
| 40 | 19.3 |
| 60 | 28.95 |
| 80 | 38.6 |

Tabla 5.1: Cálculos teóricos de la Lepton para $N = 30$

Por otra parte, si lo que se quiere es hallar un área contenida dentro de la matriz de píxeles se tiene que recurrir a otra estimación. Juntando (3.1) y (5.1), tomando en cuenta que se utiliza tanto el FOV_V y FOV_H y sabiendo que el número de píxeles de X son diferentes a los de Y , el cálculo anterior se convierte en un cálculo de área total, teniendo como resultado:

$$A = \frac{4 \cdot (d[\text{km}] \cdot 1000)^2 \cdot \left(\frac{FOV_H \cdot \pi}{180}\right) \cdot \left(\frac{FOV_V \cdot \pi}{180}\right)}{n_{pX} \cdot n_{pY}} \quad (5.2)$$

Sin tener en cuenta la distancia entre píxeles dada por la tecnología del microbolómetro, la fórmula anterior devuelve el mínimo área sometida a una determinada temperatura capaz de activar un píxel del sensor a una distancia d . En la tabla 5.2 se referencia una serie de resultados usando todos los píxeles del sensor, a una distancia determinada y aplicando (5.2), se muestra entonces el área mínima teórica resuelta por la cámara. Esta estimación puede dar una idea de que tamaño mínimo debe tener la superficie radiante para activar los píxeles del sensor, por tanto, se utilizan estos datos como referencia, más que como claves para la medida.

| Distancia (m) | Área teórica (cm^2) |
|---------------|-------------------------|
| 2 | 6.0771 |
| 4 | 24 |
| 6 | 55 |
| 8 | 97 |
| 10 | 152 |

Tabla 5.2: Cálculos teóricos del área mínima radiante para la Lepton

5.1.3. Efecto de la resolución en las medidas

Uno de los factores más importantes que necesita tenerse en cuenta para cualquier medida térmica es la resolución de la cámara. Un blanco queda detallado con X número de píxeles en la horizontal e Y número de píxeles en la vertical, mientras que el entorno queda detallado con los píxeles restantes derivados del FPA. El efecto que tiene aumentar la distancia sobre el resultado de una imagen térmica es fácilmente demostrable, pues cuanto mayor es la distancia entre un blanco y la cámara, menor es el detalle que capta el dispositivo de este. El área total abarcable por la cámara está cambiando continuamente a medida que aumenta la distancia, por lo tanto, se necesita redistribuir una cantidad fija de píxeles para modelar el comportamiento y situación de ese nuevo escenario. Lo que sucede es que existe una mayor cantidad de información para un mismo número de píxeles, esto resulta en a una pérdida en la calidad de la imagen o superficie estudiada. Un ejemplo de este factor queda referenciado en la figura 5.1. Por supuesto, esta disminución de detalles repercute en la precisión de la cámara, pues tiene muchos menos datos para formar la imagen. La Lepton cuenta con un total

de 19.200 píxeles para codificar y convertir una matriz de datos a imagen, esto puede conllevar ciertas limitaciones a la hora de componer un buen detalle de la escena.

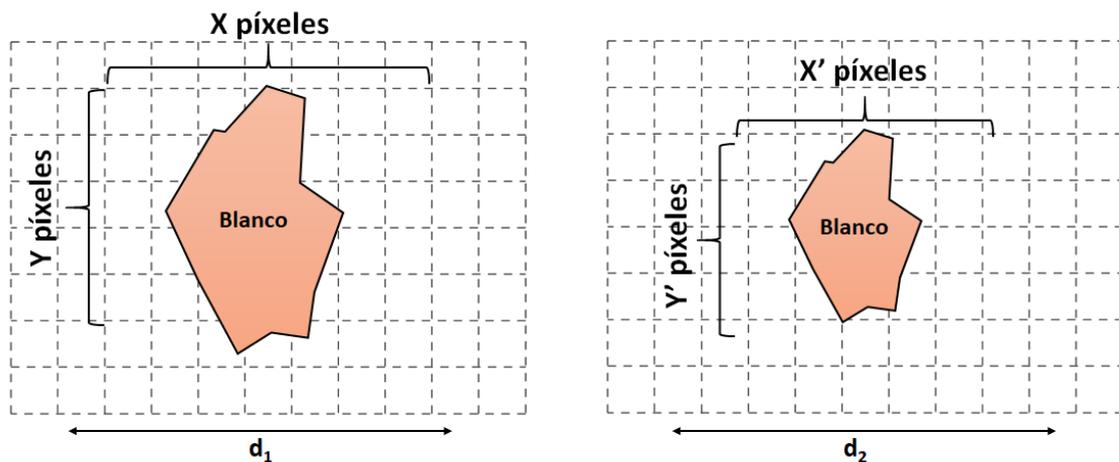


Figura 5.1: Representación de un blanco a dos distancias distintas

5.2. Pruebas a distancias cercanas

En esta parte del capítulo se pretende dar paso a distintas demostraciones hechas con la cámara y su respectiva presentación de resultados para un rango de distancias acordes a distancias cercanas, en concreto, menos de 30 metros de distancia entre blanco y cámara. Actualmente se cuenta con los datos de cuatro pruebas distintas:

- Primera prueba - Resultados sobre la piel humana.
- Segunda prueba - Resultados de la medida sobre 4 superficies metálicas.
- Tercera prueba - Resultados de la medida sobre el asfalto.
- Cuarta prueba - Resultados obtenidos sobre un hornillo de temperatura regulable.

El desglose de cada prueba se ha hecho en base a cuatro puntos fundamentales:

- Desarrollar una premisa, destacando que se quiere conseguir con el experimento, sus posibles aportaciones, etc.
- Lugar donde se ha procedido con el experimento, condiciones de la medida, distancia y detalles de la superficie estudiada.

- Consideraciones específicas para la captación y procesado de los datos.
- Referenciación de valores en gráficas o tablas, además del respectivo debate de los resultados.

Con relación a estas pruebas y siguiendo las instrucciones del fabricante, no se ha tenido en cuenta, para este rango de distancias, los factores atmosféricos que intervienen en la medida radiométrica por parte del sensor. De la misma manera, se ha usado un instrumento de medida adicional durante la realización de los experimentos, ya que se necesitan unos datos de respaldo para comprobar la veracidad de las lecturas captadas por la Lepton. En este caso se ha optado por utilizar el termómetro AICER, nombrado anteriormente en el capítulo 4 de este trabajo.

En lo referente a la metodología, el procedimiento general se detalla en la figura 5.2, donde se observa el criterio aplicado después de conseguir la matriz de flujo binarizado por parte de la cámara.

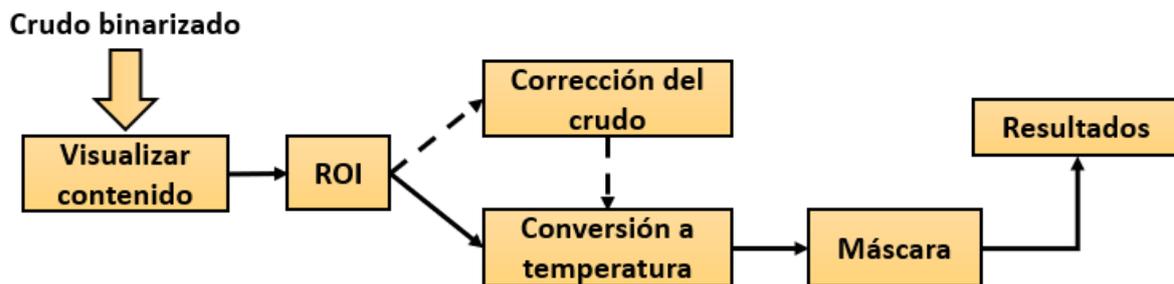


Figura 5.2: Metodología general

5.2.1. Primera prueba

El estudio de la temperatura corporal humana a través de cámaras termográficas es una de las aplicaciones más utilizadas en la actualidad. La facilidad para recabar datos térmicos de estas superficies se basa principalmente en tres factores:

- Su emisividad es conocida y ampliamente referenciada.
- Es una superficie muy fácil de estudiar por su accesibilidad.
- Los valores típicos de temperatura para un sujeto sano siempre son los mismos y por lo tanto se pueden comparar con las lecturas de la cámara.

Debido a estas razones, entre otras, se ha realizado una primera prueba piloto sobre el estudio de la piel humana para distintas distancias, con el objetivo de representar el decaimiento de la temperatura marcada por el dispositivo a medida que aumenta este rango. Por lo tanto, se pretende enfatizar las variaciones que presenta el flujo incidente en la cámara, más que el propio valor de la lectura, teniendo en cuenta que la temperatura que marca es proporcional a este.

Las medidas fueron tomadas a temperatura ambiente (aproximadamente $23\text{ }^{\circ}\text{C}$) y en una azotea con techo descubierto. La región de interés elegida es la zona facial de una persona (figura 5.3), cuya temperatura puede variar según el individuo y teniendo en mente que el calor corporal depende en gran medida del flujo sanguíneo, su actividad, bombeo, etc. Los datos se tomaron en el rango de distancias de 2 a 10 metros con pasos de 2 metros.



Figura 5.3: ROI de interés para el estudio de la piel

La metodología seguida se basa principalmente en la captación de flujo crudo por parte de la Lepton, para luego procesar la matriz resultante con las ecuaciones respectivas. Se tiene que establecer una corrección al flujo recibido por la cámara, introduciendo el valor de la emisividad propia de la piel humana, estimada alrededor de 0.97 y ajustando la temperatura del entorno. Para la recogida de resultados se utiliza un ROI que ocupe el blanco de interés y luego se le aplica una máscara para extraer de esta el máximo, la media y la moda registrada por la cámara. En esta prueba se tuvo especial cuidado de no mezclar los datos referentes al cabello del modelo con la propia piel, pues a distancias mayores de 6 metros se empezaban a perder detalles de esta zona.

La forma de captar el flujo crudo de la escena es a través de un programa diseñado con ayuda de las herramientas proporcionadas por el fabricante, tanto de la cámara como de la placa donde se sitúa. Este programa es explicado en el anexo III del TFG, se basa en definitiva en una superposición de imágenes procesadas por un AGC situado dentro de un bucle, para poder visualizar la escena sin dificultad y enfocar la cámara al blanco en cuestión. Este falso vídeo se utiliza para mostrar que lecturas está registrando la cámara, el almacenamiento de resultados se fundamenta en guardar cada muestra en un formato “.png” para posterior visualización.

Los valores obtenidos son representados como una gráfica en la figura 5.4, mostrando así las ligeras variaciones que se obtienen al procesar los datos de la matriz de píxeles.

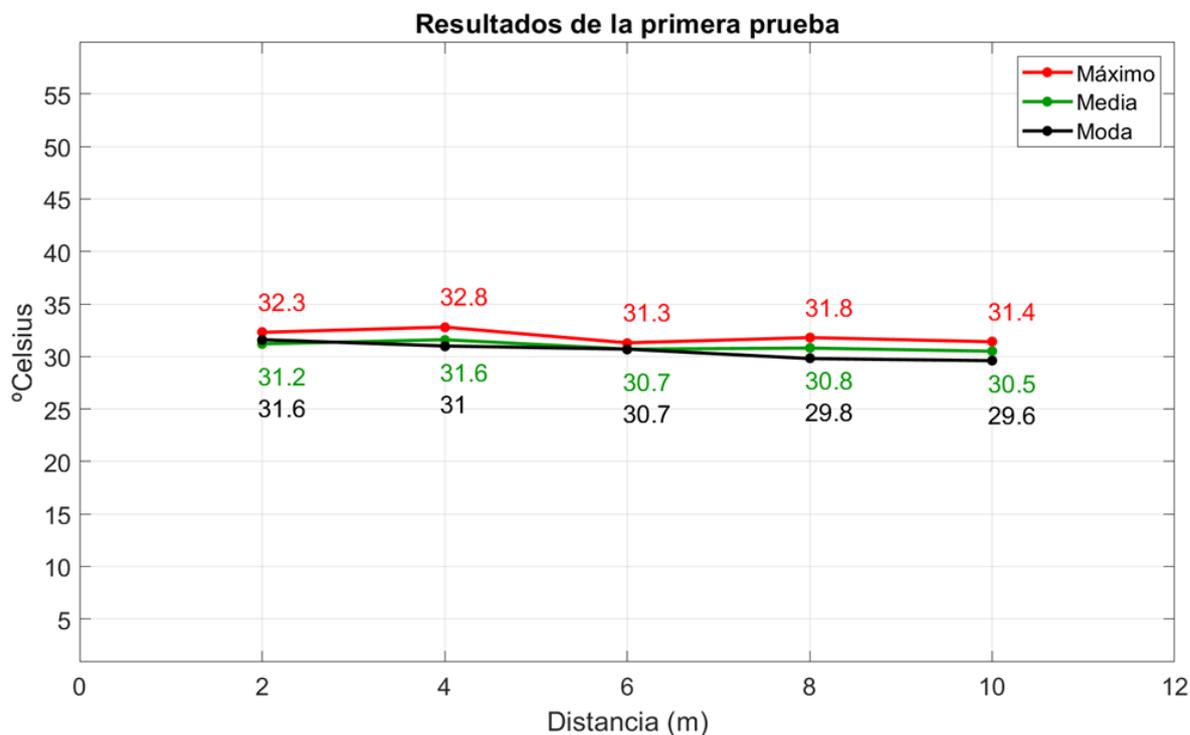


Figura 5.4: Representación del decaimiento general en las lecturas

Tal como se ve en la gráfica anterior y recalando que no se toman como totalmente correctas las medidas facilitadas por la cámara, pues todo dispositivo electrónico presenta errores en la medida, se puede llegar a una conclusión. Si uno se basa en las condiciones de cómo se realizó el experimento, los valores representados no muestran una gran desviación unos de otros, aunque parece que a partir de una distancia de 6 metros el flujo que le llega a la cámara es algo menor. Existe una similitud de valores

en distancias de 2 a 4 metros y de 6 a 10 metros para la gráfica de máximos y media, teniendo en cuenta que la curva de la media aritmética de los píxeles del ROI es mucho más suave que la de los máximos puntuales captados. No obstante, la moda estadística, que representa el valor que con más frecuencia se repite en la matriz, registra de forma visible una disminución de valores constante a medida que aumenta la distancia. Contando los resultados de la figura 5.4, parece que la cámara, en este experimento concreto y aunque exista una disminución de flujo visible, mantiene una relación de valores relativamente estable.

5.2.2. Segunda prueba

Teniendo como base los resultados obtenidos en la prueba anterior se decide preparar un escenario similar, es decir, se pretende volver a estudiar el decaimiento de la temperatura en cierto rango de distancias. En este caso existen dos modificaciones:

- Las medidas se hacen sobre superficies metálicas de distintas dimensiones. Por lo tanto, el comportamiento de estas nuevas superficies, por propia naturaleza, será distinto al referenciado sobre la piel humana.
- Se utilizan ambos modos de ganancia. Por un lado, se tiene el modo de ganancia alta, usado anteriormente en la primera prueba, cuyo rango dinámico permite medir temperaturas de hasta $183\text{ }^{\circ}\text{C}$ contrastados en el capítulo referente al estudio de la Lepton. Por otro lado, el modo de ganancia baja permite un mayor rango dinámico, siendo este necesario en medidas que incumban grandes temperaturas.

Como preparación para futuras medidas se pretende utilizar ambos modos de ganancia para recabar datos, comparándolos, con la intención de estudiar la desviación en los resultados, derivada del salto de precisión de un modo a otro. La meta es entonces observar dicha desviación y contar con ella siempre que se utilice un modo específico.

El lugar de las medidas es el mismo que en la prueba anterior. Se utilizaron en este caso 4 superficies de diferente tamaño (figura 5.5) que han sido calentadas previamente por el sol hasta alcanzar los $48\text{-}55\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo de donde apunte el termómetro que se usa como referencia. El intervalo de distancias del experimento va de 2 a 10 metros con pasos de 2 metros. En este caso se sabe con exactitud las dimensiones de las

superficies estudiadas, al contrario que con el experimento de la piel, donde no se pudo estimar este factor. Por lo tanto, se puede establecer una relación entre los resultados prácticos del experimento y la teoría estudiada en la sección de consideraciones previas, a través de dos criterios a cumplir:

- El área real de la superficie estudiada es mayor a la calculada de forma teórica por (5.2), teniendo en cuenta el factor de la distancia en la ecuación.
- El área de la superficie radiante se describe en al menos 9 píxeles del sensor, si no fuera así no se asegura que las medidas sean totalmente fiables.



Figura 5.5: Las superficies metálicas usadas en la segunda prueba

La metodología utilizada para la extracción de datos es similar a la primera prueba, aunque en este caso se tomaron datos con los modos de ganancia alta y baja, pretendiendo así observar las diferencias entre los valores obtenidos a medida que aumenta la distancia. Por supuesto, los criterios para establecer las máscaras cambian con respecto a la prueba anterior, pues en las superficies se tienen distintos rangos de temperatura. La forma de presentar resultados será a través del máximo, mínimo y la moda, teniendo como respaldo los datos obtenidos del termómetro.

Esta vez no se aplicará una corrección de emisividad, tres de las muestras se acercan mucho a un color negro, por lo tanto, se estima una buena capacidad emisiva de ellos

(cerca a 1). Ocurre lo contrario con la bandeja plateada, de la que se puede esperar una baja emisividad con respecto a las otras superficies, además de que su falta de homogeneidad afectará probablemente a las medidas proporcionadas por la cámara. Al no conocer exactamente su factor de emisividad se considera difícil de ajustar en la fórmula correspondiente. Sin embargo, se aprovechará este hecho para referenciar las notables diferencias entre el flujo que recibe la cámara de un buen radiador uniforme frente a otro que no lo es tanto.

Las dimensiones de las superficies se calculan tomando que el área de las muestras B1, B2 y B3 son las de un rectángulo y el área de P1 es un círculo contando solo su radio interior. Estas se muestran en la tabla 5.3:

| | Bandeja Grande | Bandeja Pequeña | Bandeja Plateada | Paellera negra |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Dimensiones (<i>cm</i>) | 32.5x43.5 | 29x29 | 30.7x31 | 14 |
| Área real (<i>cm</i> ²) | 1413.75 | 841 | 951.7 | 615.75 |

Tabla 5.3: Área real de las superficies

Como se observa en la tabla 5.2, la dimensión mínima que debe tener la superficie para que los píxeles del sensor se activen tiene que ser de al menos 152 *cm*². Partiendo de esta referencia se puede estimar que todas las superficies estudiadas presentan unas dimensiones suficientes para ofrecer una imagen radiométrica detallada.

Al igual que en la prueba anterior se considera buena idea representar los resultados de las medidas en unas gráficas. En este caso será mucho más intuitivo ver las diferencias entre los modos de ganancia en forma de subgráficas que muestren una medida concreta en HG y LG, estos datos se representan en las gráficas 5.6, 5.7 y 5.8. La idea principal para debatir resultados se basa en la desviación que sufre el modo LG frente al HG. Se toma el modo de ganancia alta como referencia, pues el fabricante de la cámara expone en su hoja de características que por su propia calibración presenta un menor rango de errores y mayor precisión radiométrica. Es tan importante referenciar la desviación en el rango de máximos registrados como el de mínimos, pues esta puede tener mayor peso dependiendo del rango de temperaturas. De la misma manera, se estudia la moda estadística para ver qué valor se repite con mayor frecuencia en todas las superficies.

La regla implementada es: $Desv = ((LG/HG) - 1) \cdot 100$.

