

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA
HIPERESPECTRAL EN EL INFRARROJO
MEDIO Y LEJANO, BASADO EN ÓPTICA
DIFRACTIVA PARA APLICACIONES DE
DEFENSA**

CONSUELO LATORRE SÁNCHEZ

2009

Título del proyecto:

Caracterización de un sistema hiperespectral en el infrarrojo medio MWIR, basado en óptica difractiva; para aplicaciones de Defensa.

Nombre del tutor:

D. Tomás Rodríguez Rodríguez

Nombre del alumno:

Consuelo Latorre Sánchez

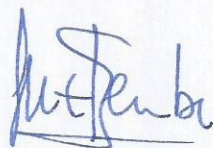
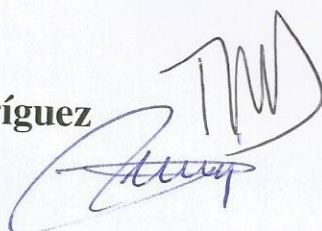
Miembros del Tribunal:

Presidente: **D. Tomás Rodríguez Rodríguez**

Vocal: **D. José María Ruiz Pérez**

Secretario: **D. Javier Jiménez Leube**

Suplente: **D. Andrés Rodríguez Domínguez**



Fecha: 17 DE SEPTIEMBRE 2009

Calificación: MATRÍCULA DE HONOR 10p.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA
HIPERESPECTRAL EN EL INFRARROJO
MEDIO MWIR, BASADO EN ÓPTICA
DIFRACTIVA; PARA APLICACIONES DE
DEFENSA.**

CONSUELO LATORRE SÁNCHEZ

2009

Título del proyecto:

Caracterización de un sistema hiperespectral en el infrarrojo medio MWIR, basado en óptica difractiva; para aplicaciones de Defensa.

Nombre del tutor:

D. Tomás Rodríguez Rodríguez

Nombre del alumno:

Consuelo Latorre Sánchez

Miembros del Tribunal:

Presidente: **D. Tomás Rodríguez Rodríguez**

Vocal: **D. José María Ruiz Pérez**

Secretario: **D. Javier Jiménez Leube**

Suplente: **D. Andrés Rodríguez Domínguez**

Fecha:

Calificación:

AGRADECIMIENTOS

La realización de este Proyecto Fin de Carrera ha contado con la dotación de una beca concedida por la Cátedra ISDEFE-UPM. También ha sido posible gracias al CIDA por prestar sus instalaciones y su tiempo. Por último, dar las gracias a la vida, que me ha dado tanto... y a mi familia por su eterna paciencia.

RESUMEN DEL PROYECTO

El contenido de este proyecto engloba el desarrollo, prueba y estimación de las prestaciones de dos sistemas infrarrojos. Por un lado, una cámara infrarroja, y posteriormente el sistema compuesto por dicha cámara y una lente hiperespectral.

El sensor multiespectral IMSS es un sistema basado en óptica dispersiva que utiliza una técnica similar a un espectro-radiómetro, patentada por PAT (Pacific Advanced Technology). Se compone de una cámara infrarroja en la banda media MWIR, una lente difractiva y un ordenador que se encarga de la adquisición y almacenamiento de los datos. El elemento óptico ensamblado es el encargado de la selección de la longitud de onda. El fabricante además de realizar la adaptación entre la lente y la cámara IR; proporciona la herramienta de adquisición y post-procesado. Este software, el HyPat II realiza la extracción espectral, la deconvolución espacial, la compensación de la magnificación y la deconvolución espectral de los datos. El algoritmo de magnificación precisa del centro de magnificación del sistema, que debe ser determinado tras la adaptación del sensor hiperespectral a la cámara infrarroja.

Fue necesario calibrar el sistema para asegurar su compatibilidad con una cámara distinta de la que fue adaptada. Se incluye en este proyecto, las diferentes medidas e imágenes adquiridas en el laboratorio de termovisión del CIDA (Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada Española), dónde se caracterizó el IMSS para aplicaciones de Defensa, como la detección de blancos, y gases de combustión.

La calibración de la cámara se realizó con varios cuerpos negros situados en el colimador del banco de trabajo óptico. Gracias a la adquisición de las imágenes se calcularon la responsividad, las figuras de ruido y la función de transferencia de frecuencia, funciones básicas tanto para la corrección de la magnificación como para la caracterización del sistema.

La herramienta de procesado que se distribuye con la lente, no nos permitió modificar la adquisición con el fin de corregir la adaptación y procesar posteriormente las imágenes; si bien nos sirvió para obtener la colección de datos que han sido tratados. Se buscó la detección de determinados gases de combustión, cuya emisión ocupa un rango espectral muy estrecho y conocido, mediante el tratamiento de Imágenes con técnicas de Fusión.

PALABRAS CLAVE:

Infrarrojo, IR, NIR, SWIR, MWIR, LWIR, hiperespectral, IMSS, *scanning systems*, *staring systems*, *blackbody*-cuerpo negro, MTF, SiFT, DFT, *FPA*, termovisión, termografía, DRI, *Remote Sensing*-Teledetección

ABSTRACT

Included in this project is the procedure for calibration of the two Infrared Systems, a IR camera and this camera with a hyper-spectral lens assembly.

The Image Multi-spectral Sensor IMSS system is a dispersive type imaging spectrometer using a technique patented by Pacific Advanced Technology. It consists of a standard Indigo Phoenix MWIR camera, a diffractive optic and a PC for data acquisition and storage. The diffractive optical element is responsible for wavelength selection. PAT also does the adaptation of the user selectable detector and supplies the necessary software for data acquisition and post processing. The program HyPAT II allows the extraction of a spectrum from the recorded data, spatial deconvolution, magnification compensation and spectral deconvolution. The magnification compensation algorithm requires the "centre of magnification" pixel. This value is measured during adaptation of the sensor to the lens is transparent to the user.

The system was working uncalibrated and the resulting signal in dependence of wavelength showed a false behaviour. At CIDA the system was intended for testing hyper-spectral methods in Defence applications in the mid wave IR; for example to distinguish between targets and decoys. The results of these measurements are presented in this paper. In order to get information if the system is usable for this purpose an experimental examination was conducted. This examination includes the IR-camera alone, the IMSS, calibration tests and practical measurements. First tests were done with the Indigo Phoenix camera with a black-body set up in front of the detector without using an optic; on the optical bench, by using a collimator. In order to test the magnification correction and for testing the performance of the camera, the recorded picture series were the basis for the calculation of System Transfer Function, responsivity, noise Equivalent Temperature, Fixed Pattern Noise, and Modulation Transfer Frequency.

The software supplied by PAT for post processing are, in the form they are available for us, not able to correct our system; but practical measurements were only partially able to support this. As it is unknown what algorithm stands behind the deconvolution, it is impossible to give a reason for the result, so the HypattII was used for recording the images.

It was tried to measure the transmission of a several gases from combustion. Such gases are common in calibrating spectrometers because of their known absorption lines. In order to get comparable data for the examination of the IMSS, the measurements were treated with Fusion Techniques for processing of the hyper- spectral images.

KEY WORDS:

Infrared, IR, NIR, SWIR, MWIR, LWIR, hyper- spectral, IMSS, scanning systems, staring systems, blackbody, MTF, SiFT, DFT, FPA, Thermo vision, Thermography, DRI, Remote Sensing.

GLOSARIO

La mayoría de la literatura del Infrarrojo, está escrita en lengua inglesa, y muchos términos no han sido traducidos de forma apropiada y son conocidos y aceptados por su amplia difusión.

AVIRIS:

Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer

AGC:

Authomatic Ganance Control. Control Automático de Ganancia.

ATF:

Aperiodic Transfer Function. – Función de transferencia aperiódica.

BPR:

Bad Pixel Remove.- Quitar los píxeles malos.

CTF:

Contrast Transfer Function- Función de transferencia de contraste.

CTR:

Constrast Transfer Response.-Respuesta de contraste

CCD:

Charge-Coupled Device:- dispositivo de cargas [eléctricas] interconectadas.

DAS:

Digital Adquire System- Sistema de adquisición digital.

DRI:

Detección, Reconocimiento e Identificación.

FOV:

Field of View – Campo de Visión

FPA:

Focal Plane Array.- Vector de plano focal.

FPN:

Fixed Pattern Noise- Patrón fijo de ruido.

FTIR:

Fourier Transform Infrared. -Transformada de Fourier infrarroja.

HIS:

HyperSpectral Imaging- Tecnologías hiperespectrales

IETD:

Inhomogeneity-Equivalent Temperature Difference-Inhomogeneidad

IFOV / EIFOV:

Instantaneous/Effective Instantaneous Field of View. -Campo de visión instantáneo.

IMSS:

Image MultiSpectral Scanning/ Sensor/Sensing-Sensor multiespectral de imágenes

LLLTV:

Low Light Level TVs- Bajos niveles de luz

LSF:

Line Spread Function- Función de ancho de línea.

MTF:

Modulation Transfer Function- Función de transferencia modulada

MRTD:
Minimum Resolvable Temperature Difference-Diferencia de temperatura mínima resoluble.

MDTD:
Minimum Detectable Temperature Difference-Diferencia mínima de temperatura detectable.

MWIR:
Medium Wavelength Infrared – Midwave Infrared- Infrarrojo medio

NEFD:
Noise Equivalent Flux Density-Densidad de Flujo equivalente de ruido.

NETD:
Noise Equivalent Temperature Difference.-Diferencia de temperatura de ruido equivalente.

NIR:
Near Infrared – Infrarrojo cercano

NGE:
Noise Generated Error. – Error de ruido.

NPSD:
Noise Power Spectral Density-Densidad espectral de potencia de ruido.

NUC:
Non Uniformity Correction. Corrección de no-uniformidad.

OTF:
Optical Transfer Function- Función de transferencia óptica.

PAT:
Pacific Advanced Technologies

PTF:
Phase Transfer Function- Función de transferencia de fase.

SiFT:
Signal Transfer Function-Función de señal de transferencia.

SLR:
Slit Response Function- Función de respuesta ante la ranura estrecha.

SRF:
Slit Response Function- Función de respuesta ante la ranura estrecha.

TDI:
Time Delay Integration .-Tiempo de integración.

TOD:
Triangle Orientation Discrimination – Discriminación por orientación del triángulo.

Coexiste en el texto, el uso de la coma como separador de decimales, y el punto ordinario (bajo) como punto decimal. El SI acepta ambos para separar la parte entera de la decimal, según se recoge en la norma ISO 31 del Sistema Internacional de Magnitudes (ISO/IEC 80000)

Texto escrito en Microsoft ®Word 2002, marca registrada de © Microsoft Corporation. Gráficas e imágenes en entorno de programación Matlab ® 7.3 de The MathWorks, Inc. y Labview/Tools/Vision Assistant. de National Instrument. ®

0. Introducción.

0.1	Objetivos del Proyecto.....	0.1
0.2	Estructura del Proyecto.....	0.2
0.3	El espectro Infrarrojo. Teoría y Aplicaciones.....	0.2
0.3.1	Origen	0.2
0.3.2	El espectro electromagnético.....	0.3
0.3.3	Definiciones y conceptos básicos.....	0.4
0.3.3.1	Flujo Luminoso.....	0.4
0.3.3.2	Iluminancia/Irradiancia.....	0.4
0.3.3.3	Intensidad.....	0.5
0.3.3.4	Luminancia/Radiancia.....	0.5
0.3.3.5	Emitancia.....	0.5
0.3.3.6	Calor y Temperatura.....	0.6
0.3.3.7	Leyes de Radiación.....	0.6
0.3.3.7.1	Cuerpos negros.....	0.6
0.3.3.7.2	Ley de Stefan-Boltzmann.....	0.7
0.3.3.7.3	Ley de Wien.....	0.7
0.3.3.7.4	Ley de Planck.....	0.8
0.3.3.7.5	Ley de Lambert o del coseno.....	0.9
0.3.3.7.6	Fuentes de línea.....	0.10
0.3.4	Propiedades radiantes de los materiales.....	0.11
0.3.4.1	Sentido del flujo de calor.....	0.11
0.3.4.2	Balance de Energías.....	0.12
0.3.4.3	Ley de Kirchhoffs.....	0.13
0.3.4.4	Emisividad.....	0.13
0.3.5	Propagación Atmosférica. Espectro. Transmitancia.....	0.14
0.3.5.1	Scattering.....	0.16
0.3.5.1.1	Dispersión de Mie.....	0.16
0.3.5.1.2	Dispersión de Rayleigh.....	0.16
0.3.5.2	Turbulencias.....	0.17
0.3.6	Sistemas Infrarrojos.....	0.18
0.3.6.1	Subsistemas infrarrojos.....	0.19
0.3.6.2	Brillo. Contraste.....	0.21
0.3.6.3	Conceptos ópticos.....	0.22
0.4	Procesado de imágenes.....	0.26
0.4.1	Definición de Imagen.....	0.26
0.4.2	Técnicas hiperespectrales.....	0.26
0.4.2.1	Comparativa entre sistemas hiperespectrales.....	0.29
0.5	Conclusiones.....	0.31

1. Cámara de Infrarrojos. Caracterización

1.1	Características genéricas de las cámaras y medida de las mismas.....	1.2
1.1.1	Características cualitativas.....	1.2
1.1.1.1	MRTD.....	1.3
1.1.1.2	MDTD.....	1.3

1.1.2 Características de Respuesta.....	1.3
1.1.2.1 SiTF.....	1.3
1.1.2.2 Rango dinámico.....	1.5
1.1.3 Características de Ruido.....	1.5
1.1.3.1 Ruido 3D.....	1.6
1.1.3.2 NETD.....	1.7
1.1.3.3 FPN.....	1.7
1.1.3.4 No uniformidad.....	1.8
1.1.4 Resolución de Imagen.....	1.8
1.1.4.1 MTF.....	1.8
1.1.4.2 LSF.....	1.11
1.1.5 Geométricas.....	1.11
1.1.5.1 FOV.....	1.11
1.1.5.2 IFOV.....	1.12
1.1.5.3 Distorsión.....	1.12
1.1.6 Exactitud. Precisión.....	1.13
1.1.7 Espectrales.....	1.13
1.1.8 Operativas.....	1.13
1.1.9 Tendencias de medición TOD	1.13
1.2. Funcionamiento de la cámara de IR.....	1.14
1.2.1 Control automático de ganancia AGC.....	1.16
1.2.2 Tiempo de integración.....	1.17
1.2.3 Corrección de la no-homogeneidad NUC.....	1.17
1.2.4. Bad Píxel. BPR.....	1.19
1.3 Caracterización de la cámara IR Phoenix de Indigo.....	1.20
1.3.1 Medidas con cuerpo negro.....	1.22
1.4 Conclusiones.....	1.23

2. Lente Hiperespectral IMSS. Sensor de imagen multi-espectral.

2.1 Descripción.....	2.3
2.1.1 Ventajas	2.4
2.1.2 Inconvenientes.....	2.4
2.2 Parámetros y prestaciones.....	2.4
2.3 Justificación del procesado de Hypatt.	2.5
2.4 Software de la lente IMSS.....	2.5
2.4.1 Programa HyPAT II.exe.....	2.6
2.4.1.1 Control de la Lente y adquisición de datos.....	2.8
2.4.1.2 Medida de Temperatura.....	2.11
2.4.1.3 Extracción Espectral.....	2.12
2.5 Procedimientos de Caracterización .Algoritmo de deconvolución.....	2.14
2.6. Conclusiones.....	2.15
2.6.1 Narciso.....	2.15
2.6.2 Conclusiones sobre el software HypatII.....	2.16

3. Caracterización del sistema hiperespectral: Cámara IR+ Lente IMSS

3.1 Descripción del instrumental y procedimientos.....	3.1
3.1.1 Cuerpo negro, rueda de miras, banco de trabajo.....	3.3
3.1.1.1 Configuración del banco de Optikos.....	3.4
3.1.2 Placas térmicas para el calibrado.....	3.5
3.2 Configuración del Sistema.....	3.6
3.2.1 Tiempo de integración.....	3.6
3.2.2 NUC, BPR.....	3.6
3.2.3 Consideraciones de almacenamiento.....	3.10
3.2.4 Control Automático de Ganancia.....	3.11
3.2.5 Alineamiento del sistema.....	3.11
3.3 Características del Sistema y medida de las mismas.....	3.12
3.3.1 Respuesta del IMSS en longitud de onda y energía.....	3.12
3.3.1.1 SiTF.....	3.12
3.3.1.2 MTF.....	3.14
3.3.1.2.1 Calculo teórico de la MTF	3.15
3.3.1.2.2 Configuración de la herramienta I-site.....	3.16
3.3.1.2.3 MTF para campo ancho y estrecho.....	3.21
3.3.1.2.4 MTF para la lente IMSS.....	3.22
3.3.1.2.5 Método Fermi.....	3.25
3.3.1.3 MRTD, MDTD.....	3.26
3.3.2 Respuesta del sistema frente al ruido.....	3.26
3.3.2.1 NETD.....	3.27
3.3.2.2 FPN.....	3.29
3.4 Calibrado del sistema.....	3.29
3.4.1 Caracterización del IMSS de la variación del tamaño del objeto en función de la banda seleccionada. Corrección de la magnificación.....	3.29
3.4.2 Determinación del Centro de Magnificación	3.30
3.4.3 Corrección de la Magnificación espectral a partir de miras.....	3.32
3.4.3.1 Determinación del escalado y desplazamiento del centro de magnificación con la longitud de onda.....	3.33
3.4.3.1.1 Mira rectangular, cuerpo negro 4 pulgadas.....	3.33
3.4.3.1.2 Cuerpo negro 2 pulgadas, Temperatura 50°.....	3.38
3.4.3.2 Determinación de las curvas de tendencia.....	3.39
3.4.3.2.1 Parámetros físicos del sistema.....	3.39
3.4.3.2.1.1 Cálculos FOV.....	3.40
3.4.3.2.2 Curvas de tendencia en magnificación.....	3.43
3.4.3.2.2.1 Determinación magnificación manual...3.44	
3.4.3.2.2.2 Determinación de la magnificación con un algoritmo.....	3.45
3.4.3.2.3 Tendencia en términos de intensidad.....	3.47
3.4.3.2.4 Desenfoque y otros.....	3.49
3.4.4 Estimación de la Difracción a partir de una mira rectangular.....	3.51
3.4.4.1 Efecto de la Difracción en la MTF del sistema.....	3.52
3.4.4.2 Efecto del desenfoque en la MTF del sistema.....	3.53
3.4.4.3 Resultados para la mira rectangular.....	3.54
3.4.5 Corrección del centrado/alineación de la imagen.....	3.55
3.4.6 Corrección de la magnificación para las imágenes exteriores.....	3.57
3.4.7 Estimación de la Dispersión a partir Placas Térmicas.....	3.63
3.4.8 Transformada de Fourier de una señal pulso de las intensidades	