En cuanto a los mínimos, se tiene en consideración que cuanto menor sea el rango de comparación entre puntos, mayor será la desviación resultante. Es decir, la desviación de $61\text{ }^{\circ}\text{C}/63\text{ }^{\circ}\text{C}$ es aproximadamente de un 3.2%, mientras que de $11\text{ }^{\circ}\text{C}/13\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de un 15.3%, aunque la diferencia entre ambos sea de solo $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por este motivo se representa por encima de las curvas de todas las gráficas tanto los valores en % como la diferencia real de grados Celsius que existe.

■ Máximos registrados.

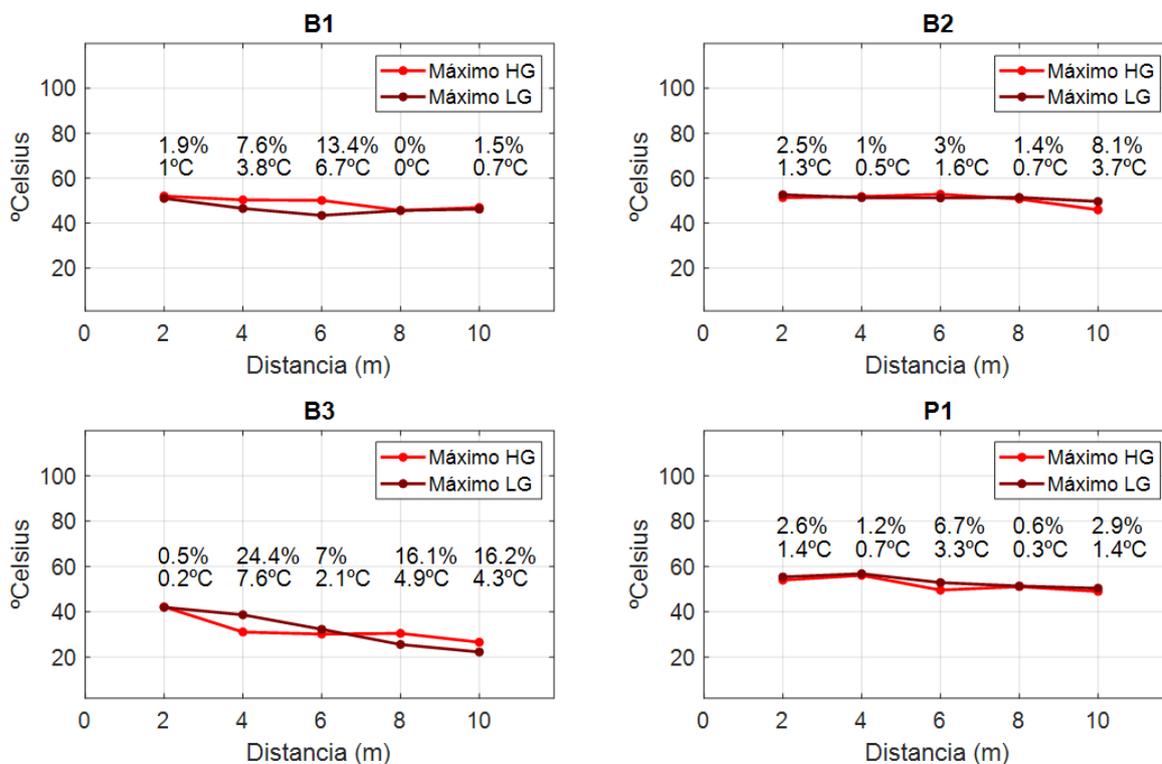


Figura 5.6: Representación de los máximos - Segunda prueba

En el caso de los máximos, sin atender al valor exacto que marca la cámara, se pueden debatir varios puntos:

- Los resultados de las muestras B2 y P1 mantienen una similitud entre datos con ambos modos de ganancia, aunque la desviación empieza a ser perceptible en la muestra B2 a partir de 10 metros entre cámara y blanco.

- En las distancias de 4 y 6 metros de la muestra B1 existe una gran desviación en los valores sacados del modo LG. Situación que no sucede en distancias de 8 y 10 metros, esta última con una desviación de solo el 1.5 %.
- Respecto a la muestra B3, las suposiciones iniciales parecen ser correctas, es una peor emisora de radiación si se compara con las otras muestras, solo hay que fijarse en las lecturas marcadas por la cámara frente a las marcadas por el termómetro en el momento de las medidas. De la misma forma, existen grandes variaciones entre un modo de ganancia y otro al tomar los datos en las respectivas distancias de estudio, un factor de importancia a tener en cuenta y probablemente derivado de la poca homogeneidad que tiene la superficie en cuestión.
- **Mínimos registrados.**

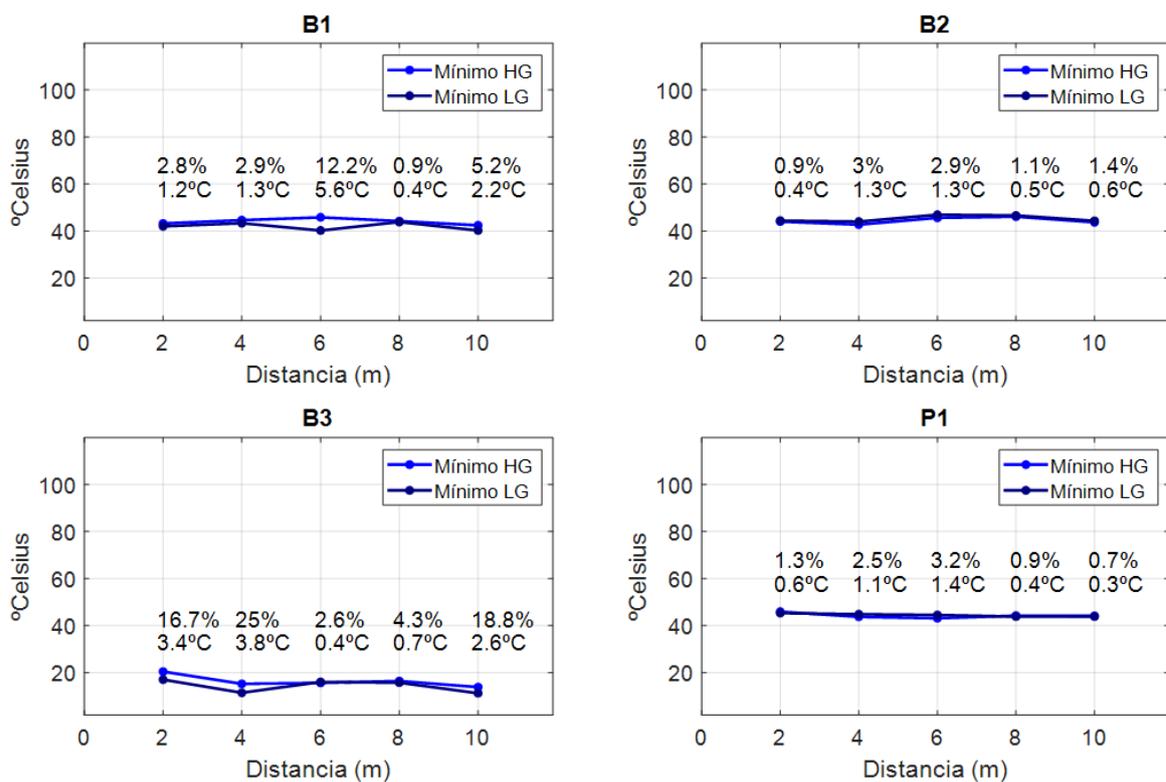


Figura 5.7: Representación de los mínimos - Segunda prueba

Considerando los resultados referenciados en las gráficas de los mínimos:

- Las muestras B2 y P1 siguen ofreciendo una buena similitud en los resultados, aplanando aún más la desviación entre modos.

- La superficie B1 vuelve a mostrar un desfase en las medidas de ambos modos para 4 y 6 metros, aunque esta vez es menor que para los valores máximos.
- En la muestra B3 se observa un aplanamiento generalizado respecto a los valores máximos percibidos. Todo apunta a que las desviaciones grandes se sitúan sobre todo en los píxeles más calientes que detallan las superficies.
- **Moda registrada.**

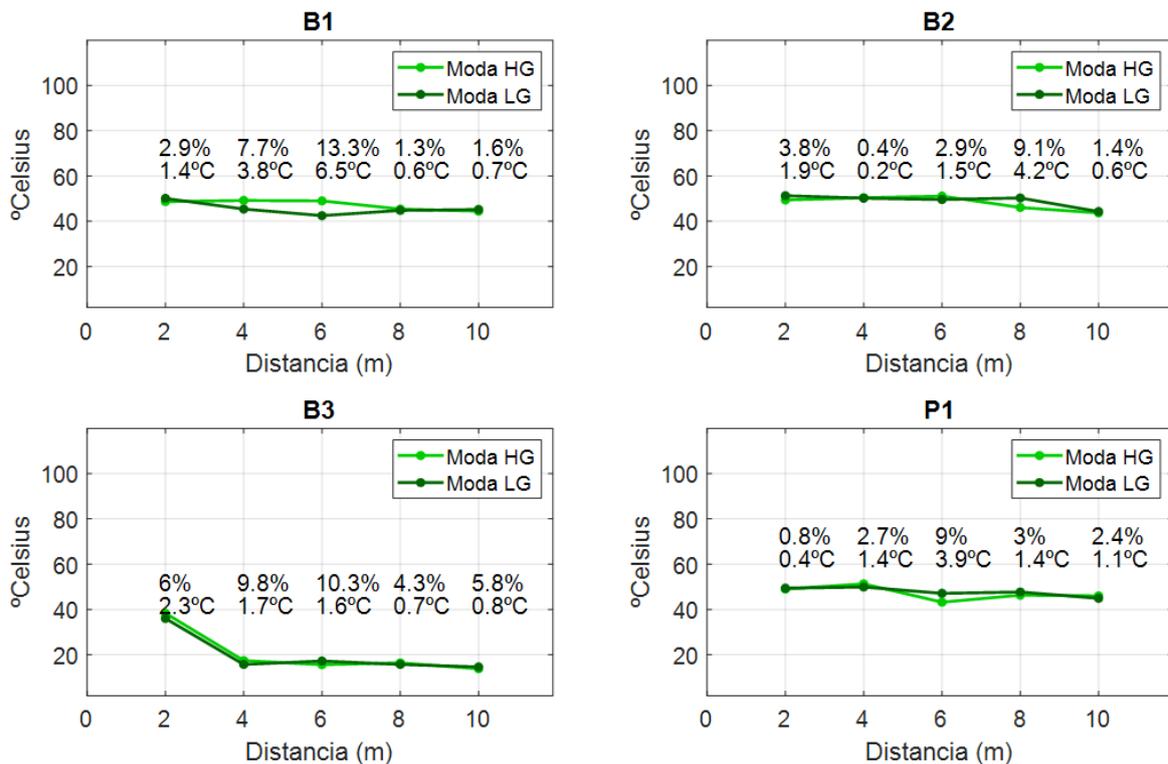


Figura 5.8: Representación de la moda - Segunda prueba

La moda registrada en la figura 5.8 muestra un comportamiento similar a lo representado en las gráficas de mínimos, exceptuando el gran salto que ocurre en la muestra B3, que está más cerca a la gráfica de los máximos, probablemente debido a la cercanía física con la que se tomaron datos de la superficie. En líneas generales se pueden sacar las mismas conclusiones que lo nombrado anteriormente.

Como conclusiones, se podría decir que, para la mitad de las muestras estudiadas, en concreto B2 y P1, la desviación de valores que existe entre los modos de ganancia HG y LG son asumibles respecto la situación donde se encuentran y dentro del rango de temperaturas para el que se realizó el experimento. Por otro lado, no se debe obviar el

hecho de que existen unos puntos específicos procedentes de las muestras B1 y B3 donde sucede una gran desviación de los datos. Esta situación necesitaría de la repetición de las medidas para comprobar si es un hecho aislado derivado de píxeles defectuosos, ya que por parte de la muestra B1 sucede en puntos específicos de la superficie y en ciertas distancias, es decir, unos píxeles determinados de datos que afectan a la tendencia general. Esta inestabilidad en las medidas es algo que se debe tener en consideración para futuras pruebas sobre superficies de dimensiones similares, donde el flujo integrado por la cámara es limitado. Sin embargo, para mayores superficies puede que los comentarios anteriores no sean extrapolables.

5.2.3. Tercera prueba

Los datos obtenidos del primer y segundo experimentos dan una idea de cómo varían las lecturas de la cámara ante el aumento de la distancia para pequeñas superficies. En este caso se pretende comprobar los cambios perceptibles en las medidas ante una superficie mucho mayor que las estudiadas hasta ahora, más concretamente sobre el asfalto de la carretera. Este tipo de superficie presenta una gran homogeneidad y emisividad, por lo tanto, la cantidad de radiación que la cámara integra es mayor, lo que deriva en datos más precisos. Se presume entonces que para este tipo de blanco se obtendrán mejores lecturas y estabilidad en ambos modos de ganancia. Esta prueba servirá en definitiva para mostrar cómo trabaja la cámara ante un área grande de integración, como se distribuyen los píxeles en la escena y que valor se obtiene de ellos, pudiendo ser útiles como referencia para distintas aplicaciones.

Para comenzar el experimento se necesita situar la cámara a 7-8 metros de altura sobre asfalto de la carretera, previamente calentada por el sol. No se considera necesario establecer una corrección para el flujo, estimando una buena emisividad en el rango de temperaturas medido. En casos generales es relativamente sencillo encontrar asfalto uniformemente calentado en cualquier lugar, por lo tanto, no es una situación difícil de replicar en cualquier momento en caso de error en las medidas.

Los pasos que se siguieron antes del post-procesado en MATLAB son desglosados en los siguientes puntos:

- Se mide la temperatura del asfalto con el termómetro, a través de un barrido a lo largo de una gran cantidad de puntos.
- Toma de 5 imágenes radiométricas en cada modo de ganancia.
- Se vuelve a medir la temperatura del asfalto.
- Se repite el proceso al menos durante 4 iteraciones, para poder tener suficientes muestras para validar los resultados.

Una parte de los datos obtenidos del termómetro son referenciados en la tabla 5.4. A partir de estos se forma el umbral de la máscara aplicada en la figura 5.9, ubicando el mínimo en 50 °C y el máximo en 61 °C. A partir de esta metodología se estudian los valores que capta la cámara en ambos modos de ganancia, en contraposición a los marcados por el termómetro.

| Lecturas del termómetro °C | | | |
|----------------------------|------|------|------|
| 56.4 | 57.6 | 60.2 | 58.7 |
| 59.2 | 60.1 | 56.8 | 59.6 |
| 59.9 | 55.6 | 56.8 | 59.4 |
| 57.2 | 57.5 | 59.8 | 58.5 |

Tabla 5.4: Lecturas del termómetro sobre asfalto



Figura 5.9: Área estudiada en la tercera prueba

Como se observa en la figura anterior, a esta distancia la cámara define perfectamente los detalles de la escena. Por un lado, existen píxeles para modelar la forma de los coches y sus respectivos matices de temperatura. Por otro lado, se observa que el asfalto sobre el que se hace la medida es bastante homogéneo, salvando el hecho de que existe una región algo más caliente que el resto de la escena. Esta región puede deberse al hecho de que antes se situara un vehículo sobre la carretera, cuyo arranque calentara aún más el asfalto, pero ante la duda no se toma en cuenta esta pequeña área durante el procesado. De la misma forma, la Lepton es capaz de mostrar píxeles menos calientes que representan los vados amarillos en frente de cada casa, definiéndolos con un color algo más oscuro, aunque su valor sigue correspondiendo a $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En este caso no se opta por una representación en forma de gráficas. Al mantener siempre una distancia constante, los resultados son mostrados en la siguiente tabla, estableciendo cada muestra a su respectiva prueba:

| Prueba (número) | Temperatura HG ($^{\circ}\text{C}$) | | | Temperatura LG ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|-----------------|---------------------------------------|--------|------|---------------------------------------|--------|------|
| | Máximo | Mínimo | Moda | Máximo | Mínimo | Moda |
| 1 | 60.9 | 50.01 | 55.4 | 61.9 | 50.06 | 56.3 |
| 2 | 60.9 | 50.01 | 55.2 | 61.9 | 50.2 | 58.5 |
| 3 | 60.9 | 50.01 | 55.1 | 61.9 | 50.06 | 57 |
| 4 | 60.9 | 50.01 | 55.7 | 61.9 | 50.06 | 57.1 |

Tabla 5.5: Resultados de la tercera prueba para ambos modos de ganancia

Los resultados de la tabla 5.5 muestran una estabilidad en las medidas no conseguida en las pruebas anteriores, sobre todo si se comparan los resultados de los distintos modos de ganancia. Principalmente se debe a la superficie radiante, ya que esta tiene una mayor dimensión que las anteriores muestras estudiadas. Como se observa, sus regiones son uniformemente calentadas por el sol, al contrario que en el experimento de las superficies metálicas, donde los bordes de estas no se calentaban con la misma intensidad que su centro. En definitiva, parece que se obtienen unos mejores resultados al estudiar superficies similares a la de este experimento, un hecho que ya se suponía antes de su realización, pero que ahora queda verificado. La cámara, debido a sus limitaciones físicas, puede tener ciertos problemas para estudiar pequeñas superficies

en la escena a determinadas distancias, efecto razonable si se tiene en cuenta que su objetivo es un gran angular de FOV amplio, contando además con poca resolución. Para este tipo de medidas un teleobjetivo sería mucho más útil. Sin embargo, al menos para distancias cortas, la cámara reacciona de forma fiable frente una mayor superficie, incluso con varios elementos en la escena, sucediendo lo contrario que en el caso anterior. Un FOV amplio deriva en una mayor área abarcable, por lo tanto, un mayor flujo de datos que integrar.

5.2.4. Cuarta prueba

Con los resultados anteriores se tienen parametrizados 3 factores que muestran el comportamiento de la cámara para un determinado rango de temperaturas y distancias:

- El decaimiento de la temperatura al aumentar la distancia de medida.
- Desviación entre modos HG y LG.
- Importancia de la homogeneidad y dimensión de la superficie radiante.

En esta ocasión se pretende cumplir dos objetivos relacionados entre sí: uno es dejar constancia y evidenciar las consecuencias prácticas de tener distintas ópticas y resoluciones a la hora de tomar datos de una misma superficie radiante, un tema ya tratado en este TFG de forma teórica pero que se necesita respaldar a efectos prácticos. El otro consiste en, a partir de los resultados obtenidos con el punto anterior, evidenciar la limitación física que tiene la Lepton para formar una imagen radiométrica fiable. A raíz de estas dos premisas y para diferenciar el proceso seguido respecto a las anteriores pruebas, se opta por registrar datos de una superficie pequeña, pero con un rango de temperaturas mucho mayor al tratado anteriormente. El punto es observar cómo varían estos rangos ante un mayor aumento de la distancia y teniendo en cuenta las posibles desviaciones derivadas de usar el modo LG.

Con la intención de completar el primer objetivo nombrado, se tiene acceso a otras cámaras termográficas del fabricante FLIR sobre las que se ha trabajado previamente en el instituto de investigación IDeTIC, de distintas gamas y características. El experimento se considera una buena oportunidad para establecer una pequeña comparación

entre la Lepton y otras cámaras del mismo fabricante, todas ellas con un mayor rango de precios. Tomando como referencia los otros modelos de cámaras termográficas, en principio de mejores prestaciones, se establece una base para poder debatir sobre el desempeño general de la Lepton, al menos para situaciones similares de medida, unos resultados importantes para conseguir el segundo objetivo.