de las placas y relación con la dispersión de la lente con la longitud de onda.	3.64
3.5 Procesado hiperspectral.....	3.69
3.5.1 Información espectral.....	3.70
3.6 Conclusiones.....	3.71
3.6.1 Resultados en la respuesta en frecuencia. MTF.....	3.71
3.6.2 Resultados del cálculo de Magnificación.....	3.72
3.6.3 Resultados del centro de Magnificación.....	3.72
3.6.4 Alineación del sistema cámara+lente.....	3.73
3.6.5 El fichero de calibración.....	3.73

4. Procesado de imágenes IR. Aplicación en firmas térmicas.

4.1 Determinación de las curvas de calibrado de Radiancia en Temperatura.....	4.1
4.1.1 Equivalencia entre las referencias y la radiancia medida.....	4.3
4.1.2 Corrección de la distancia y la longitud de onda.....	4.5
4.1.3 Corrección de la inhomogeneidad del sistema.....	4.7
4.2 Estimación de la temperatura en el tubo de escape de varios vehículos, a varias distancias a partir de los patrones de calibrado.....	4.7
4.2.1 Evolución a 100m con interpolación a 5 μm	4.8
4.2.2 Evolución a 23m con interpolación a 5 μm	4.10
4.3 Estimación de la emisividad del tubo de escape como cuerpo gris	4.12
4.4. Determinación del efecto atmosférico en las medidas exteriores.....	4.15
4.4.1 Descripción del Software.....	4.16
4.4.1.1 Longitud de onda, en términos de número de onda.....	4.16
4.4.2 Parámetros utilizados en las simulaciones.....	4.17
4.4.3 Medidas de Transmitancia total.....	4.18
4.4.3.1 Cálculo de Transmitancia de la Trayectoria horizontal de 100m de longitud	4.18
4.4.3.2 Calculo de Transmitancia de la Trayectoria horizontal de 23m de longitud	4.19
4.4.3.3 Comparativa de Transmitancia con la distancia al blanco..	4.20
4.5 Espectros de los gases de combustión extraídos de la simulación.....	4.20
4.6 Aplicación de la técnica de Fusión de imágenes en la determinación de picos de gases en el tubo de escape de varios vehículos.	4.21
4.6.1 Técnicas de fusión de imágenes	4.22
4.6.2 Aplicación de fusión de imágenes infrarrojas hiperspectrales.....	4.22
4.6.2.1 Colección de datos hiperspectrales procesados.....	4.23
4.6.2.2 Fusión de imágenes a diferentes longitudes de onda.....	4.24
4.6.2.3 Fusión de imágenes/ blancos a diferentes temperaturas....	4.28
4.7 Conclusiones.....	4.31
4.7.1 Problemas de los sistemas infrarrojos. Medidas de laboratorio vs. medidas exteriores.....	4.31
4.7.2 Calibración en Radiancia.....	4.32
4.7.3 Emisividad.....	4.32
4.7.4 Expectros de Emisión.....	4.32

5. Software de manipulación de imágenes hiperespectrales infrarrojas.

5.1 Descripción cualitativa de la herramienta. Menús.....	5.2
5.1.1 Menú Archivo.....	5.2
5.1.2 Menú Ver	5.2
5.1.3 Menú Configuración del sistema.....	5.3
5.1.4 Menú Análisis en longitud de onda	5.4
5.1.5 Menú Opciones de calibrado	5.4
5.1.6 Menú Ayuda.....	5.4
5.2 Módulo para abrir y tratar diferentes formatos de datos.....	5.5
5.3 Módulo de configuración y calibrado.....	5.8
5.4 Módulo de Calibrado de Radiancia en Temperatura.....	5.9
5.5 Módulo de Fusión.....	5.11
5.6 Modulo de TF.....	5.12
5.7 Módulo de ploteado: dibujar_funciones	5.12
5.7.1 MTF.....	5.13
5.8 Otras funciones.....	5.13
5.9 Conclusiones.....	5.15
5.9.1 Consideración del tipo de datos.....	5.15
5.9.2 Consideración formato de imágenes, ficheros.....	5.15

6. Conclusiones

6.1 Resultados de las medidas.....	6.2
------------------------------------	-----

7. Bibliografía

8. Apéndices

8.1 Descripción de la cámara IR Phoenix de Indigo.....	8.1
8.2 Manual de la lente hiperespectral.....	8.5
8.3 Datos medidos, ensayos y tablas de resultados.....	8.10

0. Introducción.

La zona del espectro infrarrojo ha adquirido una gran relevancia en los últimos años, gracias a las numerosas aplicaciones militares y civiles. El desarrollo de técnicas de detección y procesado, así como a la evolución en la portabilidad de los sistemas y el abaratamiento de los mismos; ha sido una de las principales causas.

La radiación infrarroja se define como un tipo de radiación comprendida en la región del espectro electromagnético junto al visible, en longitudes de onda mayores. Su existencia fue descubierta por Herschel, a partir del espectro solar en 1800 como un tipo de radiación comprendida en el rango espectral, en términos de longitud de onda, desde $0.7 \mu\text{m}$ hasta 1mm . Las ventanas de 3 a 5 y de 8 a 12 micras, tienen especial importancia en la investigación y en la evaluación de sistemas, estando desarrollados en estas bandas la gran mayoría de sensores infrarrojos, debido principalmente a las características de baja absorción de la atmósfera.

Centraremos este proyecto en la ventana intermedia MWIR correspondiente a la banda de 3 a $5 \mu\text{m}$.

El funcionamiento de los sistemas infrarrojos se basa en una cámara, para captar radiación infrarroja, con la electrónica asociada para procesar y presentar la información. Según la aplicación, precisarán mejores prestaciones para la detección o las técnicas algorítmicas posteriores; siendo muy dispar el interés de distinguir un blanco en el escenario o el de medir temperaturas en el mismo. Así, el amplio abanico de aplicaciones del mercado podría bifurcarse en dos, por un lado, la detección de blancos y aplicaciones de identificación y reconocimiento de objetos... etc., y por otro, la radiometría o la termografía o imagen térmica; técnica orientada a prevenir múltiples problemas de mantenimiento y control industrial, cuyo objetivo es definir en términos de temperatura, la imagen. No obstante, por su similitud ambos planteamientos del infrarrojo son caracterizados de formas parecidas.

La posibilidad de abrir el mercado de los sistemas infrarrojos a mercados más amplios, y con relevancia al sector privado, se debe fundamentalmente al desarrollo de sensores espectrales de imagen cada vez más pequeños, baratos, y ligeros. Además permite la amortización de inversiones una vez que estos sistemas dejan de tener un ámbito confidencial y secreto.

0.1 Objetivos del Proyecto

El objetivo de este proyecto es la caracterización de diferentes blancos en la ventana atmosférica de 3 a 5 micras mediante técnicas hiperespectrales. Se tratará de explotar las características hiperespectrales de tales blancos para obtener información de interés en el campo de la Defensa y Seguridad (por ejemplo: distinguir distintos tipos de blanco entre sí, distinguir entre blanco y señuelo, mejorar en una cámara determinada las características de Detección, Reconocimiento e Identificación (DRI)).

Al final de este capítulo describiremos la aplicación del sistema en la detección de gases de combustión. Para conseguir este objetivo se utilizará un instrumento ensamblado a una cámara de infrarrojos, el IMSS¹ de PAT² que se adaptará a una cámara de IR convencional.

¹ Image Multi Spectral Sensor

² Pacific Advanced Technologic

Este proyecto propone hacer de forma paralela: la adquisición, y tratamiento de imágenes térmicas con resolución hiperespectral.

Los objetivos propuestos y realizados de forma secuencial son los siguientes:

- a- Caracterizar los parámetros de una cámara IR
- b- Caracterizar los parámetros del sistema cámara IR – IMSS
- c- Caracterizar blancos con el sistema cámara IR - IMSS

0.2 Estructura del Proyecto

La composición del documento se distribuye en 5 capítulos diferenciados. Primeramente un capítulo a modo de introducción donde se exponen los conceptos básicos del infrarrojo, de las técnicas de medida y de los sistemas utilizados. A continuación se analiza la caracterización de las cámaras infrarrojas, parámetros y configuración. Dedicando parte del mismo a la cámara utilizada durante las medidas, modelo Phoenix de Indigo. Le sigue un capítulo de presentación de la lente hiperespectral ensamblada a la cámara, la lente IMSS. El tercer capítulo engloba el sistema completo y su caracterización, siendo necesario el estudio individual de los equipos que lo componen y su posterior ensamblado.

La siguiente parte del proyecto, la conforma un bloque de diferentes medidas y procesamiento de imágenes infrarrojas. Imágenes tomadas en laboratorio en condiciones controladas y en exterior a diferentes distancias sobre varios vehículos emitiendo gases del proceso de combustión.

Por último se dedica un capítulo a la aplicación desarrollada y otro a conclusiones y consideraciones extraídas del conjunto, además de anexos y bibliografía.

0.3 El espectro Infrarrojo. Teoría y Aplicaciones

0.3.1 Origen

En 1800, Sir William Herschel realizó el descubrimiento del infrarrojo, al querer determinar la cantidad de calor que pasaba a través de distintos filtros coloreados que usaba para observar la luz solar, observó que filtros de distintos colores parecían dejar pasar diferentes cantidades de calor. Pensó que posiblemente los colores tendrían temperaturas distintas, direccionó la luz del sol a través de un prisma de cristal para separar los colores en base a sus longitudes de onda y así medir las temperaturas de cada color. Herschel empleó tres termómetros para las diferentes bandas o colores del espectro. Según iba midiendo las temperaturas individuales de las luces violeta, azul, verde, amarilla, naranja y roja, comprobó que los colores tenían cada vez temperaturas más altas. Además, observó que las temperaturas de los colores aumentaban desde el violeta hasta la parte roja del espectro. Después de estudiar este patrón, Herschel decidió medir la temperatura existente justo más allá de la porción roja del espectro, donde la luz solar ya no era visible. Fue así como encontró que esta región tenía la temperatura más alta de todas las registradas.

El experimento de Herschel supuso una gran controversia porque fue la primera vez que alguien demostraba que existen tipos de radiación que no podemos ver con nuestros propios ojos. Lo que Herschel había descubierto fue un tipo de radiación más allá de la luz roja que ahora conocemos como radiación infrarroja.

0.3.2 El espectro electromagnético.

En termografía las ondas electromagnéticas se caracterizan normalmente por su longitud de onda.

La **luz visible** al igual que la infrarroja, es una radiación que comprende un cierto rango en el espectro electromagnético. La luz blanca visible es una mezcla de radiaciones con diferentes longitudes de onda y cuando vemos, por ejemplo, algo azul, es porque el cuerpo tiene la habilidad de reflejar o transmitir, más la parte azul del espectro, que el resto de longitudes de onda. Así, el ojo humano percibe los colores, que se corresponden con un rango de longitudes de onda muy estrecho. Los límites del ojo son aproximadamente $0.4 \mu\text{m}$ (violeta) a $0.7 \mu\text{m}$ (rojo). Entre ambos se encuentran el resto de colores del espectro visible. En torno a este rango las percepciones varían entre individuos, incluso existen animales, cuyo ojo percibe un rango mayor de longitud onda de radiación y ven por tanto en el infrarrojo. Nuestros ojos son detectores que han ido evolucionando para detectar la radiación visible.

En el análisis y evaluación de los sistemas infrarrojos, las definiciones de las bandas más que en sus características físicas están definidas a partir de las ventanas atmosféricas, y es en estas ventanas donde operan los diferentes detectores. Es la transmisión de la atmósfera, la que impone las bandas operativas. Estas bandas estarán justificadas más adelante en el apartado 0.3.5 al introducir el efecto de la transmitancia atmosférica.

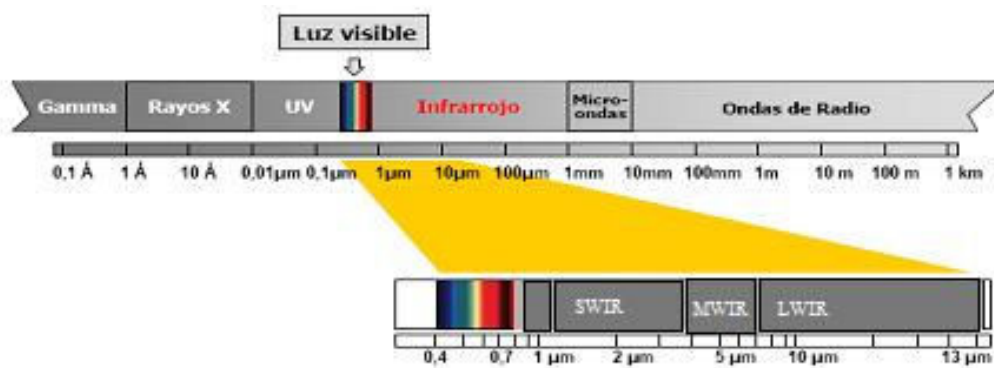


Fig.0.1: Espectro electromagnético. Rango infrarrojo

El esquema de la figura superior pretende dar una idea de las bandas en que se divide el espectro infrarrojo dentro del espectro electromagnético, y qué longitudes de onda son consideradas principalmente.

0.3.3 Definiciones y conceptos básicos.

Para entender la radiación térmica y las leyes básicas que rigen su comportamiento, partiremos del concepto de radiación y las magnitudes luminosas. Introduciremos cuatro magnitudes físicas fundamentales: flujo, iluminancia/irradiancia, intensidad y luminancia/radiancia, resaltando el carácter físico de sus unidades.

0.3.3.1 Flujo Luminoso.

La idea de flujo se halla íntimamente relacionada con la de corriente eléctrica. La radiación es una forma de energía, el flujo es una magnitud de potencia, que relaciona esta energía con una superficie o según un ángulo sólido dado.

Las unidades fotométricas se diseñaron para expresar una idea de la intensidad de las respuestas humanas ante la luz y no para proporcionar una medida objetiva de la energía transportada por una corriente luminosa. El color es la respuesta del ojo a un flujo determinado. Las unidades radiométricas no están relacionadas con la percepción individual, y son las que representan una visión genuina de la potencia luminosa. Únicamente éstas, utilizan con propiedad el vatio como unidad de flujo. Las consecuencias prácticas de la desigual sensibilidad del ojo humano ante los diversos colores se manifiesta en que incluso cuando la misma potencia atraviesa dos cristales de diferentes colores, uno verde y otro rojo, sus flujos valorados fotométricamente diferirán, al ser el ojo humano más sensible a la luz verde que a la roja.

La unidad fotométrica de flujo luminoso es el lumen. La curva espectral de eficiencia luminosa $V(\lambda)$, que establece la equivalencia entre lumen y vatio, se denomina curva de visibilidad para el rango completo de colores, que se basa en un "ojo medio", resultante de numerosas medidas realizadas sobre un amplio conjunto de personas. Por ejemplo, para un diodo led GaAs que emite en el infrarrojo, en una longitud de onda de 900nm, la respuesta es nula, ya que la radiación infrarroja no produce efectos visuales.

0.3.3.2 Iluminancia/ Irradiancia

Se llama Iluminancia a la densidad superficial de la luz que, proveniente de una fuente externa, incide sobre una superficie dada. Por ello, su unidad habitual es el lumen por metro cuadrado. La unidad utilizada en fotometría es el lux, donde un lux representa una iluminancia de un lumen por metro cuadrado.

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$$

El equivalente conceptual, no numérico, radiométrico de lux es el vatio por metro cuadrado (w/m^2). En este caso, la densidad superficial de flujo incidente se denomina Irradiancia.

Cabe resaltar que ni la iluminancia ni la irradiancia proporcionan la más ligera idea del brillo subjetivo de las superficies desde el punto de vista personal; así la iluminancia de una superficie negra mate es la misma que si la superficie es de un blanco intenso; ya que tanto la irradiancia y la iluminancia están únicamente relacionada con la densidad superficial de la radiación incidente, y no con la emergente.

0.3.3.3 Intensidad

La mayoría de las fuentes radiantes, poseen un carácter direccional. Es por ello, que para fuentes puntuales, se define una cantidad direccional que caracteriza la magnitud de la radiación por ángulo sólido, la intensidad luminosa; representando el flujo emergente de una fuente por unidad de ángulo sólido en una dirección dada. Su unidad es la candela, lumen por estereorradián.