Las características de las cámaras usadas son las mostradas en la tabla siguiente:

| Modelos | Características físicas | | | |
|-------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Resolución | Distancia focal (mm) | FOV _H (°) | FOV _V (°) |
| FLIR A615 | 640 x 480 | 24.6 | 25 | 18.8 |
| FLIR A35 | 320 x 256 | 19 | 24 | 19.2 |
| FLIR Tau 2 | 336 x 256 | 35 | 9.3 | 7.1 |
| FLIR Lepton | 160 x 120 | 2 | 57 | 42 |

Tabla 5.6: Cámaras de FLIR utilizadas

El experimento en cuestión fue hecho en el IDeTIC, gracias a la ayuda de su personal contratado. El tamaño del corredor del instituto donde se realizan las pruebas permite tomar medidas de hasta 28 metros respecto a la cámara. Para poder extraer datos se tiene en disposición de un hornillo de temperatura regulable de radio = 7.3 cm, que se sube a una escalera para ayudar a situarlo en el rango de visión de las cámaras usadas. La superficie en sí no es muy homogénea, pues se registran valores bastante dispares, dependiendo de donde mida el termómetro usado se observan valores de 200 °C, 300 °C, 380 °C, 400 °C, etc.

Para poder centralizar la toma de datos se cuenta con un sistema que integra las 4 cámaras nombradas en una sola base, en este caso el trípode mostrado en la figura 5.10. Los dispositivos son alimentados con una batería auxiliar de 50000 mAh, por lo que las horas de funcionamiento no son un problema. En cuanto a las cámaras, las dos primeras mostradas en la tabla 5.6 responden con el estándar de comunicación *Gigabit Ethernet* y el protocolo *GigEVision* para transmitir vídeo, mientras que la Tau 2 funciona a través de puerto serie y la Lepton por USB (*Universal Serial Bus*). El sistema final se centraliza con el uso de un solo portátil, la Lepton y la Tau 2 van conectadas a los respectivos puertos físicos de este, mientras se le proporciona una dirección IP específica

a la A615 y A35 para tener acceso a ellas mediante *ethernet*, crear un objeto con las funcionalidades de estas y cambiar sus parámetros. Las preparaciones previas consisten en decidir la forma con la que cada cámara capturaré una imagen del blanco y que campos hay que modificar para obtener los datos de interés.

Los detalles de este proceso se centran sobre todo en la cámara Lepton, ya que sobre esta se basa el TFG. En un principio se deseaba usar el programa diseñado para la Lepton en el anexo III, previamente nombrado en la sección de la prueba sobre la piel. No obstante, al tener todo centralizado en un solo ordenador externo, se opta por la alternativa de sacar las fotos de forma manual con la aplicación *Lepton User App*, que proporciona al menos la capacidad de cambiar a modo LG y aplicar el FFC.

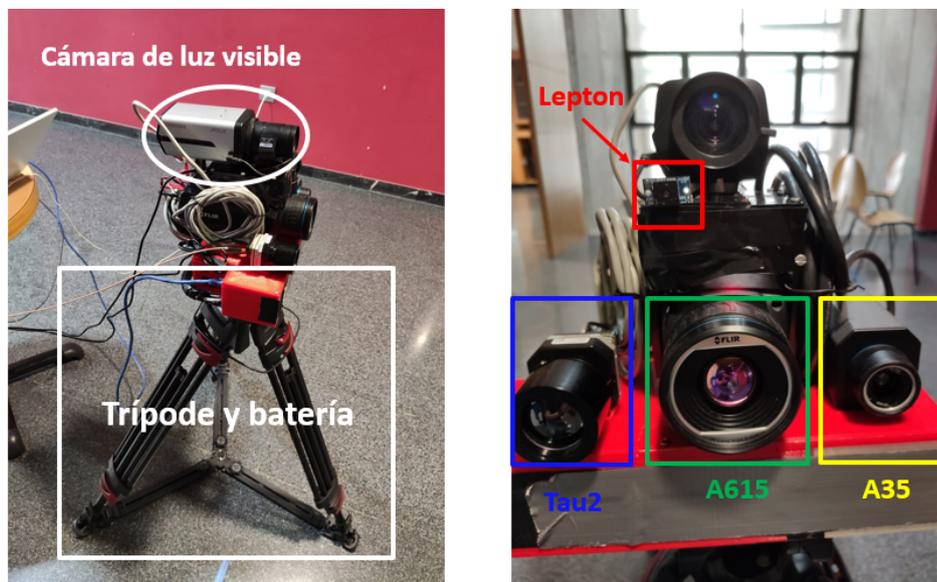


Figura 5.10: Array de cámaras sobre el trípode

La metodología a seguir es similar a la usada en apartados anteriores, se obtienen las matrices correspondientes del crudo para luego post-procesarlas. Se registrarán estos datos con la intención de crear unas curvas de temperatura que detallen de forma visual la tendencia y funcionamiento general de cada cámara. Se espera que las limitaciones de la Lepton queden referenciadas a través de la pendiente de su curva, cuyos valores representados tendrán una determinada desviación respecto a los de las otras cámaras.

Una vez hechos todos los preparativos se procede a la toma de datos, como se ve en la figura 5.11. El procedimiento es bastante metódico, al contrario que en las primeras

pruebas, la cámara no se mueve en ningún momento, consiguiendo una estabilidad en las medidas relativamente buena. Solo se modifica el centro de apoyo donde se encuentran las cámaras, porque necesitan enfocar el hornillo si este se aleja demasiado.

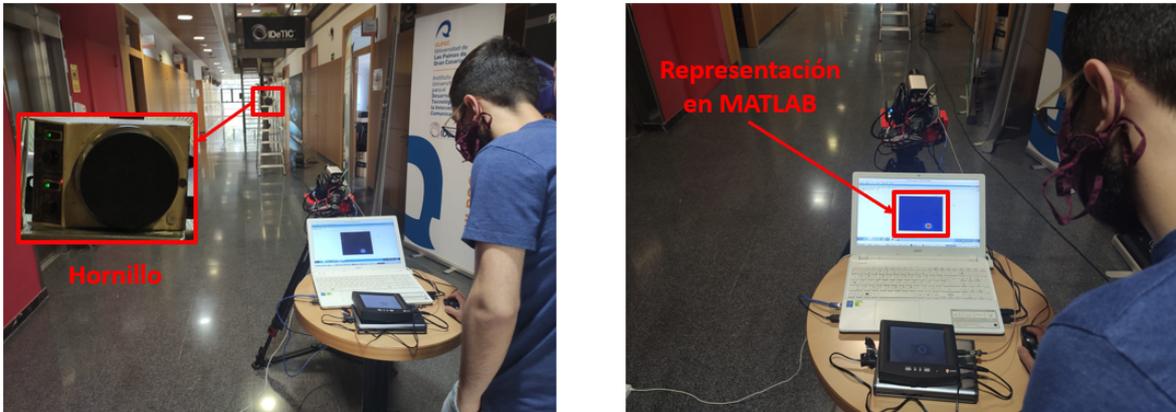


Figura 5.11: Captura de datos centralizada

Una primera toma de contacto, que muestra las implicaciones de tener distintas características físicas, es la que se observa en la figura 5.12. Atendiendo solo a la imagen mostrada, se diferencia a simple vista que cámaras poseen una mayor calidad en cuanto a la formación de imagen radiométrica, siendo visible la importancia de tener una buena óptica y gran resolución que permitan detallar la superficie de estudio, tal como se ha ido recalando a lo largo de este trabajo.

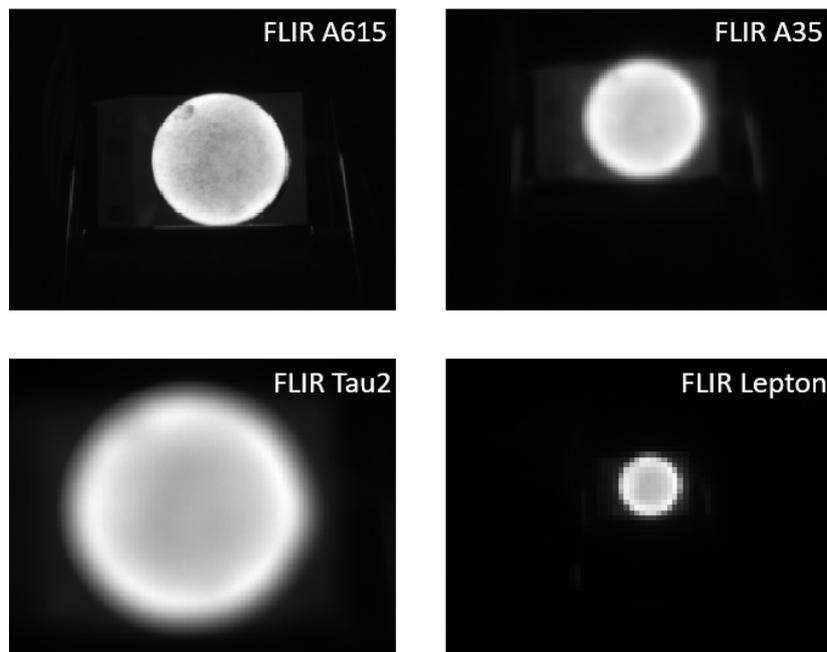


Figura 5.12: Superficie vista por las cámaras a 2 metros

La imagen que muestra la Lepton es con diferencia la que peor queda definida de todas, consecuencia directa de tener la peor resolución. Sin embargo, no es solo una limitación del sensor, su óptica tiene mucho peso en esto. Al ser un gran angular, el blanco en sí está aparentemente más alejado respecto a las otras muestras, pues este tipo de objetivo tiende a tener un ángulo (por lo tanto, área) abarcable relativamente grande y poca capacidad de enfoque. Por ejemplo, si la lente se pareciera más a la de la Tau 2, un gran enfoque, la poca resolución del sensor no implicaría tantos problemas, pues el blanco ocuparía mucho más espacio en la matriz y por ello estaría definido con un mayor número de píxeles, resultado ligado al aumento en el flujo captado.

Se puede utilizar la fórmula 5.2 y los datos de la tabla 5.6 para estimar como puede afectar el aumento de la distancia en la calidad de la imagen radiométrica. Teniendo en consideración que dicha ecuación devuelve la superficie mínima detectable, si se comparan las dimensiones calculadas para cada una de las cámaras, indirectamente se tienen parametrizados algunos factores como la cantidad mínima de radiación captada. Es decir, a mayor superficie mínima mejor será la aportación final de flujo integrada por el sensor. Tener en mente las consideraciones previas que incumbe esta operación puede dar una respuesta anticipada del uso de distintos dispositivos para una misma escena o situación de medida.

Por ejemplo, para una distancia de 10 metros se tienen los siguientes resultados:

| Distancia (m) | Área mínima detectable (cm^2) | | | |
|---------------|-----------------------------------|------|-------|--------|
| | A615 | A35 | Tau 2 | Lepton |
| 10 | 1.86 | 6.85 | 0.94 | 152 |

Tabla 5.7: Cálculos teóricos del área mínima radiante para las cámaras usadas

El área del hornillo se obtiene estimando su forma como la de un círculo perfecto, por lo tanto, se calcula como $\pi \cdot r^2 = 167.4 \text{ cm}^2$. Tomando como referencia esto y los resultados de la tabla 5.7, se puede esperar que la Lepton es la cámara cuya imagen radiométrica, en una distancia de 10 metros, es la menos detallada, repercutiendo directamente en los valores de la matriz de datos, pues menos píxeles detallan los matices de temperatura que existen en la superficie del hornillo. Las estimaciones teóricas se respaldan con las muestras de la figura 5.13.

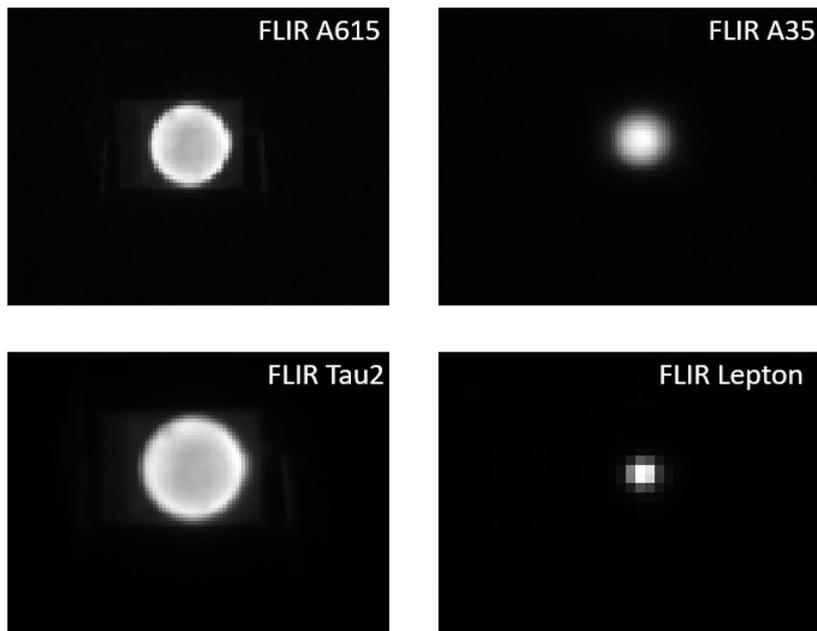


Figura 5.13: Superficie vista por las cámaras a 10 metros

Como se ha dicho anteriormente, los resultados obtenidos de cada cámara serán representados en 3 gráficas distintas, registrando máximos, mínimos y la media para cada punto de distancia. En este caso no se aplicará ningún tipo de factor corrector, se considera que no es necesario el ajuste fino de los datos recogidos. Por el contrario, se pueden recabar conclusiones veraces simplemente observando las lecturas en bruto que registra cada cámara. Para esta ocasión se tomarán como referencia los datos ofrecidos por la A615 y la Tau 2, ya que son los dispositivos que mejor desempeño presentan.

Antes de que el procesado final sea hecho, se pueden anticipar una serie de resultados claves. Como se ve en la figura 5.13, a unos 10 metros la Lepton apenas distingue un cuadro de 2x2 píxeles de datos que representan las dimensiones del hornillo. De esta forma, llegará el momento en el que solo sea capaz de resolver un punto caliente en el escenario de medida, mientras que las otras cámaras aún puedan dar sentido a la forma de la superficie. Estudiar ese caso a través de las gráficas representadas y, por lo tanto, de las matrices de datos, puede dar una idea de cuál es el límite que tiene la Lepton para aportar medidas fiables a una determinada distancia y área de estudio.

Antes de empezar con la representación gráfica de los resultados se tiene que recalcar un suceso que merece la pena añadir en la memoria. Durante el transcurso de la

toma de datos aparece en escena una idea que podría ser interesante de aplicar para mejorar el desempeño general de la Lepton. Se tiene en disposición de una óptica extra perteneciente a una cámara de FLIR que no ha sido utilizada en este experimento, en concreto la A40, pudiendo ser desenroscada de esta para otros usos. A lo largo del documento se ha hablado de la posibilidad de mejorar las prestaciones de una cámara termográfica sustituyendo solo la óptica que implementa el fabricante, algo que puede ser demostrado en este caso. Sin embargo, todos los fabricantes subrayan que las cámaras se calibran para la óptica que se implementa por defecto en su fabricación, el cambio de una lente deriva en la pérdida de esta calibración, produciendo valores erróneos en las medidas. En el caso de la Lepton se tiene una óptica muy pequeña, haciendo complicado el hecho de sustituir esta por otra nueva y luego volver a calibrar la cámara. No obstante, nada impide situar una nueva óptica frente a la antigua, de forma que pueda optimizar la energía que le llega.

La propuesta que finalmente se llevó a cabo es esta, observar que ocurre al superponer la óptica de la A40, una lente de visiblemente mejores prestaciones, a la Lepton, tal como se observa en la figura 5.14.



Figura 5.14: Superposición de ópticas para la captación de datos

La lente de la A40 tiene una distancia focal f de 72 mm, un FOV_V de 12° y un FOV_H de 11.7° . Solo comparando las distancias focales se obtiene una diferencia neta de 70 mm, una clara mejora en el enfoque. Desde luego, es interesante observar cómo cambia la escena registrada por la Lepton con este nuevo punto de vista, pues una posible línea de resultados es la mejora del flujo total captado por el sensor de la cámara. Entonces, no es arriesgado pensar que estos factores, unidos al nuevo número f de la lente, es decir, una mejor apertura para absorber radiación, propician que se recabe mucha más información de la misma superficie radiante.

La situación queda contrastada al observar la figura 5.15, donde se obtiene a priori una mejora en la imagen radiométrica. Se tiene el mismo número de píxeles para parametrizar una mayor cantidad de radiación procedente del hornillo, razón que puede llevar a un aumento de la precisión en las medidas con respecto a la toma de datos anterior al cambio de óptica. Sin embargo, se tiene que recalcar que no se ha dedicado tiempo al estudio profundo que incumbe el cambio de una óptica: los posibles efectos integración con un soporte fiable, cálculos del cambio de FOV, etc. La manera de implementar esta lente no es ni mucho menos profesional, por ello, no se tomarán como totalmente ciertos los resultados derivados de este ajuste. El objetivo es a groso modo contemplar si existen variaciones en los datos recibidos a partir de este cambio.



Figura 5.15: Mismos píxeles de resolución para ópticas distintas

Se decide, por lo tanto, anexar las nuevas curvas obtenidas de realizar la misma metodología, pero esta vez implementando la lente a la cámara Lepton. El proceso no cambia en absoluto, se necesitan los datos de flujo en baja ganancia para estimar la temperatura equivalente de la superficie, teniendo cuidado de cómo se sitúa la lente nueva frente a la antigua, para tener el mínimo error posible en las medidas.

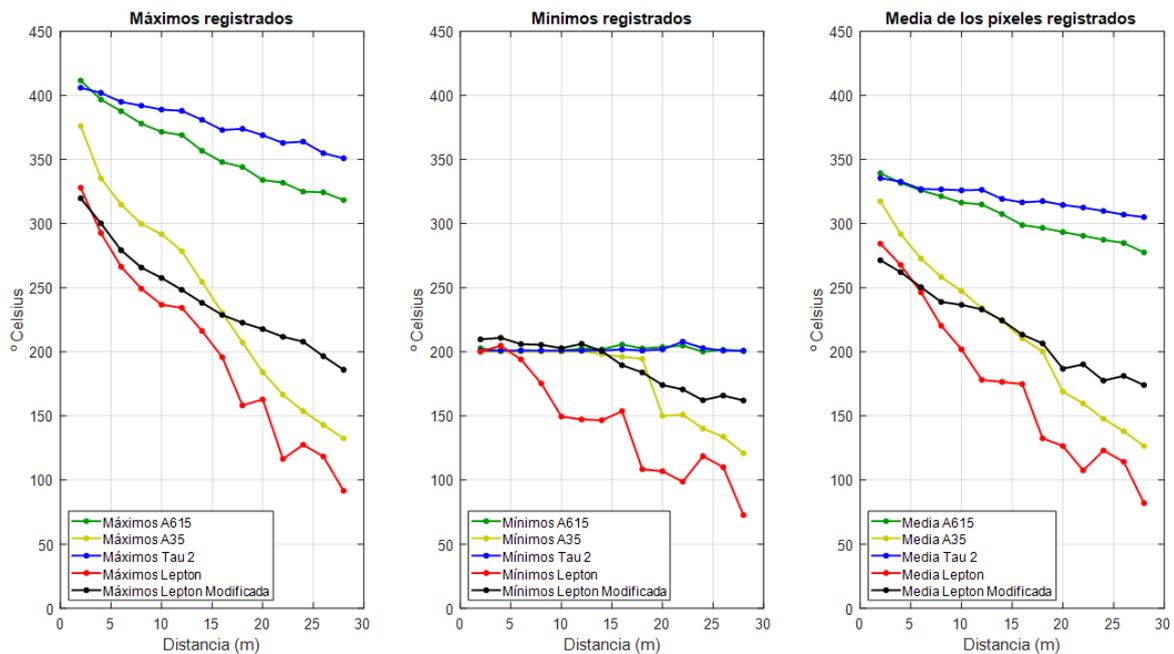


Figura 5.16: Curvas de temperatura de las cámaras usadas en el experimento

De los resultados representados en la figura 5.16 se pueden debatir varias conclusiones:

- Como era de esperar, las cámaras A615 y Tau 2 son los dispositivos que mejor mantienen sus medidas al aumentar la distancia, por lo tanto, se sostienen como referencia para estudiar el comportamiento de la Lepton.
- Si uno se centra en la curva roja, que representa los datos de la Lepton, se observan los síntomas referenciados en las figuras anteriores. Esta cámara está mucho más limitada por su óptica y resolución que las otras cámaras usadas en la medida, no solo en la formación de una imagen radiométrica, sino en los datos que se procesan por el sensor. Para todas las gráficas mostradas anteriormente los valores que capta la Lepton son mucho más bajos cuanto mayor es la distancia, pues la superficie estudiada cada vez se resuelve con menor precisión, llegando solo a captar un píxel de esta. En ese píxel queda integrado la mayor parte de componentes térmicas del hornillo, propiciando una medida que no se corresponde con la realidad.
- A partir de 10 metros la Lepton registra distintas reflexiones que dificultan el cálculo radiométrico, interfiriendo con la medida y confundiendo a veces como

parte del blanco estudiado. Por ello, se termina aplicando un ROI para recoger datos solo de los píxeles donde se identifica el hornillo.

- De la misma forma, se obtiene de los datos una pendiente poco lineal en cierto rango de distancias, así como unos saltos muy bruscos en comparación con las otras curvas. Estos resultados se observan fácilmente en la gráfica que corresponde a los mínimos captados por la cámara, donde en el cambio de 16 metros a 18 metros existe una desviación de casi 50 °C.

Se verifica una limitación física por parte de la Lepton a partir de cierta distancia, un hecho que no se nota tanto en las otras cámaras usadas. Esta limitación se comprueba sin necesidad de detallar si los valores marcados por la cámara se corresponden a la realidad, se relaciona más bien con los cambios bruscos de datos que se observan en la curva. Como es de esperar, una cámara con un menor rango de precios presenta unas peores prestaciones para según que aplicación. Si bien todas se basan en una tecnología similar de microbolómetros (Óxido de Vanadio) parece que los puntos fundamentales que las diferencian son sus ópticas y el número de microbolómetros implementados.

Por otro lado, un resultado interesante se desvela a raíz del cambio de óptica de la Lepton. No solo se nota una mayor suavidad en la pendiente de la recta, o que los saltos en temperatura son más pequeños en comparación con la curva roja de la cámara. En muchos de los puntos mostrados de la gráfica se observa una tendencia mucho más acorde con las referencias usadas en este experimento, la A615 y Tau 2. Por ejemplo, en la gráfica de máximos se puede comprobar que a partir de 16 metros la Lepton con óptica, obviando el hecho de que las lecturas son menores, sigue una pendiente muy similar a las de referencia. Este resultado es comprensible, la lente de la A40 es de muy altas prestaciones, la cantidad de radiación que le llega al sensor de la Lepton y su efectividad para focalizar esta iluminación derivan en una mejora sustancial de las lecturas. En la misma línea, sorprende mucho que a partir de 16 metros la energía captada por una óptica mayor y un sensor de poca resolución (Lepton), es igual a la energía captada por una óptica menor, pero con un sensor que dobla en píxeles al anterior (A35). A partir de esa distancia la primera siempre capta más que la segunda en todas las gráficas mostradas.

5.3. Pruebas a distancias lejanas

Todos los experimentos y resultados anteriores sirven para verificar el funcionamiento de la cámara Lepton. Al ser un micro módulo térmico de bajas prestaciones se necesitaba elaborar una serie de pruebas para registrar la tendencia general de las lecturas que provee, contando con los posibles errores, propiciados por píxeles defectuosos, precisión del modo de ganancia, los límites físicos de la cámara, etc. El objetivo final del TFG es, además del estudio y caracterización de la cámara, tener una primera toma de contacto con escenarios donde exista una gran distancia entre esta y una determinada masa emisora de radiación, concretamente un incendio.

Una primera hipótesis sobre este aspecto puede ser poco optimista, ya que se trabaja con una cámara de prestaciones limitadas a la hora formar una imagen radiométrica a partir de ciertas distancias, problema derivado fundamentalmente del conjunto óptica-sensor que la conforman. De esta manera, en este nuevo escenario se necesita contar con dos factores importantes que intervienen en el proceso de medición:

- **La distancia de seguridad.** La cámara tiene que situarse muy lejos del incendio para que no peligre la integridad física de esta. Ya no se consideran distancias menores a 30 metros, ya que este tipo de fenómenos pueden llegar a ser muy virulentos, por lo tanto, se llegan a especificar posiciones mucho mayores respecto al posible foco emisor.
- **La corrección del flujo para grandes distancias.** Se necesita contar con el hecho de que el flujo total se atenúa por la transmisividad de la atmósfera cuanta más distancia recorre, propiciando pérdidas notables en la señal. En estos casos entra en juego una corrección en las medidas más precisa que la aplicada hasta ahora. Por otro lado, es importante estimar la emisividad de la madera quemada, pues a grades temperaturas la diferencia con respecto al valor inicial es notable.

Sin embargo, el escenario donde suceden los incendios forestales es impredecible, los focos principales de un incendio pueden llegar a los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, una cantidad de radiación que no pasa desapercibida en el entorno. Para empezar, bastaría con que la cámara distinguiera esa singularidad respecto al resto de la escena, por ejemplo, a partir de una región de píxeles que se identifique con una temperatura muy superior, teniendo la

oportunidad de resolver y concluir que en dicha posición existe una situación anormal. En este caso, para tan grandes distancias se toma el mínimo punto medible por la Lepton como un solo píxel de la matriz. Si este píxel es capaz de resolver la existencia de un fuego (figura 5.17), se establece entonces un punto de partida para empezar a trabajar.

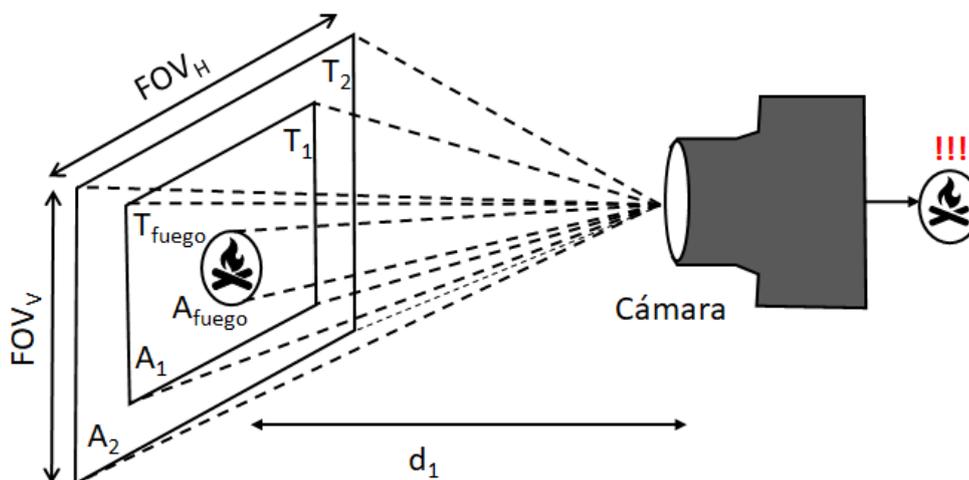


Figura 5.17: Identificación del foco emisor

Este es el punto en el que se basará todas las conclusiones sobre la posible viabilidad de la Lepton para estas necesidades, dejando abierta la vía hacia una posible corrección del flujo en el capítulo 6 de este trabajo. Siguiendo esta línea, para los casos de grandes distancias hay que tener en consideración un factor importante, la energía total incidente sobre el sensor se ve ampliamente atenuada principalmente por efectos atmosféricos. Es sencillo confundir las lecturas que se obtienen de la cámara termográfica, pues esta no distingue la distancia real que existe entre píxel y píxel, esto hace que el valor mostrado no se corresponda con una temperatura real. Por ejemplo, un punto caliente a 100 metros de distancia puede aparecer con lecturas similares que otro punto a 600 metros. Esto no se debe tomar como cierto, lo que puede estar sucediendo es que el flujo total de la región más alejada recorre una distancia mucho mayor que el más cercano, atenuándose en consecuencia. El resultado es que ambas regiones aparecen modeladas de igual forma, cuando lo más probable es que la más cercana se corresponda con una menor temperatura, pero esté mucho menos atenuada. Este efecto no era tenido en cuenta en los experimentos anteriores, pero a grandes distancias es necesario aplicar determinados tipos de ajustes para solventar el problema. La forma más sen-

cilla para esto es introducir manualmente un término corrector, por ejemplo, situando el punto más alejado a 600 metros y aplicar la corrección atmosférica pertinente para esa distancia, lo mismo sucede con el punto de 100 metros.

5.3.1. Puntos de observación de la quema

La quema controlada consiste en una pequeña superficie de madera ardiente de 3x3 metros, principalmente elaborada por el cabildo de Gran Canaria y sus operarios especializados. La temperatura del fuego ha sido medida con la ayuda de una sonda, remarcada con un círculo rojo en la figura 5.18. Por otro lado, también han sido recabados datos de humedad relativa y temperatura ambiente, teniendo en cuenta que son factores importantes para una futura corrección del flujo radiométrico y que deben ser referenciados en el momento del experimento, estos datos son visibles en la tabla 5.8.

En cuanto al terreno sobre el que se sitúa el foco radiante, como se ve en la figura siguiente, no se trata de una planicie, la base del fuego tiene una inclinación de aproximadamente 40° . Este emplazamiento ha sido elegido, entre otras razones, por este factor y teniendo en cuenta los puntos de observación donde se sitúan las cámaras usadas para la captura de datos, todos ellos a una altura menor que el emplazamiento del fuego. Es esta inclinación lo que propiciará una buena formación de imagen radiométrica, ya que la situación del fuego sigue siendo visible en todos los puntos de observación, incluso cuando la posición relativa de la cámara cambia a medida que se aumenta la distancia. Debido a esto, la proyección resultante en la matriz de píxeles de la cámara se mantiene estable y con pocos cambios para cierto rango de distancias.



Figura 5.18: Foco radiante del experimento

Las distintas tomas de datos se realizan en puntos diferentes de la zona, tal como se ve en la figura 5.19. Contando que cada punto está a una determinada distancia del fuego, se tiene en consideración que la variación del flujo será singular para cada caso. La meta es encontrar un rango de distancias apto, probablemente menor que el resto de las cámaras usadas en esta prueba, donde se pueda distinguir el foco del incendio y, además, el flujo recibido de este se diferencie de forma notable con respecto al entorno.

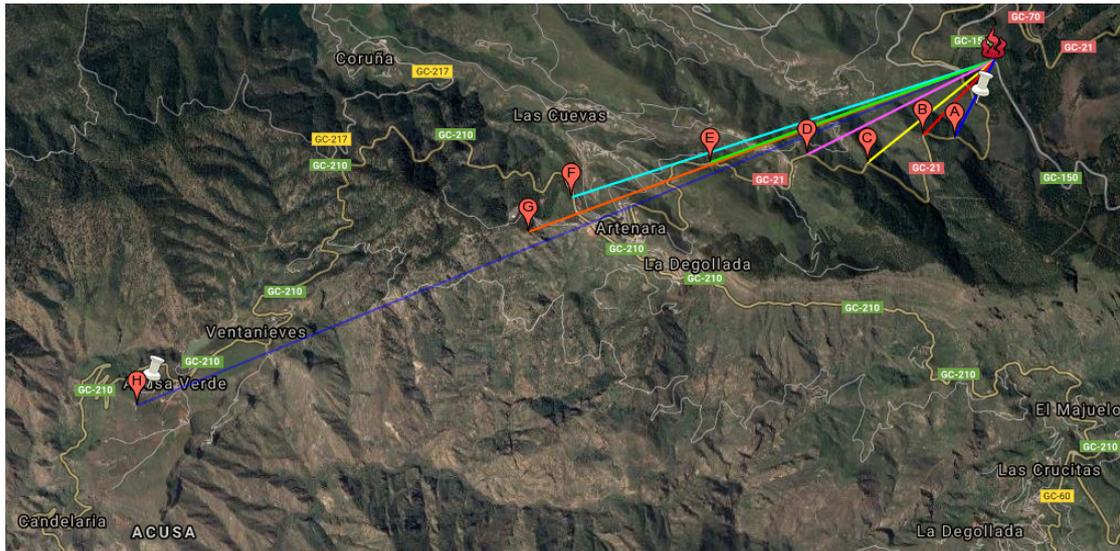


Figura 5.19: Puntos de observación desde Google Earth (I)

Como se referencia en la figura anterior hay un total de ocho puntos de observación distintos. En este caso se hablará de los puntos B, C, D, E y F, de los puntos A, G y H no se poseen fotos capturadas desde la Lepton. Para tener la mayor cantidad de muestras posibles se decide sustituir el punto A por el punto más cercano donde se capturan datos de forma improvisada, a 350 metros del fuego, denominando a este A'.

| Punto de observación | Hora | T. fuego | T. ambiente | Humedad relativa |
|----------------------|-------|----------|-------------|------------------|
| B | 10:36 | 920 °C | 19.9 °C | 42.0 % |
| C | 11:30 | 693 °C | 18.0 °C | 33.1 % |
| D | 11:55 | 864 °C | 18.0 °C | 25.1 % |
| E | 12:47 | 830 °C | 18.0 °C | 31.1 % |
| F | 13:30 | 830 °C | 18.8 °C | 33.1 % |

Tabla 5.8: Datos de la quema

Observaciones:

- La T. ambiente en el punto B fue tomada con la estación meteorológica que se llevaba junto con las cámaras (puede estar afectada del ambiente cercano a la carretera, etc.).
- Aunque A' no pertenezca a un punto específico de observación sigue siendo interesante estudiar la variación del flujo para la mayor cantidad de distancias posibles. No se sabe exactamente la temperatura del fuego en este punto de medida, pero por cercanía al punto B se le puede atribuir una temperatura similar.

En realidad, tal como se ha comentado antes, el foco radiante se encuentra a una mayor altitud que los puntos de observación, a aproximadamente 1592.2 metros de altitud según Google Earth. Por lo tanto, una mejor vista del recorrido hecho por los operarios se muestra en la figura 5.20, donde se observa la orografía general de la zona y la diferencia en las elevaciones de cada punto. Esta diferencia de altitud deriva en que el ángulo de observación α de la cámara, mostrado en la figura 5.21, cambia a medida que aumenta la distancia. Este factor influye en la representación radiométrica de la dimensión del foco, siendo esta menor que si se tomaran capturas de forma perpendicular al foco emisor, por lo tanto, conviene tener este cambio referenciado.



Figura 5.20: Puntos de observación desde Google Earth (II)

Las coordenadas de la quema son: latitud = 28.032633° , longitud = -15.618640° . Tomando como referencia la altura de este punto, se especifica en la tabla 5.9 los

datos geográficos correspondientes a cada punto de observación donde se realizaron las capturas radiométricas. El ángulo de observación de la cámara puede ser estimado con los datos recogidos, la aproximación más sencilla es a través de un triángulo rectángulo, teniendo en cuenta que su hipotenusa es la distancia entre el foco y los puntos. Los resultados son anexados a la tabla 5.9.

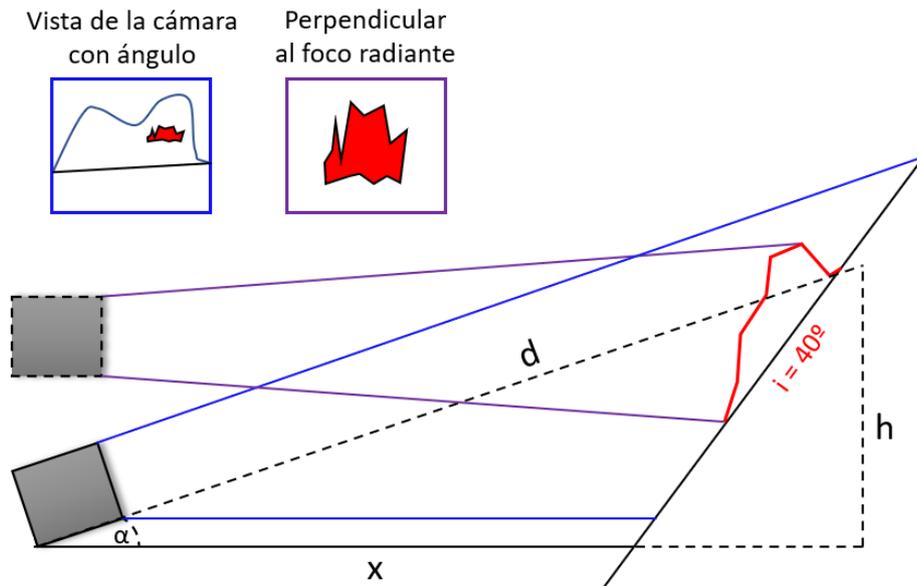


Figura 5.21: Ángulo α de la cámara

| Punto de observación | Latitud | Longitud | Distancia d | Altitud h | Ángulo α |
|----------------------|------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|
| B | 28.027599° | -15.624199° | 780 m | 125.3 m | 9.2° |
| C | 28.025636° | -15.628495° | 1250 m | 195.3 m | 8.9° |
| D | 28.026186° | -15.633171° | 1600 m | 222.5 m | 7.9° |
| E | 28.025619° | -15.640740° | 2300 m | 291 m | 7.3° |
| F | 28.023230° | -15.651509° | 3400 m | 392.8 m | 6.6° |

Tabla 5.9: Puntos geográficos de observación

La cantidad limitada de píxeles de la cámara modela el flujo que recibe la lente a una distancia concreta, con el ángulo de observación que forma esta con respecto al blanco y teniendo en cuenta la proyección de la fuente radiante. Para estudiar el resultado de estas imágenes se usará una paleta de colores distinta al gris utilizado hasta el momento, con la intención de apreciar mejor las componentes térmicas del escenario y entender a primera vista si se necesita corregir el flujo captado de la escena:

Punto A' - 350 metros

Como se ha comentado antes, el punto A' es un emplazamiento improvisado, por lo tanto, no se tienen referencias claras de altitud, ángulo, etc. Sin embargo, se considera una buena muestra al observar la matriz de datos resultante. En la figura 5.22 se registra que no es necesario establecer una corrección del flujo para observar que el foco principal de radiación se diferencia del resto del entorno.