En radiometría, el tercer concepto básico corresponde a la potencia irradiada en el interior de un ángulo sólido unidad. Se denomina intensidad radiante y se mide en vatios por estereorradián.

0.3.3.4 Luminancia / Radiancia

La luminancia expresa el brillo³ en una dirección dada. El área de la fuente desempeña un importante papel. Define la intensidad luminosa por unidad de área superficial de la fuente que caracteriza la radiación emergente, teniendo unidades de flujo luminoso por estereorradian y por unidad de área:

$$\text{candela/m}^2 \quad \text{ó} \quad \text{lumen}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2).$$

La superficie debe interpretarse como la proyección del área física de radiación sobre el plano perpendicular a la dirección en cuestión.

La versión radiométrica de la luminancia es la Radiancia, que se medirá en vatios partido por estereorradián y unidad de superficie: $\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$

0.3.3.5 Emitancia

La emitancia M_λ expresa la potencia de radiación con un intervalo espectral de $1\mu\text{m}$ alrededor de la longitud de onda λ emitida por cualquier cuerpo dentro de un hemisferio de área 1 cm^2 .

FOTOMETRÍA	RADIOMETRÍA
Flujo [F]= lm	Flujo [ϕ]= w
Iluminancia [E]= lx =lm/m ²	Irradiancia [E]=w/ m ²
Intensidad [I] =cd= lm/sr	Irradiancia espectral [E(λ)]=w/(m ² ·nm)
Luminancia =cd/m ² = lm/(sr·m ²)	Intensidad [I] = w/sr
Emitancia [L]= lux= lm/m ²	Intensidad espectral [I(λ)]=w/(sr·nm)
	Radiancia [L] = w/ (sr·m ²)
	Radiancia espectral [L(λ)]=w/(sr·m ² ·nm)
	Emitancia [M]= w/m ²
	Emitancia espectral [M(λ)]=w/(m ² ·nm)

Tabla 0.1: Equivalencias entre fotometría y radiometría y sus unidades⁴

³ apartado 0.3.6.2

⁴ simbología americana

0.3.3.6 Calor y Temperatura

A menudo, la temperatura y el calor son conceptos mal interpretados, y con frecuencia utilizados incorrectamente, a veces permutándose entre sí. El **calor** es la energía que tiene un objeto debida al movimiento de sus átomos y moléculas que están constantemente vibrando, moviéndose y chocando unas con otras. Cuando añadimos energía a un objeto, sus átomos y moléculas se mueven más deprisa, incrementando su energía de movimiento o calor.

Por el contrario, la **temperatura** es una *medida* de la energía media de las moléculas en una sustancia y no depende del tamaño o tipo del objeto. Considerando el hecho de que la temperatura está relacionada con el movimiento molecular, el mínimo movimiento imaginable es el nulo. Así la temperatura de cero absoluto es ese punto teórico en que las moléculas no se mueven, punto teórico ya que no se da en los procesos naturales, ni siquiera en los puntos más oscuros del espacio exterior. Si tenemos en cuenta la relación lineal que existe en los gases entre la temperatura y la presión, por extrapolación es posible obtener un punto en que las moléculas estén absolutamente quietas.

Cualquier objeto que tenga una temperatura superior al cero absoluto (-273,15 °C, o 0 Kelvin), irradiará ondas en todo el espectro, pudiendo generalizar a que todo cuerpo emite algún tipo de radiación y esta radiación emitida está relacionada con su temperatura en proporción a su cuarta potencia T^4 . Cuando un detector de infrarrojo está recibiendo más radiación o menos que un nivel medio de fondo, hablaremos de zonas más calientes o más frías, relativas a la temperatura ambiente.

0.3.3.7 Leyes de Radiación

Para entender los conceptos que rigen el estudio del infrarrojo, debemos partir de las fuentes de radiación, que son el inicio de la cadena radiométrica. Las fuentes estudiadas en este apartado son las que clásicamente se han denominado fuentes térmicas, debiendo su nombre al hecho de radiar energía electromagnética en relación directa a su temperatura. Las fuentes térmicas pueden dividirse en dos clases, los llamados radiadores de cuerpo negro y las fuentes de línea.

0.3.3.7.1 Cuerpos negros:

Un **cuerpo negro**, describe un objeto que absorbe toda la radiación incidente, para todas las longitudes de onda y ángulos de incidencia. A su vez, radia prácticamente en todas las longitudes de onda. Este concepto hace referencia a un radiador perfecto. Es un emisor y un radiador ideal.

Durante el siglo XIX, la radiación de cuerpos negros fue estudiada ampliamente dando como resultado la formulación de una serie de leyes empíricas.

0.3.3.7.2 Ley de Stefan-Boltzmann

En primer lugar se encontró que la relación a la cual se emitía energía es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, esto es:

$$W = \sigma \cdot T^4 \quad (0.1)$$

donde W es la potencia total radiada por unidad de superficie y σ la constante de Stefan.

Esta ecuación es estrictamente cierta para un cuerpo negro ideal, el cual es el emisor térmico de radiación más eficiente. Una aproximación a un cuerpo negro ideal puede obtenerse practicando un pequeño orificio en una cavidad cerrada, en estas condiciones, si la cavidad se mantiene a una temperatura uniforme y constante, la radiación que la abandona a través del hueco es esencialmente la de un cuerpo negro. Modificamos la ecuación quedando:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \varepsilon \in [0,1] \quad (0.2)$$

siendo ε , la **emisividad** de la superficie, teniendo el valor unidad para un cuerpo negro ideal. Término que desarrollaremos con mayor profundidad dada su importancia.

0.3.3.7.3 Ley de Wien

Se puede apreciar, que la distribución del espectro de energía emitido a una temperatura dada presenta un máximo definido que se desplaza hacia la zona de menores longitudes de onda cuando aumenta la temperatura, como se aprecia en la gráfica 0.4. Este desplazamiento se explica por la ley de desplazamiento de Wien, que puede expresarse como:

$$\lambda_{MAX} \cdot T = A \quad (0.3)$$

donde $A = 2897.8$ en $\mu\text{m K}$

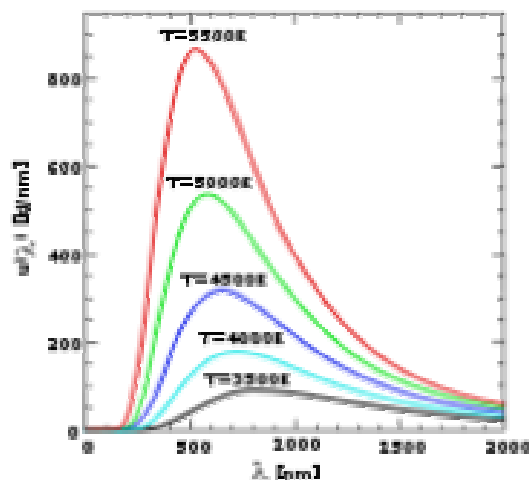


Fig. 0.2: Densidad de energía, y curvas de Planck para cuerpos negros a T° variable.

0.3.3.7.4 Ley de Planck

Las curvas de la figura y sus correspondientes leyes de variación pueden explicarse mediante la fórmula de Planck

Como se comentó anteriormente, todos los cuerpos a una temperatura por encima del cero absoluto, emiten radiación, debido a la movilidad de los átomos y moléculas que los componen. La distribución espectral de emitancia M emitida por un emisor ideal, el denominado “cuerpo negro” está descrita mediante la ley de Planck:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (0.4)$$

donde M_{λ} es la emitancia espectral de radiación medida en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

T , la temperatura del cuerpo negro medida en Kelvins

λ , la longitud de onda en μm .

h , la constante de Planck, $h=6.626176 \times 10^{-34}$ J·s

c , la velocidad de la luz en el vacío $c=2.9979246 \times 10^8$ m/s

k , la constante de Boltzmanns $k=1.380662 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹

Para establecer esta ecuación, Planck consideró los posibles modos u ondas estacionarias que pueden existir en una cavidad, asumiendo que la energía asociada con cada modo estaba cuantizada; esto es, la energía solo puede existir en múltiplos enteros de un determinado valor mínimo o cuanto. Por tanto, de acuerdo con Planck, solo se puede producir emisión de radiación en cantidades discretas, fotones.

La expresión también se suele escribir como:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \quad (0.5)$$

siendo c_1 , y c_2 constantes.

$c_1 = 3.741832 \times 10^4$ [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$]

$c_2 = 14387.86$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

Sin embargo, encontramos que en diferentes literaturas, dichas constantes pueden presentar unidades y valores diferentes.