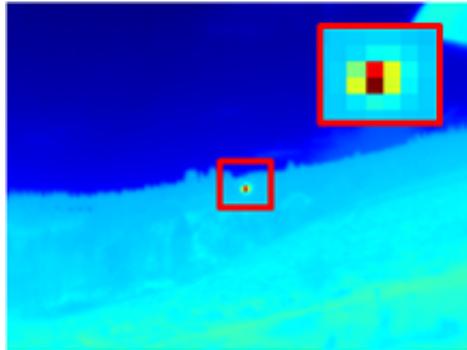


Figura 5.22: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto A'

Punto B - 780 metros

En el punto B la cámara capta unas lecturas de radiación cuyo valor es poco probable que pertenezca a una variable habitual del entorno, como se ve en la figura 5.23, no parece que las componentes térmicas de la geografía del terreno puedan provocar un falseamiento de la señal. Con respecto al punto A', el flujo presenta una atenuación apreciable después de 780 metros de trayecto.

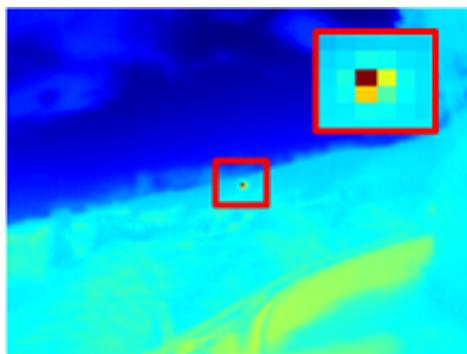


Figura 5.23: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto B

Punto C - 1250 metros

Con respecto al punto de observación C representado en la figura 5.24. Si bien es cierto que la Lepton distingue el foco radiante a esa lejanía, en ciertas situaciones resultaría muy sencillo confundirlo con el resto del entorno. Al leer la matriz de datos se observa que el flujo total que le llega a esta es diminuto, atenuado de tal forma que es imposible de resolver como un fuego y acercándose al valor leído sobre la orografía.

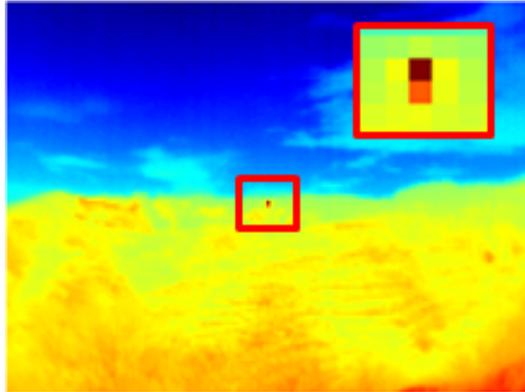


Figura 5.24: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto C

Punto D - 1600 metros

Este caso se ajusta al problema comentado anteriormente, el conato de fuego es casi imperceptible del resto del entorno, debido al aumento de la distancia. De hecho, si se observa con atención la esquina inferior derecha de la figura 5.25, se intuye solo por el color del montículo de tierra, que la cámara resuelve esa parte del paisaje con una mayor carga térmica, simplemente debido a su cercanía.

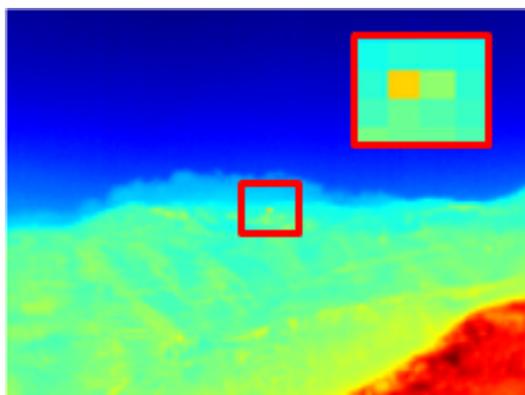


Figura 5.25: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto D

Punto E - 2300 metros

A partir del punto E la Lepton no distingue el foco emisor de radiación, con tanta distancia entre el fuego y la cámara, se hace imposible que esta detecte algo de forma pasiva.

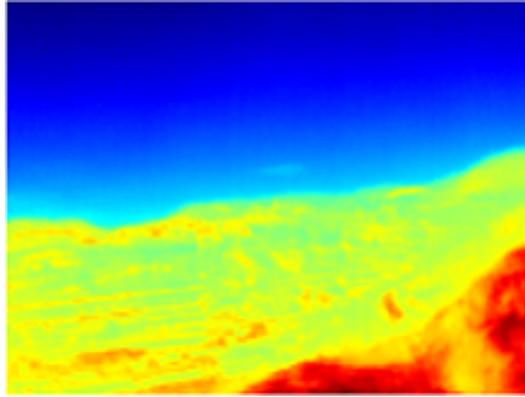


Figura 5.26: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto E

Punto F - 3400 metros

Por último, queda comentar que a distancias como las del punto F, mostrado en la figura 5.27, es imposible obtener algún dato clarificador por parte de la Lepton, esta no detecta nada más que el terreno montañoso de la escena.

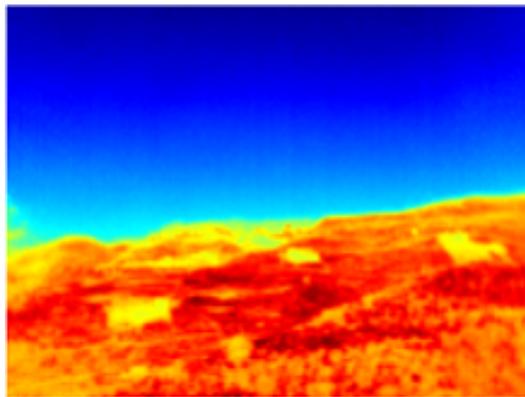


Figura 5.27: Imagen radiométrica de la Lepton en el punto F

Después de estudiar los valores brutos que ofrecen las imágenes radiométricas en cada punto de observación se llega a una serie de conclusiones:

Para empezar a plantearse la implementación de la cámara Lepton en un sistema final, cuya meta es la detección y seguimiento de líneas de fuego, se debe tomar en consideración los resultados de esta última sección. Teniendo en cuenta los factores anteriormente nombrados, además del conjunto óptica-sensor que conforman la Lepton, no parece que se pueda recurrir a distancias muy largas, esto se empezaba a intuir a medida que se realizaban las distintas pruebas que marcaban la tendencia general de la cámara. Lo más probable es que se tenga que situar el estudio para distancias menores al punto B, donde se puede empezar a discernir el flujo incidente sobre el sensor, correspondiente al fuego, e introducir las correcciones para el ajuste de esta señal.

En realidad, no es algo negativo, pues la cámara se encuentra en un rango de precios *ultra Low cost* si se compara con el resto de las cámaras termográficas del mercado, con las implicaciones técnicas que esto conlleva. Este factor siempre se ha tenido en cuenta y ha sido ratificado a lo largo del TFG. De hecho, los resultados obtenidos no la inhabilitan respecto otras cámaras de FLIR, solo la sesgan para unas distancias menores.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

Partiendo de los objetivos propuestos en este Trabajo Fin de Grado, se han conseguido los siguientes hitos:

- **Estudio y caracterización general de la Lepton.**

Se ha desarrollado toda una serie de estudios que ayudan a entender los campos que definen la cámara, el modelo físico implementado para corregir el dato crudo recibido por el sensor y las ecuaciones que permiten la conversión de este a temperatura. Todos los conceptos teóricos son respaldados con demostraciones prácticas que muestran las funcionalidades básicas de la cámara. De la misma manera, se comprueban muchas de las características especificadas por el fabricante de la cámara, como, por ejemplo, su rango dinámico de trabajo, algo superior a lo detallado por este.

- **Comprobación de las limitaciones técnicas de la cámara.**

Mediante varias pruebas se ha experimentado con el desempeño general de la Lepton para distintos rangos de distancia, temperatura y dimensión de la superficie estudiada, referenciando y debatiendo todos los resultados con gráficas y tablas de datos. De esta forma, se ha contrastado que existen ciertas limitaciones derivadas del conjunto óptica-sensor que la conforman. Este hecho está directamente relacionado con el coste de fabricación de la cámara, pues al ser un módulo radiométrico de muy pequeñas dimensiones no se le puede implementar una mejor capacidad de resolución u óptica

de grandes prestaciones, derivando finalmente en un bajo coste de adquisición, pero también unas prestaciones más acotadas.

La limitación física de la Lepton sale a la luz al comparar los datos de flujo que capta, en una misma medida experimental, con otras cámaras del mismo fabricante, de bastante mayor rango de precios y, por lo tanto, mejores prestaciones. Entre las diferencias más notables se encuentran:

- El decaimiento del flujo incidente sobre la cámara en diferencias de pocos metros para superficies muy calientes.
- La desviación de datos radiométricos fundamentalmente debida a la precisión en los modos de ganancia.
- La formación de una imagen radiométrica limitada a partir de cierto rango de distancias, un factor derivado de la escasa resolución del sensor que no permite la captación de muchos píxeles de datos.

– **Posible viabilidad de la Lepton para el seguimiento de líneas de fuego.**

Se ha probado que la Lepton es capaz de distinguir focos de gran temperatura a una distancia >500 metros en una situación de orografía abrupta. No obstante, se estima que se debe empezar el estudio en este campo para distancias menores a 700 metros, donde se resuelve el foco emisor como un posible fuego y se pueden empezar a aplicar distintos términos correctores. La posible línea de viabilidad de la Lepton se encontraría para este rango de distancias.

No obstante, que esta cámara distinga un fuego a cierta distancia no significa que finalmente se pueda contar con ella para un despliegue efectivo. Se deben tener en cuenta otros factores para asegurar un correcto desempeño durante la vida útil del producto, como, por ejemplo, la cantidad de tiempo que la cámara está funcionando y recabando datos. Esta es una variable importante en la implementación del dispositivo, ya que las lecturas que ofrece la Lepton pueden presentar desviaciones que deben ser tenidas en consideración y corregidas, sobre todo en situaciones de campo abierto, donde aparecen factores como el sol o distintos fenómenos climatológicos.

– Viabilidad económica de la Lepton.

Para hablar de viabilidad económica se debe tener en cuenta que la cámara utilizada en este TFG se encuentra dentro de un abanico de dispositivos para diferentes perfiles de estudio. Por ejemplo, un perfil para distinguir el fuego a grandes distancias implica fundamentalmente dos cosas: una óptica de buenas prestaciones para abarcar, enfocar y recabar datos de un área determinada, además de una resolución capaz de modelar este factor. Esto es un hecho que encarece mucho el coste del sistema final que se desea implementar.

La Lepton se encuentra en un rango de precios muy inferior al resto de las cámaras nombradas en este trabajo. Por lo tanto, su perfil queda sesgado a unas distancias menores y la conclusión debe basarse en esto. Para tener una referencia, el precio actual aproximado de estas cámaras se detalla en la siguiente tabla:

| Cámaras | FLIR A615 | FLIR A35 | FLIR Tau 2 | FLIR Lepton |
|------------|-----------|----------|------------|-------------|
| Precio (€) | 16.000 | 4.200 | 6.000 | 175 |

Tabla 6.1: Precio de las cámaras de FLIR utilizadas

Como se observa en los datos detallados anteriormente, la posible integración de una cámara como la Lepton puede derivar en un ahorro sustancial por parte del usuario. De hecho, aunque se terminen adquiriendo e implementando más de una, esto seguiría siendo similar, ya que la diferencia entre la Lepton y la cámara más barata, nombrada en la tabla 6.1, es de 4.000 euros. La decisión de implementar una cámara como la Lepton en un sistema final recae sobre las necesidades de este. Para grandes distancias es posible que se necesite una integración de cámaras termográficas como la Tau 2 (teleobjetivos), que permiten registrar lecturas desde posiciones lejanas con un determinado grado de precisión, algo imposible de alcanzar con la Lepton. Por este motivo, el perfil de la Lepton debe especificarse para los casos donde no se necesite tanta distancia entre el posible fuego y la posición del dispositivo, teniendo en cuenta que el procesado final de datos es suficiente para resolver la existencia de fuego. Siguiendo esta línea y debido al coste económico, la implementación de más de una Lepton podría suponer una mejora en área final abarcable por el sistema, de forma que lo que antes no se conseguía con una captura radiométrica ahora si fuera posible.

- **Integración de la cámara en una arquitectura Windows y en un sistema embebido derivado de Linux.**

A partir del estudio de sus interfaces hardware y software se ha integrado el micro módulo en ordenadores con Windows y Linux. La implementación en Windows es comentada de forma extensa en el anexo I, de tal forma que se explica con detalles el manejo del SDK y los cambios en los campos necesarios para conseguir el crudo de la escena. Por otro lado, se consigue una integración funcional de la cámara en una Raspberry Pi, aprovechando su precio asequible y librerías de código abierto. Esta es comentada en el anexo II del trabajo, donde queda recogida la forma de captar el flujo deseado a través del lenguaje Python.

6.2. Líneas futuras

De las conclusiones expuestas en el apartado anterior se especifican las siguientes líneas futuras:

- **Integración en otros sistemas.**

Aprovechar las facilidades de la cámara para integrarla en todo tipo de sistemas compactos, estimando cual es el óptimo en relación desempeño/coste.

- **Posible implementación de una óptica alternativa.**

Una de las mayores limitaciones de la cámara es la lente que viene por defecto, resultado de las pequeñas dimensiones de la propia Lepton. Se puede abrir una línea de estudio para la integración real de una óptica con mejores prestaciones.

- **Ajuste radiométrico del flujo para grandes distancias.**

A la hora de establecer la corrección del flujo se debe tener en cuenta lo comentado a lo largo del trabajo, factores como la emisividad, transmisividad o temperatura del entorno son efectos que se necesitan modelar. Sin embargo, en situaciones que incumben una respuesta rápida para salvar la mayor parte de recursos materiales o incluso vidas humanas, no se pueden establecer valores concretos, pues terminarían falseando las medidas ante un cambio brusco en el escenario, como puede ser, por ejemplo, la

aparición de niebla o calima. Estos parámetros necesitan ser actualizados constantemente mediante herramientas externas a la cámara termográfica, ya que no siempre se contará con operarios que recaben este tipo de datos de forma manual. Por ejemplo, centrando el estudio en el caso de incendios forestales, existen vías para asegurar unos factores relativamente válidos que ajusten el flujo incidente del sensor:

- **Emisividad.** Ya sea madera, pasto o distintas especies arbóreas, la emisividad de estas superficies no se mantiene constante durante un incendio, cuanto más tiempo pasa más aumenta la emisividad de estos materiales, pues se acercan a un color carbonizado. Una vía de solución para mantener bien parametrizado este factor es tener una serie de rangos de emisividad para diferentes sectores del espectro térmico, que podría mantenerse como una base de datos constante en la memoria del sistema.
- **Humedad relativa y temperatura del entorno.** Esta serie de valores dependen de una gran cantidad de variables: la altitud del punto, posición, meteorología, climatología, etc. No obstante, existen herramientas como la que proporciona AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), permitiendo acceder a su base de datos para obtener estos valores. La tarea consistiría en remitir esta información a la memoria de la cámara termográfica y luego integrarlos en la ecuación que ajusta el flujo.

Modelar como influye la atmósfera en la radiación que emite un cuerpo no es trivial. Por ejemplo, existen muchos modelos físicos o simuladores avanzados para estimar la transmisividad de la atmósfera en el infrarrojo, teniendo en cuenta las condiciones de la medida. Elegir el procedimiento óptimo que garantice unos resultados aceptables lleva tiempo y una ristra de cálculos a tener en mente. Por esto, se deja en consideración una posible vía de solución para este, basada en las tablas de Passman–Larmore [14].

A través de unos estudios experimentales hechos por Passman y Larmore en 1956, se pueden estimar las características básicas del coeficiente de transmisividad de la atmósfera τ_{atm} con cierta precisión. Las variables que introducen durante sus demostraciones empíricas dependen básicamente de la composición de los gases que influyen en las medidas radiométricas de la cámara, siendo los más importantes los coeficientes

absorbentes del vapor de agua τ_{H_2O} y del dióxido de carbono τ_{CO_2} . La capacidad de absorción depende en gran medida del número de moléculas absorbentes y de la distancia d que atraviesa la radiación en el medio absorbente. El modelado tradicional consiste en que estas moléculas existen dentro de un cilindro teórico de diámetro D , como se observa en la figura 6.1, cuya longitud equivale a la distancia entre la cámara y el blanco. La altura de este cilindro es una de las variables necesarias a introducir en las tablas de Passman y Larmore, junto con la longitud de onda correspondiente.

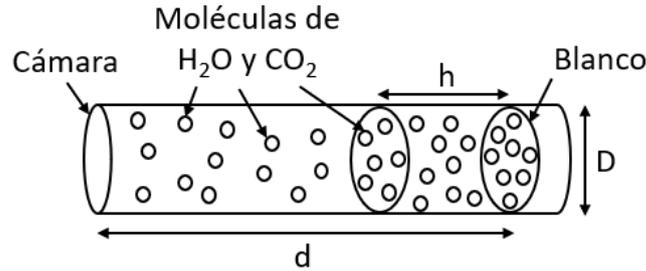


Figura 6.1: Cilindro teórico que modela el trayecto del flujo. Adaptado de [14]

Los cálculos pertinentes se desglosan en [14], dependiendo estos de la humedad relativa, distancia, temperatura de la atmósfera, etc. Pero en esencia se resume en introducir todas las variables de la medida en la siguiente ecuación:

$$h(T_{atm}, d, w\%) = (1.6667 \cdot 10^{-4} \cdot T_{atm}^3 + 10^{-2} \cdot T_{atm}^2 + 3.8333 \cdot 10^{-1} \cdot T_{atm} + 5) \cdot w\% \cdot d \cdot 10^{-3} \quad (6.1)$$

Siendo T_{atm} la temperatura de la atmósfera, $w\%$ la humedad relativa y d la distancia entre el blanco y la cámara.

Una vez obtenida la altura del cilindro se tiene que acudir a las tablas parametrizadas para hallar los coeficientes absorbentes de cada gas a partir de la longitud de onda de trabajo, que a su vez depende de la temperatura de la superficie radiante, cambiando a medida que suceden aumentos o decrementsos en esta. Al obtener estos coeficientes se multiplican, su resultado estima la transmisividad de la atmósfera para ese caso. Si se aplica este criterio para cada una de las distancias representadas en los píxeles del sensor, se obtendría una corrección relativamente válida del flujo. El problema reside en conocer con exactitud esa distancia [40], no sencilla de obtener sin referencias como la localización del experimento o el propio foco emisor.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] C. Montiel, J. Solana y G. Herrero, *Sistemas de Detección de Incendios Forestales en España*. Revista Montes, 2009.
- [2] V. A. et al, «Desarrollo de nuevas técnicas para detección y Seguimiento de Líneas de Fuego en incendios forestales basado en sensores térmicos móviles de despliegue rápido (SeLiF)», en. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2012-2015*, 2017.
- [3] J. Perez-Mato, V. Araña y F. Cabrera-Almeida, «Real-time autonomous wildfire monitoring and georeferencing using rapidly deployable mobile units», *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 31, n.º 2, págs. 6-15, 2016.
- [4] V. A. et al, «Sistema de visión de umbral térmico georreferenciado: aplicación a la detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales», *Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAAA)*, 2015.
- [5] Z. Morantes, Á. Ochoa y A. I. Hernández, «SIMULACIÓN DE LA RADIACIÓN ESPECTRAL DE CUERPO NEGRO A DIFERENTES TEMPERATURAS», *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 2008.
- [6] F. Systems, «8 Things engineers should know about thermal imaging», FLIR Systems Inc., inf. téc., 2016.
- [7] R. Vandersmissen, «Night-vision camera combines thermal and low-light-level images», *Photonik*, 2008.
- [8] F. Systems, «Introduction to thermography basics», FLIR Systems Inc., inf. téc., 2014.
- [9] A. T. P. Izquierdo, *La teoría cuántica. Max Planck. La revolución de lo muy pequeño*, S. RBA Coleccionables, ed. National Geographic Magazine España, 2014.

- [10] G. M. Carlomagno y G. Cardone, «Infrared thermography for convective heat transfer measurements», *Springerlink*, 2010.
- [11] R. U. et al, «Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing», *MDPI*, 2014.
- [12] F. Systems, «User's manual FLIR Ax35 series.», FLIR Commercial Systems, inf. téc., 2015.
- [13] F. Systems, «5 Factors influencing radiometric temperature measurements», FLIR Systems Inc., inf. téc., 2016.
- [14] W. Minkina y D. Klecha, «Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements», en. *JSSS*, 2016, vol. 5, págs. 17-2.
- [15] Z. Zhang, B. Tsai y G. Machin, *Radiometric Temperature Measurements: II. Applications*, T. L. Albert C. Parr, ed. Revista Montes, 2009.
- [16] F. Systems, *Relación de tamaño de punto*, 2018. dirección: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/17-1465/17-1465_ES.pdf.
- [17] GIMIM, *Marcas De Medición Y Distancia: FOV, IFOV, IFOVmeas*, 2020. dirección: <https://ginim.com/testo/academia/termografia-basica/disen-y-funciones/marcas-de-medicion-y-distancia-FOV-IFOV-IFOVmeas/>.
- [18] F. Systems, *Fieldometer Field of View Simulator*, 2020. dirección: https://www.flircameras.com/fov_tool.
- [19] C. Prado, «Cámaras térmicas», *.tecnología*, 2012.
- [20] D. Svärd, C. Jansson y A. Alvandpour, «A readout IC for an uncooled microbolometer infrared FPA with on-chip self-heating compensation in 0.35 μm CMOS», *Analog Integr Circ Sig Process*, 2013.
- [21] R. Bhan y R. S. et al, «Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques», *Defence Science Journal*, 2009.
- [22] L. V. Herrero, «Fabricación y caracterización de bolómetros de Si:Ge;o utilizando técnicas de micromecanizado del silicio», Tesis doct., Universidad Politécnica de Madrid | E. T. S. I de telecomunicación, 2000.

- [23] J. C. G. Santos y B. R. Pedroza, «Caracterización de un arreglo de 32 microbolómetros», Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, inf. téc., 2014.
- [24] A. Voshell y N. D. D. et al, «Materials for microbolometers: vanadium oxide or silicon derivatives», en *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging*, 2017.
- [25] M. Abdel-Rahman y M. Z. et al, «Temperature-Dependent Resistive Properties of Vanadium Pentoxide/Vanadium Multi-Layer Thin Films for Microbolometer and Antenna-Coupled Microbolometer Applications», *MDPI*, 2019.
- [26] B. W. et al, «Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer», *ELSEVIER*, 2013.
- [27] M. A.-R. et al, *Fabrication and design of vanadium oxide microbolometer*, 2017. dirección: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4975416>.
- [28] C. Ringqvist y G. M. et al, «FLIR project - modeling noise in bolometer signal», FLIR Systems Inc y KTH Royal Institute of Technology Stockholm, inf. téc., 2018.
- [29] V. Mackowiak y J. P. et al, «NEP – Noise Equivalent Power», THORLABS, inf. téc., 2015.
- [30] W. L. Wolfe y P. W. Kruse, *THERMAL DETECTORS*, 2001. dirección: http://photonics.intec.ugent.be/education/IVPV/res_handbook/v1ch19.pdf.
- [31] F. Systems, *What is the relationship between lens f-number and camera performance or NEdT?*, 2019. dirección: <https://www.flir.co.uk/support-center/oem/what-is-the-relationship-between-lens-f-number-and-camera-performance-or-nedt/>.
- [32] F. Systems, «Toolkit IC2 Dig 16: Developers Guide 1.01 for AGEMA 550, 570, ThermaCAM PM 5 x 5 and the ThermoVision Family», FLIR Systems INC, inf. téc., 2001.
- [33] F. Systems, *FLIR LEPTON 3 and 3.5*, 2018. dirección: <https://flir.netx.net/file/asset/15529/original>.

- [34] F. Systems, «FLIR Lepton with Radiometry Quicstart Guide», FLIR Commercial Systems, inf. téc., 2018.
- [35] F. Systems, *FLIR LEPTON Engineering Datasheet*, 2018. dirección: <https://flir.netx.net/file/asset/13333/original>.
- [36] F. Systems, «Advanced radiometry. application note.», FLIR Commercial Systems, inf. téc., 2013.
- [37] F. Systems, «FLIR Camera Adjustments LWIR Vide Camera», FLIR Commercial Systems, inf. téc., 2014.
- [38] F. Systems, *Basic AGC for radiometric Lepton images*, 2019. dirección: <https://lepton.flir.com/application-notes/basic-agc-for-radiometric-lepton-images/>.
- [39] F. Systems, *FLIR LEPTON Software Interface Description Document (IDD)*, 2018. dirección: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lepton-software-interface-description-document.pdf>.
- [40] V. A. et al, «Challenges of an Autonomous Wildfire Geolocation System Based on Synthetic Vision Technology», *Sensors*, vol. 18, n.º 11, pág. 3631, 2018.
- [41] ULPGC, *Boletín Oficial de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*, 2019. dirección: https://www.ulpgc.es/sites/default/files/ArchivosULPGC/boulpgc/BOULPGC/boulpgc_junio_2019_3_junio.pdf.
- [42] COITT, *Derechos de visado 2020*, 2020. dirección: https://www.coit.es/sites/default/files/20191126_tarifas_2020_visado_v2.pdf.
- [43] F. Systems, *Getting-started with Lepton on Windows*, 2019. dirección: <https://lepton.flir.com/getting-started/>.
- [44] Groupgets, *purethermal1-uvc-capture*, 2019. dirección: <https://github.com/groupgets/purethermal1-uvc-capture>.

Parte II

Presupuesto

Presupuesto

P.1. Introducción

En las secciones siguientes se desarrolla el valor monetario asignado a las distintas partidas presupuestarias consideradas en este trabajo.

- Recursos materiales.
 - Recursos hardware.
 - Recursos software.
- Recursos humanos.
- Redacción del documento.
- Derechos de visado del COITT (Colegio Oficial Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones).
- Gastos de tramitación y envío.

Analizados todos estos puntos, se aplicarán los impuestos vigentes y se calculará el coste total.

P.2. Recursos Materiales

Con este concepto se agrupan los gastos que vienen dados por el uso de los recursos hardware y software. La forma de modelar el coste final será mediante la amortización lineal (P.1), teniendo en cuenta que no se tomará en consideración el valor de mantenimiento y que el valor residual (valor de los elementos al transcurrir su vida útil) es

nulo. El coste final solo tendrá en cuenta el periodo de uso de cada uno de los equipos durante el transcurso del TFG.

$$C_f = \frac{V_{ad} - V_{res}}{A_u} \quad (\text{P.1})$$

Donde:

C_f es el coste final, V_{ad} el valor de adquisición, V_{res} el valor residual y A_u los años de vida útil.

P.2.1. Equipos Hardware

Para calcular los costes se tiene en cuenta que los equipos fueron adquiridos antes de la realización de este TFG. Se considera que la vida útil de la cámara y el ordenador usado es de 4 años. Mientras que para la Raspberry Pi 3 modelo B y la placa Purethermal 2 es de 3 años. El resultado de los costes asociados a los recursos materiales hardware son los que se muestran en la tabla P.2.

Tabla P.2: Coste de equipos hardware

| Recursos Hardware | | | | |
|-----------------------------------|---------|----------------------|--------------------|-------------|
| Descripción | Tiempo | Valor de adquisición | Amortización anual | Coste final |
| FLIR Lepton 3.5 | 4 meses | 182.82 € | 45.71 € | 11.43 € |
| PureThermal 2 | 4 meses | 89.85 € | 29.95 € | 7.49 € |
| Raspberry Pi 3 model B 1GB | 2 meses | 40 € | 13.33 € | 6.66 € |
| ASUS T100HA-FU030T | 4 meses | 349.00 € | 87.25 € | 21.81 € |
| Total: | | 661.67 € | 176.23 € | 47.39 € |

Por consiguiente, el coste final para equipos hardware es de CUARENTA Y SIETE EUROS Y TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS.

P.2.2. Equipos Software

Para la realización de este TFG se dispusieron los recursos software mostrados en la tabla P.3. Como se hizo en la parte de recursos hardware, el coste final depende del tiempo de utilización de cada uno de ellos durante el período de trabajo correspondiente, considerándose en este caso una vida útil de 3 años para cada uno de ellos. La licencia de MATLAB Y Microsoft Office es proporcionada por la ULPGC, por esto quedan referenciadas con un valor de adquisición de 0.00 €.

Tabla P.3: Coste de equipos software

| Recursos Software | | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|
| Descripción | Tiempo | Valor de adquisición | Amortización anual | Coste final |
| MATLAB R2019b | 4 meses | 0.00 € | 0.00 € | 0.00 € |
| SO Linux OpenSUSE | 4 meses | 0.00 € | 0.00 € | 0.00 € |
| SO Windows 10 | 4 meses | 126.37 € | 31.59 € | 7.90 € |
| Microsoft Office | 4 meses | 0.00 € | 0.00 € | 0.00 € |
| Pycharm | 4 meses | 0.00 € | 0.00 € | 0.00 € |
| JetBrains Rider | 4 meses | 0.00 € | | |
| SDK FLIR Lepton | 4 meses | 0.00 € | 0.00 € | 0.00 € |
| Total: | | 126.37 € | 31.59 € | 7.90 € |

Por consiguiente, el coste final para equipos software es de SIETE EUROS Y NOVENTA CÉNTIMOS.

P.3. Recursos Humanos

Este es el coste asociado al proyectando, que ha empleado 4 meses a media jornada en las tareas de estudio previo, integración de la cámara, realización de medidas y documentación. Para el cálculo se ha tenido en cuenta que el proyecto se desarrolla dentro del entorno de investigación de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, el tipo de tarifa aplicada es la correspondiente al personal técnico (grado) según la

tabla de contrataciones de personal con cargo de proyectos, programas, convenios y contratos, correspondiente al BOULPGC de junio de 2019 [41]. Así, el coste a tiempo parcial (4 horas diarias) es el que se muestra en la tabla P.4.

Tabla P.4: Coste de recursos humanos

| Recursos Humanos | | | |
|-------------------|---------------------|---------|----------|
| Personal | Coste total mensual | Tiempo | Total |
| Ingeniero Técnico | 711.90 € | 4 meses | 2847.6 € |

El coste total de recursos humanos es de DOS MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS Y SEIS CÉNTIMOS.

P.4. Redacción del documento

El importe de la redacción del proyecto se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R = 0.07 \cdot P \cdot C_n \quad (\text{P.2})$$

Donde:

P es el presupuesto del proyecto.

C_n es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto. En este caso el coeficiente C_1 está fijado a 1.00 para presupuestos menores a 30.050 €.

En la tabla P.5 se muestra el presupuesto calculado hasta el momento. Por lo que los costes derivados de la redacción del documento se obtienen sustituyendo los valores en la ecuación (P.2).

Tabla P.5: Presupuesto parcial

| Recurso | Coste |
|------------------------------|------------------|
| Recursos Materiales Hardware | 47.39 € |
| Recursos Materiales Software | 7.90 € |
| Recursos Humanos | 2847.6 € |
| Total: | 2902.89 € |

$$R = 0.07 \times 2902.89 \times 1 = 203.20 \text{ €}$$

El coste de redacción asciende a un total de DOSCIENTOS TRES EUROS Y VEINTE CÉNTIMOS.

P.5. Derechos de visado del COITT

Para proyectos de carácter general [42], los derechos de visado se calculan de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$0.006 \cdot P_1 \cdot C_1 + 0.003 \cdot P_2 \cdot C_2 \quad (\text{P.3})$$

Donde:

P_1 = Presupuesto general para este proyecto.

P_2 = Presupuesto de ejecución material que corresponde a la obra civil.

C_1 = Coeficientes Reductores (C) correspondientes a P1.

C_2 = Coeficientes Reductores (C) correspondientes a P2.

Por lo dicho anteriormente el coeficiente C_1 está fijado a 1.00. En este caso, para el desarrollo de este TFG no se ha requerido obra civil por lo que el valor de P_2 es 0.00 €. De la misma manera, el valor del presupuesto P_1 se calcula sumando los costes de las secciones anteriores. Esto viene incluido en la tabla P.6.

Tabla P.6: Presupuesto con el coste de redacción

| Recurso | Coste |
|------------------------------|------------------|
| Recursos Materiales Hardware | 47.39 € |
| Recursos Materiales Software | 7.90 € |
| Recursos Humanos | 2847.6 € |
| Redacción del documento | 203.20 € |
| Total: | 3106.09 € |

Se sustituyen los valores en la ecuación (P.3).

$$R = 0.006 \times 3106.09 \times 1 = 18.64 \text{ €}$$

El coste por derecho de visado es de DIECIOCHO EUROS Y SESENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

P.6. Gastos de tramitación y envío

Cada documento visado por vía telemática tiene un coste de 6.00 € según [42].

P.7. Aplicación de impuestos y coste final

El resultado final con todos los apartados desglosados se encuentra en la tabla P.7, estableciendo el coste total del trabajo presentado.

Tabla P.7: Presupuesto total

| Presupuesto Final | |
|------------------------------------|------------------|
| Partidas | Totales |
| Recursos Materiales | |
| - Recursos Hardware | 47.39 € |
| - Recursos Software | 7.90 € |
| Recursos Humanos | 2847.6 € |
| Total parcial: | 2902.89 € |
| Redacción del documento | 203.20 € |
| Visado del COITT | 18.64 € |
| Gastos de tramitación y envío | 6 € |
| Total: | 3130.76 € |
| IGIC (7%): | 219.15 € |
| Total después de impuestos: | 3349.91 € |

El presupuesto total teniendo en cuenta los impuestos asciende a TRES MIL TRES-CIENTOS CUARENTA Y NUEVE EUROS Y NOVENTA Y UNO CÉNTIMOS.

Las Palmas de Gran Canaria a 19 de Julio de 2020

Fdo.:

Parte III

Anexos

Anexo A

Integración de la cámara en Windows

Para llevar a cabo la integración de la cámara hay que tener en cuenta tanto su interfaz software, es decir, sentencias de comunicación para obtener los datos necesarios, como hardware, que es el tipo conexionado y las especificaciones propias de la cámara (tabla A.1). Con la intención de completar el primer objetivo marcado en el TFG, lo que interesa conocer son las instrucciones que hacen posible obtener imágenes radiométricas, necesarias para el resto del trabajo que se realiza.

Integración mediante USB

La entidad GroupGets ha elaborado la placa PureThermal 2 (figura A.1 y tabla A.2), pensada para que el módulo radiométrico Lepton pueda usarse en arquitecturas como Windows, Linux o macOS. Este dispositivo se trata básicamente de una *webcam* conectada por USB que facilita una integración sencilla, solo se necesita insertar la Lepton en la placa de manera que los pines queden de forma correcta.



Figura A.1: Placa PureThermal 2

El fabricante proporciona una aplicación soportada en Windows que permite estudiar los distintos parámetros de la cámara de forma intuitiva, como se observa en la figura A.4. Simplemente se necesita acceder a la web de la Lepton y descargar el software [43]. Una vez hecho, se inserta el módulo en la placa PureThermal 2 y se conecta a un ordenador vía USB-microUSB, los componentes necesarios se muestran en la figura A.2. Esta interfaz software ofrece al usuario la posibilidad de cambiar los formatos de vídeo, el control automático de ganancia, el factor de campo plano, etc. Siendo razonablemente útil para familiarizarse con los parámetros y configuraciones de la cámara.

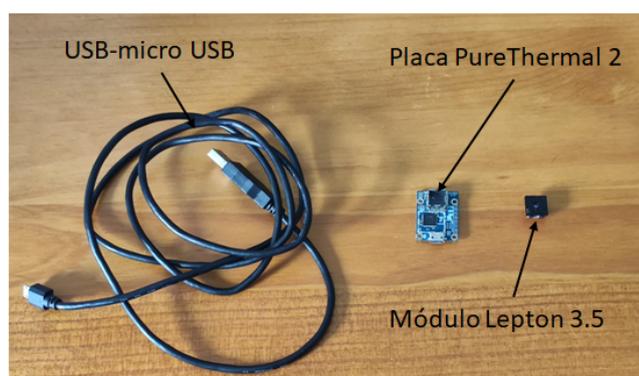


Figura A.2: Componentes necesarios para la integración

Sin embargo, para los desarrolladores, FLIR proporciona un SDK que permite un control bastante amplio de las configuraciones y campos fundamentales de la cámara.

Manejo general del SDK

Se basa en un mecanismo para transmitir información a través de puertos de comunicación específicos. Estos puertos son identificados si se devuelve de forma exitosa una operación de apertura, mientras que cada función del SDK requiere de un puerto válido como parámetro para identificar por donde viaja la orden. Normalmente solo un puerto es abierto y se utiliza en cada llamada de función.

El SDK divide las interfaces del software en subsistemas o módulos independientes. Cada módulo se identifica con un ID (*Identifier*), teniendo medios para recuperar datos (*get*) o modificarlos (*set*). Algunos también facilitan operaciones o métodos que son

llamados a través de comandos, ubicados dentro de las librerías dinámicas proporcionadas por el fabricante. Para invocar estas funciones se tiene que ejecutar un determinado código en el lenguaje C#, por lo tanto, se necesita de un entorno de programación como Visual Studio o JetBrains Rider si se quiere establecer una primera toma de contacto.

Para empezar a trabajar con el SDK se tienen que importar las referencias que permiten utilizar los “.dll” que llaman a las funciones. Por ello se crea un nuevo proyecto, una aplicación consola que por defecto tiene la clase C# donde se ejecutarán las sentencias.

Los pasos que seguir después se muestran en la figura A.3:

1. Click derecho en “Dependencies” y “add Reference”.
2. Click en “Add from”.
3. Se selecciona el archivo “LeptonUVC.dll”.