La ley de Planck posibilita el cálculo de la emitancia M_{λ} siendo muy útil para muchos cálculos radiométricos. No obstante, resulta en ocasiones práctico determinar la temperatura T del cuerpo negro cuando es conocida su emitancia en estrechas bandas espectrales, considerando de forma inversa la ley de Planck.

$$T = \frac{c_2}{\lambda \cdot \ln \left[\left(\frac{c_1}{\lambda^5 \cdot M_{\lambda}} + 1 \right) \right]} \quad (0.6)$$

A partir de la ley de Planck, podemos relacionar todas las leyes empíricas presentadas. Vemos la equivalencia con la definición de la ley de Stefan Boltzmann,

integrando la ley de Planck respecto a la longitud de onda, de cero a infinito, nos da la expresión de la radiancia, del flujo radiado por unidad de área.

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T, \lambda) \cdot d\lambda = \left(\frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \right) \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad W \cdot cm^{-2} \quad (0.7)$$

$$\sigma \text{ constante de Stefan-Boltzmann } \sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

De la misma forma, pero derivando la fórmula de Planck aparece la relación de Wien que relacionaba la temperatura del cuerpo negro y la longitud de onda donde tiene el máximo el valor de emitancia.

La ley de Wien representa una versión simplificada de la ley de Planck considerando la aproximación de la exponencial:

$$e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)} \approx \frac{c_2}{\lambda \cdot T} \quad (0.8) \quad M_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)}} \quad (0.9)$$

El error relativo de emitancia cometido al aplicar la Ley de Wien, se define como el cociente relativo entre la diferencia con la ley de Planck, y la misma.

$$error = \frac{M_{\lambda}(Wien) - M_{\lambda}(Planck)}{M_{\lambda}(Planck)} \quad (0.10)$$

Actualmente, la utilización de la ley de Wien, se está reduciendo gracias al cálculo numérico que facilitan los potentes ordenadores personales.

0.3.3.7.5 Ley de Lambert o del coseno

En el caso de ciertos dispositivos emisores o reemisores, la lumiancia permanece constante; son las llamadas **fuentes lambertianas**; debido a ello la intensidad de la radiación sigue la ley del coseno.

La mayoría de las superficies naturales son lambertianas, a unos determinados ángulos, por encima de los cuales tienden a ser direccionales, por ejemplo la nieve es una fuente lambertiana limitada a un ángulo <40°.

Cuando la radiancia de un objeto, es igual en todas las direcciones, se cumple la siguiente relación:

$$\text{Intensidad de radiación:} \quad I(\theta) = I_n \cdot \cos \theta \quad (0.11)$$

Este concepto de fuente radiante independiente de la dirección es lo que definimos como superficie lambertiana, cuya superficie emite según la ley del coseno (L es cte. lo que cambia es la intensidad). Para estas superficies existe la ecuación de Lambert, que relaciona la emitancia M con la radiancia L, de la forma:

$$M = \pi \cdot L \quad (0.12)$$

0.3.3.7.6 Fuentes de línea

Al inicio de este apartado, comentábamos cómo existían dos tipos de fuentes térmicas, y su capacidad de radiar energía electromagnética en relación directa con la temperatura. Estas fuentes eran los radiadores de cuerpo negro y las fuentes de línea. A lo largo del proyecto, se han utilizado varios cuerpos negros para medidas de laboratorio, es por ello que se le ha dedicado una parte de esta introducción a explicar su comportamiento. De igual forma está justificada la mención a las fuentes de línea⁵, ya que uno de los objetivos es detectar emisiones de gases, puntuales en el espectro infrarrojo.

En el caso de gases excitados, en los cuales exista una pequeña interacción entre los átomos individuales, iones o moléculas, la radiación electromagnética se emite en unas longitudes de onda bien definidas. Este hecho puede ser deducido fácilmente a través de la teoría básica del modelo del átomo de Bohr, en el cual se considera que el átomo está constituido por un núcleo de carga positiva y electrones de masa m y carga q situados en determinadas órbitas alrededor del núcleo. Cada una de estas órbitas corresponde a un determinado nivel de energía cuyo valor viene expresado por la ecuación:

$$E_n = \frac{-m \cdot Z^2 \cdot q^4}{8 \cdot n^2 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0^2} \quad (0.13)$$

donde n es un número entero conocido como número cuántico principal. Cualquier electrón puede ser excitado desde su estado u órbita estacionaria a otra de más alta energía que en estado normal debería estar desocupada. Cuando un electrón efectúa una transición desde uno de estos estados excitados o niveles de energía a otro de menor energía emite un cuanto de radiación. La energía de un cuanto es precisamente la diferencia E entre las energías de las órbitas inicial y final. Este cuanto de energía es:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (0.14)$$

de esta ecuación se obtiene:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{m \cdot Z^2 \cdot q^4}{8 \cdot h^3 \cdot \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (0.15)$$

n_f y n_i valores del número cuántico principal correspondiente a las órbitas final e inicial respectivamente, implicados en la transición.

De ésta última expresión se deduce que toda la radiación en las fuentes de línea, tiene frecuencia fija, misma longitud de onda.

Las líneas del espectro emitidas mediante este sistema pueden presentar variaciones muy pequeñas, pudiendo decir que prácticamente son monocromáticas. En la práctica, siempre se producen una serie de fenómenos que ocasionan un incremento de la anchura del espectro de longitudes de onda o frecuencias asociadas con la emisión de fotones.

Este apartado viene a mostrar los efectos fotoeléctricos, lo cual justifica la existencia de los fotones.

⁵ Emiten un numero limitado de bandas de radiación abarcando un intervalo muy reducido de λ (casi monocromática).

0.3.4 Propiedades radiantes de los materiales

Las propiedades radiantes de un material hacen referencia a los fenómenos y magnitudes relacionados con la radiación electromagnética. Describen su capacidad para emitir, absorber, reflejar y transmitir la radiación óptica. La terminología empleada es probablemente una de las áreas técnicas más confusas, pese a coexistir varios estándares.

Los objetos con los que se trabaja habitualmente no se comportan como cuerpos negros y las leyes mencionadas anteriormente necesitan ciertas correcciones, de esta forma un cuerpo “real” absorbe sólo una parte de la radiación que le llega, refleja otra parte, y otra fracción la transmite; y de acuerdo a unas proporciones dependientes de la longitud de onda de la radiación incidente y del propio cuerpo.

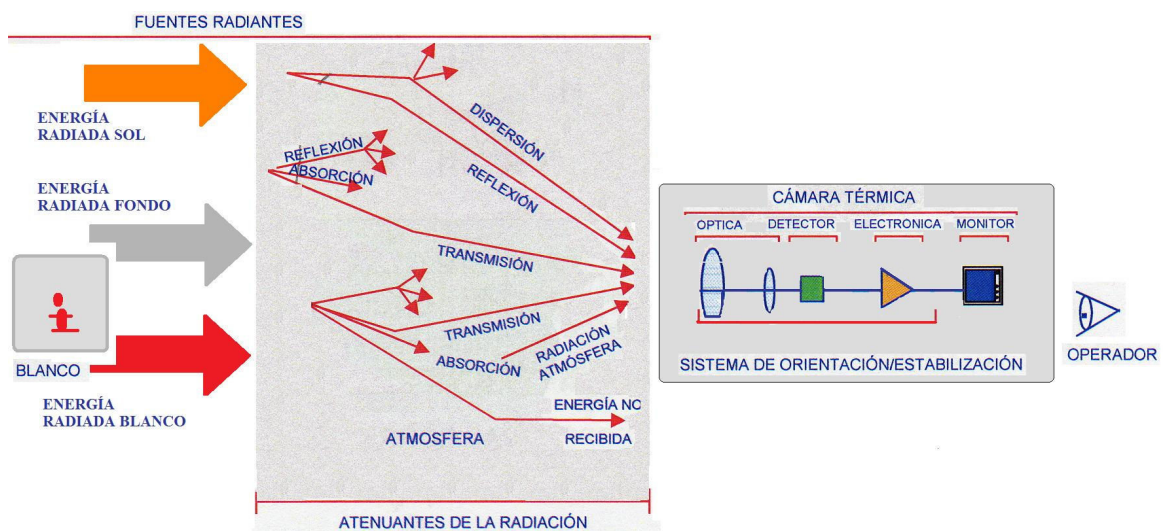


Fig. 0.3: Esquema de los agentes exteriores que condicionan la medición.

Existen dos ecuaciones importantes descritas con las propiedades radiantes de los materiales entre sí. La primera es el balance de energías y la segunda es la ley de Kirchoffs. Para poder comprender el fundamento físico de estas ecuaciones, es necesario entender la transmisión de calor, y las reglas que establece la termodinámica.

0.3.4.1 Sentido del flujo de calor

El calor fluye de manera espontánea desde las zonas calientes hacia las más frías, y ésta es la forma en que se transfiere calor de un cuerpo a otro. Si existe una diferencia de temperatura entre dos puntos, existirá un flujo de calor.

Existen varias formas de transmisión del calor, por **conducción** donde las moléculas chocan entre sí y se transfieren la energía cinética; por **convección** en cuyo caso las moléculas pueden moverse libremente como respuesta a una fuerza exterior, o por **radiación** que no requiere ningún medio material, y se fundamenta en la capacidad de **emisión, absorción, reflexión y transmisión**, características de los cuerpos como consecuencia de su naturaleza y su temperatura.

0.3.4.2 Balance de energías

Para estudiar cómo se comporta la radiación térmica y los intercambios de energía que se producen de forma continua y se pretenden registrar mediante las cámaras infrarrojas, partiremos del principio de conservación de la energía.

Tras el concepto de flujo se pueden definir otras magnitudes que intervienen en el intercambio de energía por radiación. Se han mencionado las 4 formas en las que se puede intercambiar radiación entre los cuerpos, por emisión, absorción, reflexión y transmisión. Cuando la radiación emitida por una o varias fuentes llega a una superficie, cierta parte es absorbida y retenida por el cuerpo; otra parte será reflejada, y otra será transmitida pasando a través del objeto.

Radiación incidente: W_I es toda la radiación que llega a un cuerpo desde su entorno.

$$W_I = W_\alpha + W_\rho + W_\tau \quad (0.16)$$

Radiación absorbida: W_α

Radiación reflejada: W_ρ

Radiación transmitida: W_τ

Radiación saliente: W_o es toda la radiación que deja la superficie de un cuerpo, independientemente de su fuente original.

$$W_o = W_\varepsilon + W_\rho + W_\tau \quad (0.17)$$

Radiación emitida: W_ε

La **Reflectividad** ρ se define para una radiación incidente con distribución espectral, composición, polarización y geometría dadas, como un cociente del flujo reflejado y el flujo incidente.

La **Absortividad** o coeficiente de absorción α está definida como el cociente entre el flujo absorbido por el material y el incidente bajo condiciones específicas.

Por último la **Transmisividad** espectral τ al igual que las definiciones anteriores corresponde al cociente de flujo transmitido sobre el incidente.

$$\begin{aligned} \text{energía absorbida} + \text{energía reflejada} + \text{energía transmitida} &= \text{energía total} \\ \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) &= 1 \end{aligned} \quad (0.18)$$

Para analizar la radiación saliente, debida a tres fuentes específicas, la radiación emitida, la reflejada y la transmitida, se define el concepto de **Emisividad** o habilidad que tiene un cuerpo para emitir.

$$\begin{aligned} \text{energía emitida} + \text{energía reflejada} + \text{energía transmitida} &= \text{energía total} \\ \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) &= 1 \end{aligned} \quad (0.19)$$

0.3.4.3 Leyes de Kirchoff's

De estas dos expresiones, podemos deducir que la capacidad o habilidad de un cuerpo para absorber radiación incidente coincide con su capacidad para emitir su propia energía en forma de radiación.

La ley de Kirchoff establece que el cociente entre la emitancia espectral de un objeto y su absorción es constante, siendo independiente de sus características geométricas y del material del radiador, pero función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de observación.

$$\alpha(\lambda, T, \theta) = \frac{M(\lambda, T, \theta)}{M_{BB}(\lambda, T, \theta)} \quad (0.20)$$

En una superficie de un elemento en equilibrio termodinámico, el coeficiente direccional de emisividad espectral es igual a la absorptividad.

$$\text{Equilibrio termodinámico: } \alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (0.21)$$

$$\text{cuerpo opaco } \tau(\lambda) = 0 \quad \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (0.22)$$

$$\text{cuerpo metálico } \rho(\lambda) \gg \varepsilon(\lambda) \approx 0 \quad (0.23)$$

$$\text{cuerpo negro } \varepsilon(\lambda) = 1 \quad \rho(\lambda) = \tau(\lambda) = 0 \quad (0.24)$$

$$\text{cuerpo gris } \varepsilon(\lambda) = cte \quad \rho(\lambda) = cte \quad (0.25)$$

0.3.4.4 Emisividad

No se pueden analizar imágenes en el infrarrojo, sin considerar una propiedad tan determinante como la emisividad, ya que aunque la temperatura sea la misma en dos objetos con emisividades diferentes, la radiación emitida por ambos es diferente.

Como se ha mencionado anteriormente, un cuerpo irradia en todas las direcciones, la cantidad de esta radiación o flujo radiado depende de la temperatura del cuerpo y de su emisividad. A mayor temperatura se emite más radiación y un objeto con mayor emisividad irradiará más que otro de baja emisividad. Lo que determina la energía irradiada por el cuerpo es la combinación de los dos factores, temperatura y emisividad.

Este hecho es cierto para la radiación saliente W_ε ya que tanto la potencia de radiación de la componente reflejada como la de la transmitida no dependen de la temperatura del objeto, sino de las emisividades de la fuente de reflexión y transmisión respectivamente.

$$\text{emisividad de una superficie } \varepsilon = \frac{\frac{dM(\lambda, T)}{d\lambda}}{\frac{dM_{BB}(\lambda, T)}{d\lambda}} \Rightarrow \varepsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{BB}(\lambda, T)} \quad (0.26)$$

La emisividad de una superficie en el espectro visible es muy diferente de la que presenta en infrarrojo. En general los metales tienen una emisividad muy baja, en dieléctricos la emisividad disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Un modo de medirla es comparar la radiación de un cuerpo negro que está a la misma temperatura que el material a medir. Aparecen varios inconvenientes en estas estimaciones, la emisividad de un material se ve degradada por las propias reflexiones del material y además los materiales con emisividades bajas presentan altas reflexiones.

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) \frac{dM(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{dM(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\sigma \cdot T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) \frac{dM(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda \quad (0.27)$$

0.3.5 Propagación atmosférica. Espectro. Transmitancia

La radiación infrarroja debe transmitirse, a través de la atmósfera, desde el cuerpo que la genera hasta el sistema que la va a detectar, y la atmósfera en sí misma es ya una fuente de radiación.

El fenómeno de la atenuación plantea una especial problemática porque introduce un error en la estimación de la radiación, que depende de la longitud de onda, de la banda espectral y de las condiciones meteorológicas.

Existen 4 procesos que pueden afectar a la radiación electromagnética captada, la absorción, scattering, emisión de la atmósfera y turbulencia. Los absorbentes más importantes son: el vapor de agua, dióxido de carbono y el ozono.

La atmósfera no transmite por igual todas las radiaciones electromagnéticas, sino que presenta una transmitancia espectral que varía con la longitud de onda de la radiación. La radiación infrarroja emitida y reflejada por el blanco se atenúa, por absorción y dispersión (scattering), al atravesar la atmósfera.

La transmitancia de la atmósfera responde a una función variable con las condiciones ambientales y meteorológicas, donde se distinguen varias ventanas espectrales que dividen el espectro en bandas para las cuales los diseños electrónicos de sistemas de infrarrojos están optimizados según la región del espectro en la que trabajan.

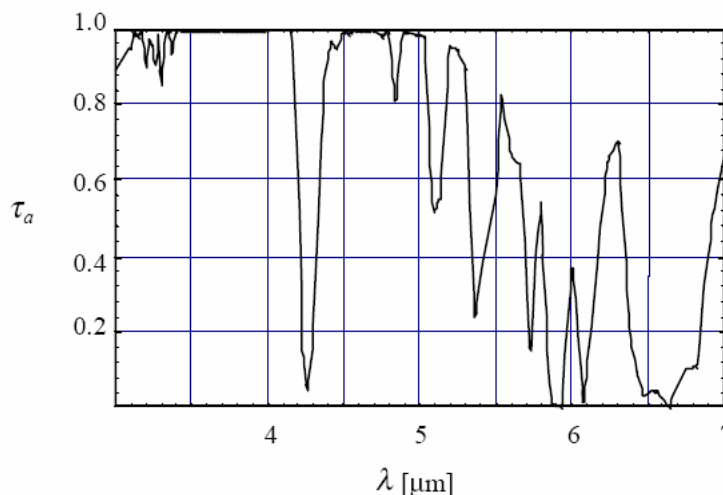


Fig. 0.4: Transmitancia atmosférica a 10m en el rango espectral de 3 a 7 μm .

Así tenemos desde la región ultravioleta UV, de 0.2μ a 0.4μ ; seguido del visible hasta los 0.7μ . El espectro propiamente infrarrojo comprende desde el infrarrojo cercano NIR⁶ de 0.7μ a 1.1μ aproximadamente; hasta los 30μ del infrarrojo de longitud de onda muy larga VLWIR⁷. Debido al fenómeno de la absorción atmosférica, aparecen 3 bandas intermedias: SWIR, MWIR, y LWIR; donde el desarrollo de sensores, sistemas y aplicaciones específicas ha dotado de mayor importancia. La primera o longitud de onda corta se extiende desde 1.1μ hasta 2.5μ , la segunda es la banda del infrarrojo medio que se sitúa aproximadamente entre los 2.5μ y 6μ ; y por último la banda de longitud de onda larga hasta los 14μ .