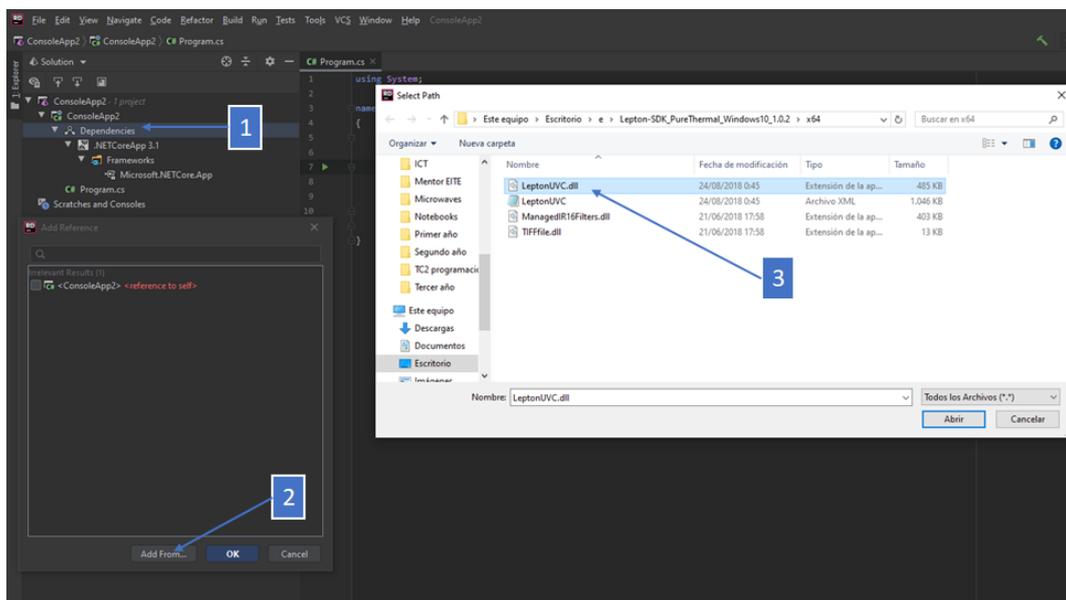


Figura A.3: Activar dependencias desde JetBrains Rider

Una vez importadas las referencias se puede empezar con el estudio de los campos de la cámara, estos son: *Rad*, *Oem*, *Agc*, *Vid*, *Sys* y *Port*. Cada uno de ellos tiene funciones específicas para poder controlar la cámara. Con la intención de acceder a los parámetros específicos de estos campos el SDK especifica el espacio de nombres Lepton, capturando toda la funcionalidad de la API (*Application Programming Interface*). Esta

contiene la clase Lepton.CCI que maneja, adquiere y modifica los valores en la cámara a medida que se ejecutan los comandos.

En este trabajo una de las pruebas hechas con la Lepton consistía en extraer el flujo electromagnético que le llega al sensor, pues por ahora no interesa la temperatura equivalente que proporciona la cámara sin una corrección previa. Para conseguir esto se necesita desactivar el modo TLinear, activado por defecto en el módulo radiométrico.

Listing A.1: Llamada de los métodos del .dll desde C# (1)

```
1 using System;
2 using Lepton;
3 namespace CsharpLepton
4 {
5     class Program
6     {
7         static void Main(string[] args)
8         {
9             // Se obtiene el objeto lepton a traves de la interfaz usb
10            var devices = Lepton.CCI.GetDevices();
11            var device = devices[0];
12            var lepton = device.Open();
13
14            // AGC desactivado, Radiometria activada y TLinear desactivado
15            lepton.agc.SetEnableState(Lepton.CCI.Agc.Enable.DISABLE);
16            lepton.rad.SetEnableState(Lepton.CCI.Rad.Enable.ENABLE);
17            lepton.rad.SetTLinearEnableState(Lepton.CCI.Rad.Enable.DISABLE);
18
19            // Se lee el estado de los campos actuales
20            Console.WriteLine("Radiometria: " + lepton.rad.GetEnableState());
21            Console.WriteLine("TLinear: "+
22                lepton.rad.GetTLinearEnableState());
23        }
24    }
```

El código del Listing A.1 muestra como:

1. Se accede al CCI para leer si existe algún modelo de Lepton conectado vía USB.

2. Obtener el primero que se encuentre bajo la variable *device* y acceder a sus funcionalidades creando la variable *lepton*.
3. Siguiendo estos pasos se abre la comunicación con la cámara gracias a las funcionalidades que incluye el SDK, sólo queda llamar o reemplazar los parámetros de los campos con los *get* y los *set*.

Por otro lado, como se ha comentado en apartados anteriores, la necesidad de cambiar los parámetros que afectan al flujo incidente sobre el sensor, así como los términos RBFO, es algo con lo que se necesita interactuar continuamente. Estas acciones son registradas en la siguiente sección de código (Listing A.2):

Listing A.2: Llamada de los métodos del .dll desde C# (2)

```
1 // Terminos RBFO por defecto
2 lepton.rad.SetExternalRBFOHighGain(new CCI.Rad.Rbfo(
3 355178, 1435000, 1000, 390474));
4 lepton.rad.SetExternalRBFOLowGain(new CCI.Rad.Rbfo(
5 102000, 1470000, 1000, 362643));
6
7 // Se lee el estado de los campos RBFO
8 Console.WriteLine("RBFO ganancia alta: " +
9     lepton.rad.GetExternalRBFOHighGain());
10 Console.WriteLine("RBFO ganancia baja: " +
11     lepton.rad.GetExternalRBFOLowGain());
12
13 // Se aplican los terminos de flujo por defecto
14 lepton.rad.SetFluxLinearParams(new CCI.Rad.FluxLinearParams(
15 8192,29515,8192,29515,8192,29515,0,29515));
16
17 // Se lee el estado del campo
18 Console.WriteLine("Parametros de flujo: " +
19     lepton.rad.GetFluxLinearParams());
```

Las librerías dinámicas del fabricante pueden ser llamadas desde distintos entornos y lenguajes de programación. En este TFG se ha trabajado con dos en concreto, MATLAB y Python. El requisito indispensable es guardar el programa diseñado dentro de la carpeta donde se ubican los recursos que el fabricante proporciona.

Manejo del SDK desde Python

Un ejemplo de configuración de los campos de la cámara desde Python es mostrado en el Listing A.3:

Listing A.3: Cambio de los campos de la cámara desde Python

```
1  # Se incorporan los importes necesarios para reconocer la camara
2  from import_clr import *
3  from Lepton import CCI
4
5  # Se crea el objeto lep a partir del puerto USB y CCI
6  lep , = (dev.Open()
7           for dev in CCI.GetDevices())
8
9  # Se habilita la radiometria
10 lep.rad.SetEnableState(CCI.Rad.Enable.ENABLE)
11 print(lep.rad.GetEnableState())
12
13 # Se habilita el TLinear
14 lep.rad.SetTLinearEnableState(CCI.Rad.Enable.DISABLE)
15 print(lep.rad.GetTLinearEnableState())
16
17 # Se aplican terminos de flujo
18 lep.rad.SetFluxLinearParams(CCI.Rad.FluxLinearParams(
19 8192,29515,8192,29515,8192,29515,0,29515))
20 print(lep.rad.GetFluxLinearParams())
```

Manejo del SDK desde MATLAB

Desde MATLAB también se puede cambiar la configuración de la cámara y ajustarla a un propósito concreto, esto se hace con el código del Listing A.4:

Listing A.4: Detección de la cámara mediante USB desde MATLAB

```
1  asminfo = NET.addAssembly(pwd + "..\x64\LeptonUVC.dll");
2  devs = Lepton.CCI.GetDevices();
3  lepton = devs.Item(0).Open();
4
5  %Se indica el camino hacia el campo que se requiere cambiar
6  t = asminfo.AssemblyHandle.GetType("Lepton.CCI+Agc+Enable");
```

La llamada de los *get* y *set* para modificar los campos de la cámara son descritos en el Listing A.5:

Listing A.5: Ejemplo de sentencias *get* y *set* desde MATLAB

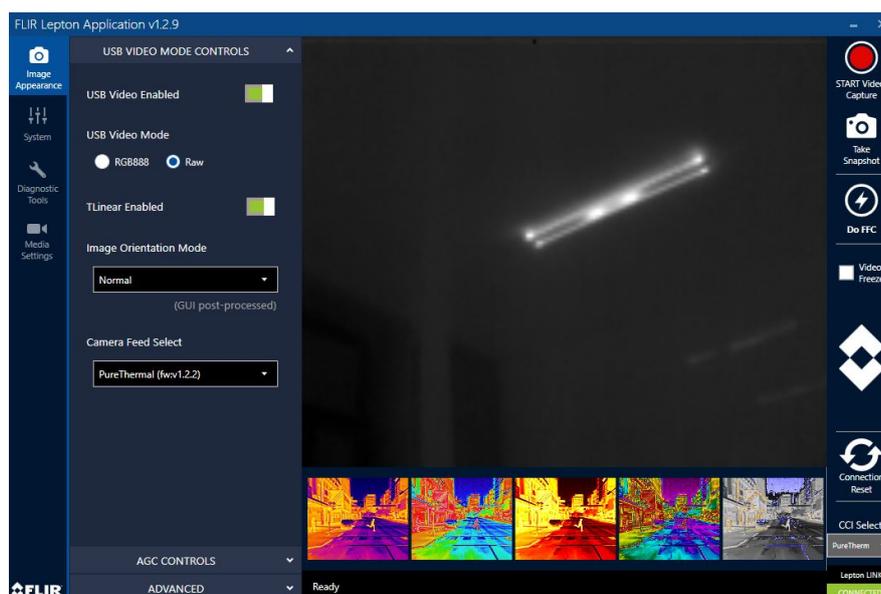
```
1 DISABLE = t.GetEnumValues().Get(0);  
2 lepton.agc.SetEnableState(DISABLE);  
3 AGC = lepton.agc.GetEnableStare();
```

Toma de datos

Para tener datos con los que trabajar se requiere tomar una foto radiométrica de la escena y así comprobar la matriz de datos que se obtiene. Esto puede ser hecho de muchas formas, en este anexo del trabajo se hablará de dos:

1. Desde la aplicación proporcionada por el fabricante.

Esta es la forma más sencilla, pues como se comenta anteriormente la aplicación software es bastante intuitiva y fácil de manejar. Permite cambiar los modos de ganancia, el ROI de la cámara, los formatos de salida de vídeo, etc. Sus principales desventajas son que sistemas como Linux o macOS no soportan este programa y que no se pueden retocar ciertos campos, como los parámetros que afectan al flujo o los términos RBFO.

Figura A.4: Interfaz *Lepton User App*

2. Desde el entorno de programación MATLAB.

Permite la toma de imágenes y representación temporal dinámica de los valores tomados por la Lepton, ya sean de flujo o temperatura. Solo se necesitan instalar las extensiones que den acceso a la función *getsnapshot* y al formato de vídeo *winvideo*. Estas herramientas son: *Image Acquisition Toolbox* e *Image Acquisition Toolbox Support Package for OS Generic Video Interface*.

En el Listing A.6 se observa como:

- a) Mediante *videoinput* se crea el objeto de vídeo teniendo en cuenta que se reciben datos de 16 bits.
- b) Se configura el formato IR para que cada píxel se corresponda con valores de temperatura o flujo.
- c) Para obtener una imagen se utiliza la función *getsnapshot* y para visualizarla *imshow*.

Listing A.6: Ejemplo toma de datos desde MATLAB

```
1  %Que modos soporta la camara
2  info = imaqhwinfo('winvideo', 1);
3  info.SupportedFormats
4
5  %La inf radiometrica se encuentra en el formato Y16
6  inp = videoinput('winvideo', 1, 'Y16 _160x120');
7
8  %Toma y representacion visual de la matriz
9  frame = getsnapshot(inp);
10 imshow(frame);
```

Visualización de datos

Para la visualización y procesado de la matriz de datos se han usado algunas herramientas útiles de MATLAB, las funciones *imtool* e *imagesc*. Estas funciones proporcionan una solución gráfica y válida para observar los valores de cada píxel de la matriz.

Tabla A.1: Especificaciones de la Lepton 3.5

| Descripción general | |
|--|--|
| Frecuencia de imagen efectiva | 8.7 Hz |
| Formato de salida | RAW14 (14 bits), AGC (8 bits), RGB (24 bits) |
| Tamaño de píxel | 12 μm |
| Rango dinámico de escena | Ganancia baja de -10 a 400°C Ganancia alta de -10 a 140°C |
| Rango espectral | 8 μm a 14 μm |
| Compensación de temperatura | Automática (la hoja de características se refiere a esto de tal forma que la salida de imagen de la cámara es independiente a su propia temperatura) |
| Sensibilidad térmica | < 50 mK (0.050 °C) |
| Alimentación | |
| Voltaje de suministro de entrada | E/S de 2.8 V, 1.2 V, y de 2.5 V a 3.1 V |
| Electricidad y mecánica | |
| Puerto de control | CCI, similar a I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>) |
| Dimensiones (Ancho \times Largo \times alto) | 10.50 x 12.7 x 7.14 mm |
| Interfaz mecánica | Interfaz abierta de 32 clavijas |
| Imágenes y óptica | |
| Formato en matriz | 160 x 120 |
| FOV - Diagonal | 71° |
| FOV - Horizontal | 57° |
| FOV - Vertical | 42° |
| Corrección de no uniformidad (NUC) | Integral |
| Tecnología del sensor | Microbolómetro VOx no refrigerado |
| Protección solar | Integral |

Tabla A.2: Especificaciones de la PureThermal 2

| Especificaciones PureThermal 2 | |
|---------------------------------------|---|
| Entradas de energía | Micro USB |
| Voltaje máximo de entrada (LiPo/H1) | 5.5v |
| Soporte para Lepton | 2.x y 3.x |
| Extensión | I2C, UART (<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>), GPIO (<i>General Purpose Input/Output</i>), JTAG (<i>Joint Test Action Group</i>) |
| Procesador | STM32F412 (1M Flash, 512 KRAM) |
| Salida de imagen térmica | UVC (<i>USB Video Class</i>) over USB |

Anexo B

Integración de la cámara en una Raspberry Pi

Se ha procedido con una instalación similar a la de Windows, es decir, mediante las librerías de la clase UVC. Sin embargo, en este caso no es posible utilizar el SDK basado en C#, ya que no es soportado por arquitecturas Linux, se necesita entonces buscar alternativas para establecer una comunicación con la cámara. En estos casos lo mejor es indagar en algún foro como GitHub, donde ya existen modificaciones para trabajar con la Lepton. La entidad GroupGets ha desarrollado un repositorio y herramientas para esto mismo, utilizando Python, C y V4L2 (*Video For Linux 2*).

El sistema operativo donde se decide integrar la Lepton es Raspbian, una distribución de Linux especialmente diseñada para el sistema embebido Raspberry Pi.

Antes que nada, sea cual sea el modelo de la Raspberry con la que se esté trabajando, se escribe lo siguiente en el terminal:

- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get upgrade`

Los paquetes y librerías recomendadas para poder implementar el módulo en una arquitectura Linux son:

- **CMake.**
 - `sudo apt-get install cmake`

- **OpenCV.**

- sudo apt-get install python-opencv

- **Libusb y libuvc.**

- sudo apt-get install libusb-1.0-0-dev

```
git clone https://github.com/groupgets/libuvc
cd libuvc
mkdir build
cd build
cmake ..
make && sudo make install
```

Una vez instalados los paquetes básicos que permitirán el funcionamiento de la cámara y su procesamiento de datos, se continúa con la integración de esta a través de comandos. GroupGets ha desarrollado unas rutinas con Python y OpenCV que permiten la presentación de vídeo tanto RGB como con datos radiométricos. La opción más viable es modificar estas funciones para que se ajusten a un propósito concreto. Para la instalación y el uso del repositorio se siguen los siguientes pasos:

```
git clone https://github.com/groupgets/purethermal1-uv-capture
cd Directorio/purethermal1-uv-capture
cd python
```

Con este repositorio se adquieren las herramientas básicas que permiten comunicarse con la cámara a través de la interfaz USB. El objetivo es modificar las rutinas por defecto para obtener los datos que le llegan a la cámara y guardarlos en matrices individuales.

- Si se tiene la intención de cambiar campos de la cámara es necesario descargar y compilar paquetes que contienen herramientas de C y V4L2, siguiendo los pasos que se explican en [44]:

```
cd Directorio/purethermal1-uv-capture
sudo apt-get install autotools-dev autoconf build-essential
sudo apt-get install libv4l-dev v4l-utils
```

- Se continua con las instrucciones para construir y compilar las librerías:

```
cd v4l2
./autogen.sh
./configure
make
```

- Para controlar la interfaz CCI a través de la clase UVC se necesita la extensión *uvcdynctrl*, que se instala de la siguiente manera:

```
sudo apt-get install uvcdynctrl
```

- Si se quiere cambiar los campos de la Lepton mediante las funciones del CCI, es necesario usar la API que proporciona V4L2. Para esto se deben ejecutar las siguientes líneas:

```
cd uvcdynctrl
uvcdynctrl -v -d /dev/video0 -i pt1.xml
v4l2-ctl -l
```

- A continuación, aparecerá una lista con los campos que se pueden cambiar. Por ejemplo, para cambiar el estado del modo radiometría, TLinear y ganancia:

```
v4l2-ctl -c lep_cid_rad_enable_state=1 # Radiometria activada
v4l2-ctl -c lep_cid_rad_tlinear_enable_stat=0 # TLinear Off
v4l2-ctl -c lep_cid_sys_gain_mode=0 # Ganancia alta
```

- De la misma manera, existe una forma visual de cambiar estos campos, esto se hace a través de la aplicación Gvvcview. Se incorpora esta herramienta en la Raspberry con el siguiente comando:

```
sudo apt-get install gvvcview
```

- Para activar correctamente este paso se tiene que desplegar la lista de campos mediante V4L2 y luego ejecutar el Gvvcview, quedando una interfaz similar a la figura B.1:

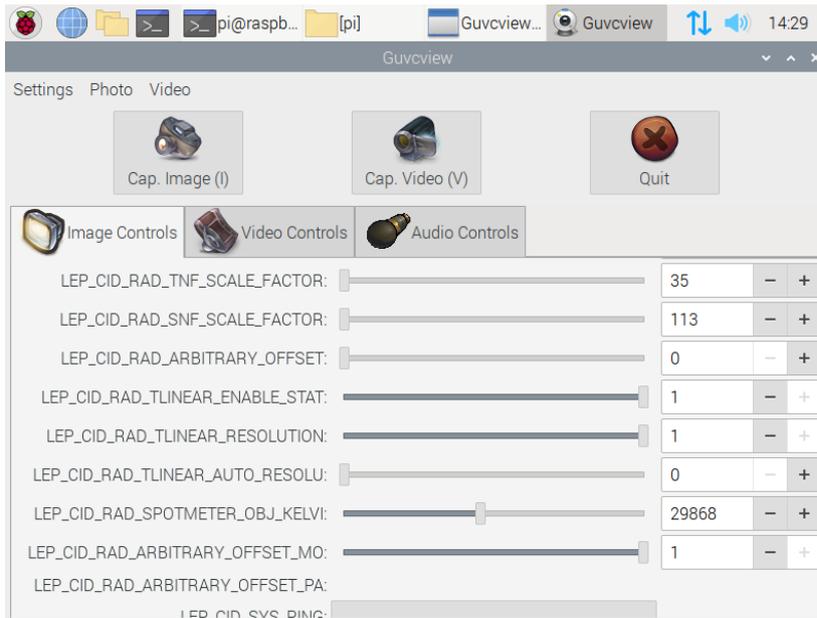


Figura B.1: Interfaz gráfica de Gvvcview

Con esto se tienen disponibles todos los ajustes existentes en los campos de la Lepton para una arquitectura Linux y a través de comunicación USB. El más útil por ahora es el que permite cambiar los modos de ganancia, ya que no es un proceso que se pueda hacer sin ayuda de esta herramienta. Por otro lado, los ajustes radiométricos pueden ser hechos desde código externo y han sido implementados en Python, entre ellos se encuentran las ecuaciones RBFO y la ecuación que despeja el flujo de la escena.

Toma de datos y visualización de matrices

Antes de comenzar con el código implementado para el almacenamiento de datos y su respectiva visualización, se tiene que detallar un tipo de ayuda que proporciona el fabricante de la placa sobre la que se trabaja. Estas son las rutinas que permiten obtener los datos crudos o de temperatura que capta la cámara mediante las librerías de la clase UVC. Como es algo de libre acceso, se deja al lector libertad de ir al repositorio de GitHub referenciado en la bibliografía, para entender de qué trata dicho código. Estas rutinas se encuentran antes y después del programa creado por el usuario, por lo tanto, es indispensable que no se manipule esa parte del código. Todo el código mostrado en este anexo tiene en cuenta que la cámara está operando de forma estable con la ayuda de estas herramientas.

Una vez ajustada la cámara para que tome datos, se utiliza el siguiente código (Listing B.1) dentro de la rutina proporcionada para guardar los datos en formato “.png”. El mayor cambio perceptible respecto al ejemplo que trae el repositorio es el uso de librerías como OpenCV y un ligero ajuste del bucle. De la misma forma, se borran las funciones que vienen por defecto en el ejemplo para la presentación de vídeo, pues no se necesitan en este momento.

Listing B.1: Adaptación de la rutina del fabricante - Captación de imágenes

```
1  from uvctypes import *
2  import cv2
3  try:
4      from queue import Queue
5  except ImportError:
6      from Queue import Queue
7  import platform
8
9  ## CODIGO DEL FABRICANTE ##
10
11  i = 0
12  try:
13      # bucle de 14 iteraciones para conseguir muestras
14      while i < 15:
15          # Recoge un dato de la cola si se puede
16          # Continúa durante 500 sg antes de bloquear la cola
17              data = q.get(True, 500)
18              if data is None:
19                  break
20              # Se guarda la matriz de datos en formato .png
21              cv2.imwrite('./ej/test_' + str(i) + '.png', data)
22              i = i + 1
23
24  ## CODIGO DEL FABRICANTE ##
```

Para visualizar las imágenes que han sido tomadas y guardadas en la carpeta “ej” se necesitan las siguientes librerías:

- **Numpy, Matplotlib y Pillow.**

- pip install numpy matplotlib

- sudo apt-get install python3-pip
- pip install Pillow
- **Se instalan unos extras para la presentación de datos deseada.**
 - sudo pip install mpldatacursor
 - sudo apt-get install python-gi-cairo

El código utilizado, representado en el Listing B.2, itera en el directorio donde se guardan las muestras tomadas anteriormente y realiza una presentación individual y en orden de cada matriz. El usuario tiene que presionar la “X” de la ventana para continuar con la imagen siguiente.

Listing B.2: Representación de imágenes con Matplotlib

```
1  import numpy as np
2  from numpy import ndarray
3  import matplotlib.pyplot as plt
4  from PIL import Image
5  import mpldatacursor as mpl
6  import glob
7  import os
8
9  # directorio donde se encuentra la muestra
10 dirname = glob.glob('ej/*.png*')
11
12 # loop para abrir una por una cada muestra
13 for image in sorted(dirname, key=os.path.getmtime):
14     with open(image, 'rb') as file:
15         img = Image.open(file)
16         S = ndarray(img)
17
18     # Secuencia para mostrar la imagen y el cursor de datos
19     plt.imshow(S, interpolation='none', cmap='gray')
20     plt.title('Lepton image name: ' + str(image[3:]))
21     plt.xlabel('X data pixels')
22     plt.ylabel('Y data pixels')
23     mpl.datacursor(hover=True, bbox=dict(alpha=1, fc='w'))
24     plt.show()
```

Las imágenes estudiadas tienen un formato como el mostrado en la figura B.2.

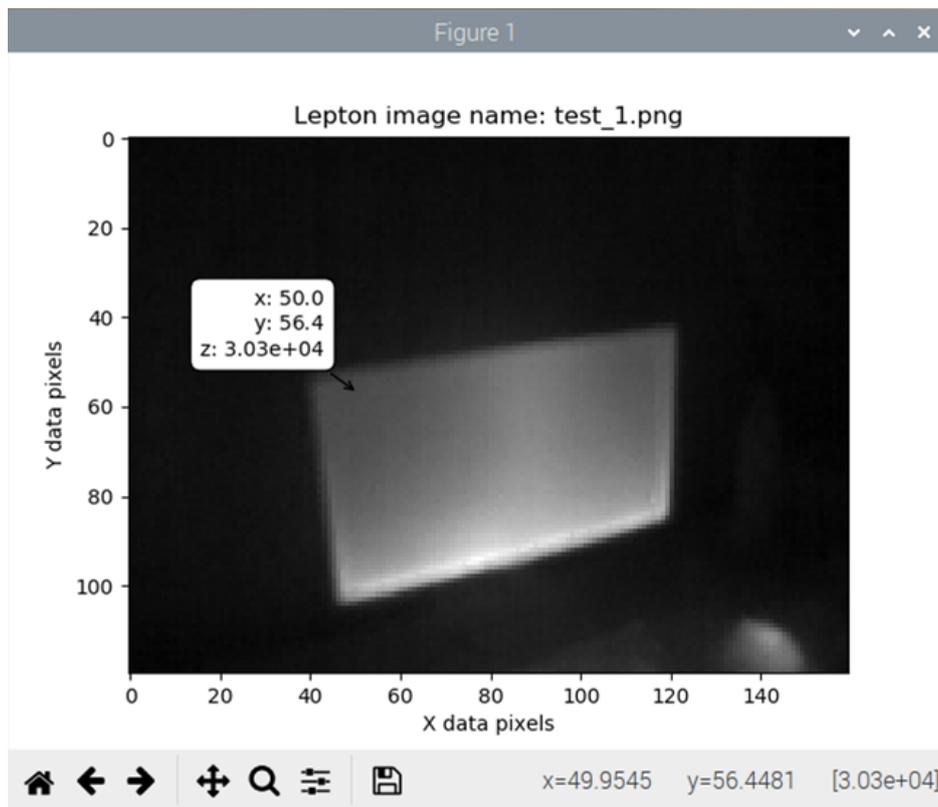


Figura B.2: Representación de una matriz con Matplotlib

Anexo C

Prototipado para la presentación de datos

Después de un estudio sobre los campos de la Lepton se llega a una conclusión, gran parte de las técnicas usadas por el SDK del fabricante pueden ser implementadas de forma manual, consiguiendo el mismo resultado. Por ejemplo, no se necesita cambiar los parámetros del flujo directamente en la cámara, después de leer con atención el IDD [39] se sabe cuáles son sus datos de fábrica y su rango respectivo. Con el fin de ajustarlos solo se tiene que implementar la fórmula (4.3) nombrada en capítulos anteriores. Lo mismo sucede con las ecuaciones RBFO implementadas ya manualmente en MATLAB, estas pueden ir incorporadas en el prototipado para que convierta el flujo de forma continua una vez hechas las correcciones sobre este.

En este anexo se pretende sacar partido del lenguaje de programación Python y diferentes librerías para el procesamiento de imagen, como por ejemplo OpenCV, o basadas en vectores y matrices, como numpy. El propósito es elaborar con estas herramientas y a partir del dato básico que te da la cámara, una simple presentación de vídeo que le muestre al usuario valores de temperatura que pueda leer sin dificultad. Por esto, lo primero que se tiene que hacer es construir el programa sobre las herramientas facilitadas por el fabricante, en el caso de Windows hay que acudir al SDK de C# para extraer de la cámara una corriente constante de datos, mientras que en Linux se usa la rutina comentada en el anexo II. Una vez obtenida la matriz fundamental de datos en cada arquitectura, todo puede ser desarrollado y funcionar en ambas plataformas.

Creación del programa

Para comenzar con el prototipado primero se necesita observar que dato proporciona la cámara de forma pasiva. La librería OpenCV ofrece acceso a la función *imshow*, que permite visualizar la matriz en forma de imagen, tal como se ve en la figura C.1. La utilidad de esta función radica en que puede ser introducida dentro de un bucle, por lo que la superposición continua de estos datos forma algo similar a un vídeo.

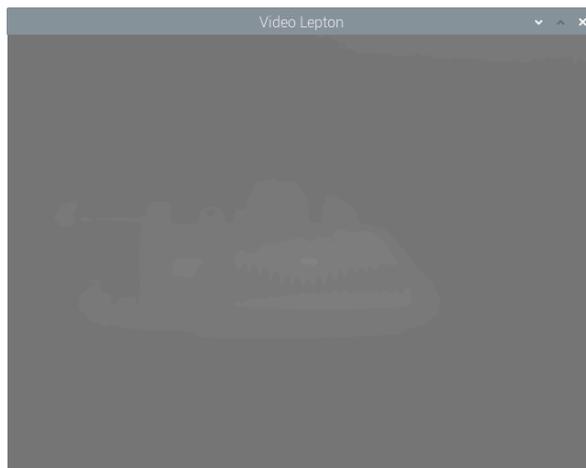


Figura C.1: Prototipo de vídeo (I)

Se observa, como es costumbre en los datos obtenidos con la cámara, que no hay suficiente contraste para distinguir el blanco del entorno. Por lo tanto, se procede a aplicar el algoritmo de AGC comentado en el capítulo 4. La salida de la función presenta la forma de la figura C.2.



Figura C.2: Prototipo de vídeo (II)

En este punto ya es bastante sencillo observar la superficie estudiada. El siguiente paso consiste en localizar el píxel que contenga el dato máximo de la matriz. No obstante, esto es insuficiente, igualmente se necesita su posición en la matriz para poder referenciar otros datos contiguos a este. La función *minMaxLoc*, también de OpenCV, ahorra trabajo en este aspecto, proporcionando de forma instantánea los datos que se busca y actualizándolos en cada iteración del bucle.

A continuación, se necesita representar este valor máximo en la imagen, para esto se utiliza la función *circle* pasándole los parámetros correspondientes (imagen, centro del círculo, radio, color y grosor). La forma más sencilla de representar este punto es con un círculo de radio 1, cuya representación visual se ajusta al dato respectivo en la matriz (figura C.3).



Figura C.3: Prototipo de vídeo (III)

Con la posición actualizándose en cada iteración del bucle es posible recoger datos contiguos a través de una simple indexación en la matriz inicial. Obtener las coordenadas X e Y del máximo ayuda en esta tarea. Con ellas se crea un ROI indexando las posiciones cercanas para poder sacar los datos contenidos en estas. Finalmente se ha optado por dibujar un cuadrado con la función *rectangle* con los parámetros necesarios (imagen, coordenadas de inicio, coordenadas finales, color y grosor), integrando todos los datos que contiene (figura C.4).



Figura C.4: Prototipo de vídeo (IV)

El color seleccionado por defecto no va muy de acorde a la gama resultante de aplicar el AGC en el entorno, para transformar la paleta de grises en RGB se utiliza *cvtColor*. Se estima que un color rojo es mucho más sencillo de relacionar con valores máximos de temperatura, como se referencia en la figura C.5.



Figura C.5: Prototipo de vídeo (V)

Para recoger la mayor cantidad de muestras posibles se aumenta el ROI cuadrado, obteniendo los valores correspondientes a la matriz de datos original. La forma de proceder es similar a lo hecho anteriormente, solo que en este caso aumentan las coordenadas de este. De la misma manera, se procede a mostrar en pantalla (figura C.6) los datos correspondientes al máximo captado y a la media dentro de los cuadrados.

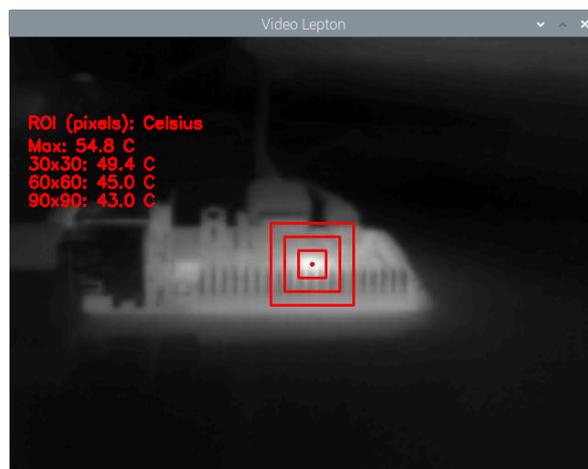


Figura C.6: Prototipo de vídeo (VI)

Para lograr que los datos mostrados se actualicen en cada iteración del bucle se acude a la función *putText*, pasándole como cadenas el formato del valor de la matriz.

Con el objetivo de representar los mínimos de la matriz se reutilizan los pasos anteriores, solo hay que cambiar el valor del máximo y su posición con el del respectivo valor más bajo captado (figura C.7). Para que sea más sencilla y clara la representación y búsqueda de este dato se sitúa una botella de agua fría en la escena, de tal forma que es indudable la posición de los posibles mínimos de la matriz. Con este paso ya se tiene implementada una forma intuitiva que permite visualizar distintos datos sin requerir de procesos muy complejos.

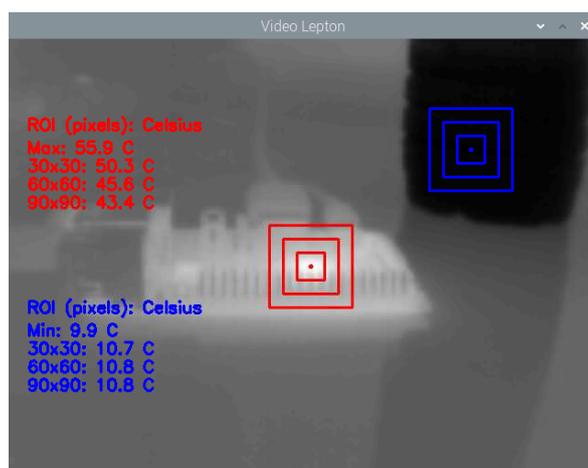


Figura C.7: Prototipo de vídeo (VII)

Esta pequeña muestra de vídeo presenta un problema, existirán casos donde los ROI de máximo y mínimo se superpongan al texto donde se registran los valores de la matriz. Para solventar este desajuste se crea una nueva ventana independiente a la primera (figura C.8), situando los datos en esta. La forma más simple de conseguir esto es con ayuda de la librería numpy, que permite crear una matriz de ceros de un determinado tamaño y formato. Una vez guardada esta ventana en una variable, es necesario cambiar la localización del texto a esta nueva ventana vacía, volviéndole a aplicar la transformación a valores RGB.

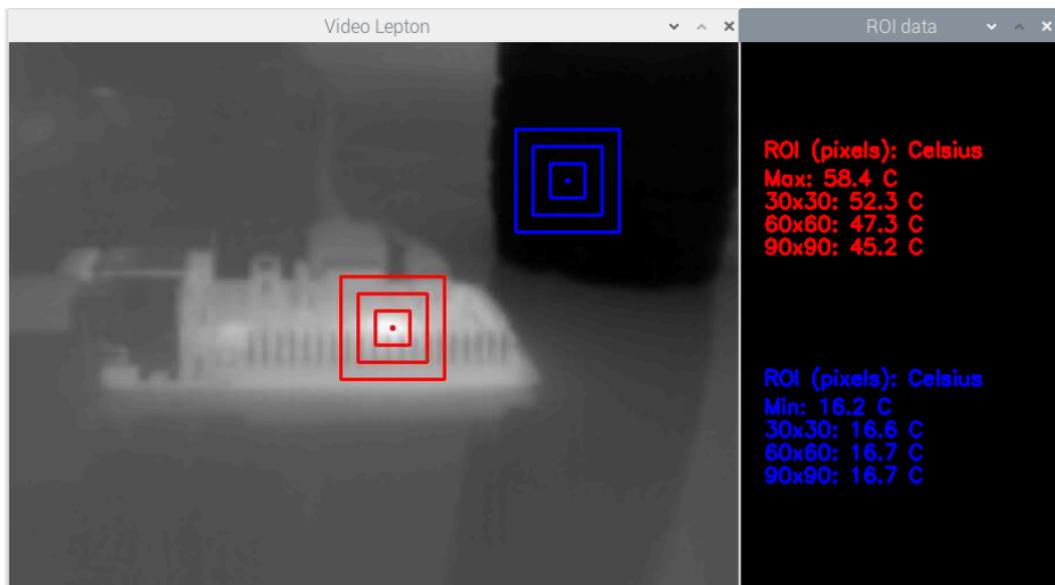


Figura C.8: Prototipo de vídeo (VIII)

Por terminar con el prototipado se decide implementar la ecuación que ajusta los parámetros del flujo. Lo que se pretende es que el usuario introduzca (dentro de los rangos marcados por el fabricante) estas variables por sí mismo, permitiendo su actualización cada vez que se inicie el programa. Para poder aplicar estos términos se necesita contar con el flujo crudo de datos, este se consigue aplicando la ecuación inversa de los términos RBFO a la temperatura o cambiando el modo de la cámara con el SDK del fabricante. La ecuación ajustará los valores de flujo y luego se usará la conversión respectiva para transformar esos nuevos valores en temperatura. Para que el usuario no cometa errores con los rangos al introducir los parámetros del flujo, se presentarán actualizados en pantalla, como se observa en la figura C.9. Por ejemplo, se podría diseñar una rutina de excepción que salte cuando la emisividad tenga un valor >1 , pues esta no puede ser mayor a la unidad. Por otro lado, si la emisividad es

menor a 1 pero aun así equivocada, se podrá observar en la interfaz mostrada, donde el usuario reconocerá rápidamente el error.

Con este pequeño programa se realizan las operaciones básicas para la adquisición de valores radiométricos que antes eran ejecutadas en forma de post-procesado, después de captar las muestras con MATLAB o con la aplicación software del fabricante. Muchas de las pruebas nombradas en el capítulo correspondiente a la campaña de medidas fueron tomadas con este método, facilitando en gran medida la adquisición de datos. Por un lado, se tiene la representación visual de lo que la cámara está enfocando, mientras que si se le añade el código del Listing B.1, se podría guardar esta matriz en forma de imagen. Por supuesto, todo parte de una premisa, esta es que se puede ajustar los valores de flujo de forma fiable, ya sea porque se conoce la emisividad del blanco, la temperatura del entorno, la transmisividad de la atmósfera en el momento de las medidas, etc.

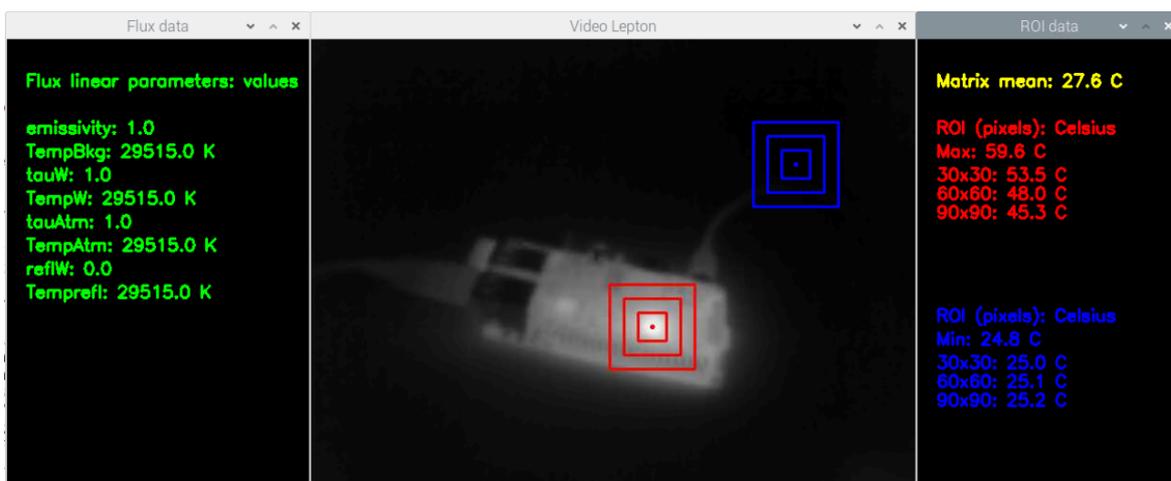


Figura C.9: Prototipo de vídeo (IX)