La intensidad de la radiación va disminuyendo a medida que nos vamos separando de la fuente, y el sistema IR detecta la radiación que le llega que corresponde a un delta de T menor que la temperatura real del cuerpo. Para calcular la transmisión de la radiación desde un objeto hasta la cámara es necesario considerar los siguientes procesos:

- absorción de la radiación
- dispersión de la radiación (scattering)
- fluctuaciones en el índice de refracción del medio (turbulencias)

La absorción y el coeficiente de dispersión se consideran en conjunto, bajo la definición de coeficiente de extinción.

$$\sigma(\lambda) = \alpha(\lambda) + s(\lambda) \quad (0.28)$$

$\sigma(\lambda)$ coeficiente de extinción

$\alpha(\lambda)$ coeficiente de absorción

$s(\lambda)$ coeficiente de Scattering

El coeficiente de extinción caracteriza la variación del flujo con la distancia.

$$\frac{d\phi}{dx} = -\sigma(\lambda)\phi \quad \Rightarrow \phi = \phi_0 \cdot e^{-\sigma(\lambda)\cdot x} = \phi_0 \cdot \tau \quad (0.29)$$

donde la transmitancia:

$$\tau_{atmos} = e^{(-\sigma(\lambda)\cdot x)} = e^{-\alpha(\lambda)\cdot x} \cdot e^{-s(\lambda)\cdot s} = \tau_{absorción}(\lambda) \cdot \tau_{scattering}(\lambda) \quad (0.30)$$

expresión conocida como la **ley de Beer**.

Tanto la absorción como la dispersión afectan a la intensidad de la señal.

⁶ Near Infrared

⁷ Very Long Wavelength Infrared

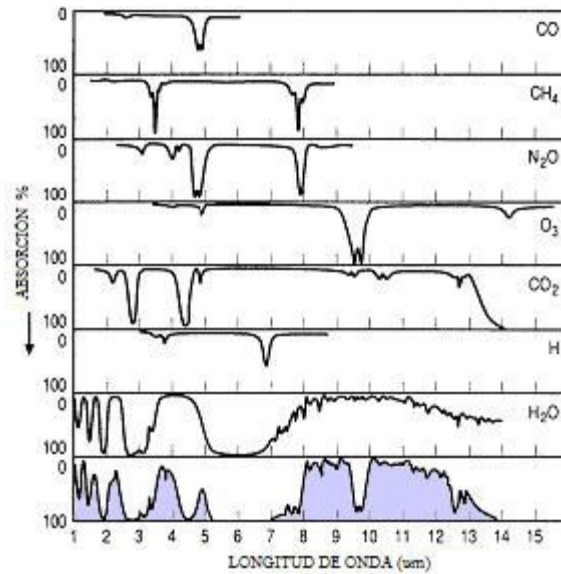


Fig. 0.5: Transmittancia atmosférica típica.

0.3.5.1 Scattering (dispersión)

La atenuación que va a sufrir la radiación electromagnética a su paso por la atmósfera se debe principalmente al Scattering o dispersión que las partículas en suspensión producen sobre la radiación y a la absorción, (comentada con anterioridad) de los gases que la componen. La atmósfera está compuesta de numerosos gases y aerosoles, que son las partículas como el polvo, humo, polución...etc.

0.3.5.1.1 Dispersión de Mie

La teoría matemática descrita por Mie describe el scattering y absorción de radiación por las partículas esféricas. El coeficiente de dispersión es una función del tamaño de la partícula.

Tamaño de las partículas $> \lambda/4$

La radiación se dispersa de forma uniforme en todas las direcciones.

0.3.5.1.2 Dispersión de Rayleigh

Cuando el diámetro de las partículas es pequeño en comparación con la longitud de onda incidente ocurre el fenómeno dispersivo conocido como Scattering de Rayleigh.

Tamaño de las partículas $< \lambda/10$

La radiación se dispersa fundamentalmente en la dirección de propagación de la radiación incidente. Este efecto es tanto más pronunciado cuanto mayor es el diámetro de las partículas.

La dispersión depende de la longitud de onda de la radiación según la relación

$$\tau_{scattering}(\lambda) = \frac{I}{I_0} = e^{-\gamma(\lambda) \cdot R} \quad (0.31)$$

La intensidad de la radiación transmitida se caracteriza por el coeficiente de transmisión y la influencia del tamaño de las partículas viene determinada por el coeficiente de dispersión.

El coeficiente de dispersión se define como el producto entre la sección eficaz de dispersión de 1 cm³ de atmósfera: κ_0 (su valor máximo es 3,8 que corresponde a la longitud de onda igual al radio de la partícula) y la sección geométrica $\pi \cdot N \cdot r^2$ de las N partículas contenidas en 1 cm³.

$$\gamma(\lambda) = \pi \cdot N \cdot k_0(\lambda) \cdot r^2 \tag{0.32}$$

Lo importante no es el tamaño de la partícula sino el cociente r/λ .

El coeficiente de dispersión para la lluvia viene dado por la siguiente expresión, donde Z representa la altura (en Km,m,nm) de agua precipitada por segundo, y r, el radio de las gotas en cm.

$$\gamma = 1.25 \cdot 10^{-6} \frac{Z}{r^3} \tag{0.33}$$

Para simplificar el problema de Scattering se utiliza la relación entre el coeficiente de dispersión y la longitud de onda de la radiación $\gamma(\lambda) \approx \lambda^{-\alpha}$. Cuando las partículas son muy pequeñas en relación con la longitud de onda $\kappa=4$, (dispersión de Rayleigh). Al aumentar el tamaño de las partículas κ tiende a cero y por tanto la dispersión es independiente de la longitud de onda. El coeficiente de extinción es independiente de la longitud de onda cuando las partículas que hay en la atmósfera son muy grandes, es así para fenómenos meteorológicos como lluvia, niebla, y fuerte nubosidad.

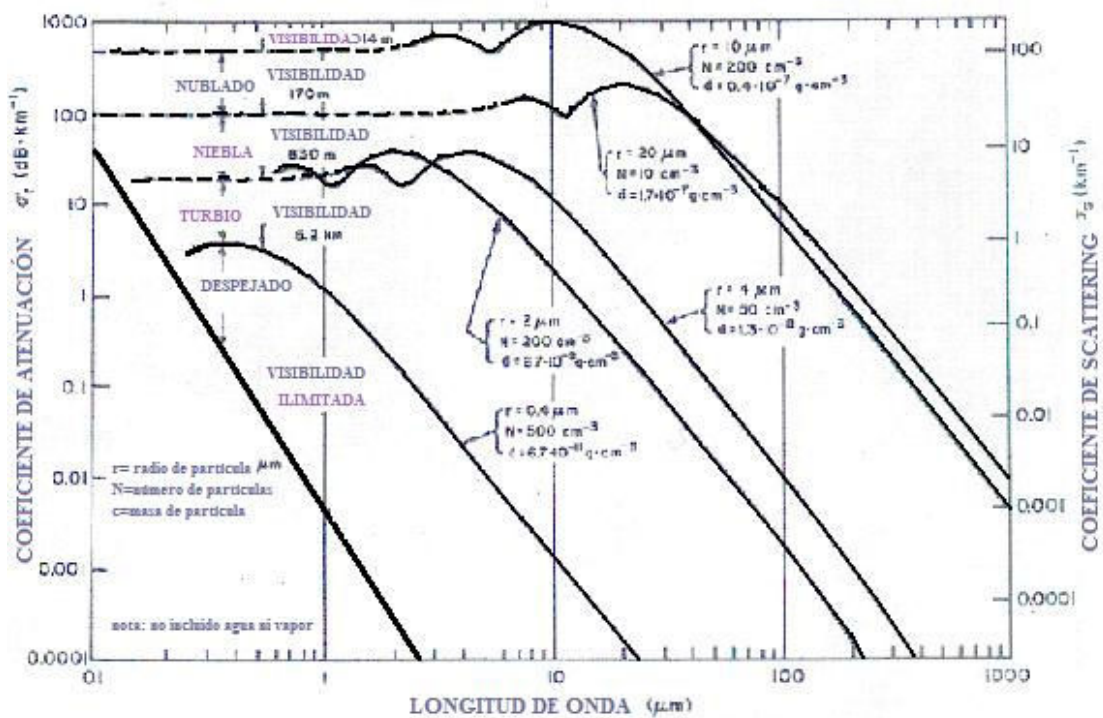


Fig. 0.6: Curvas de coeficientes de Scattering relativos como una función de parámetros meteorológicos, y dependencia de los mismos con la longitud de onda.

0.3.5.2 Turbulencia

Las turbulencias son debidas a fluctuaciones temporales en el valor del índice de refracción del aire debidas a la existencia de gradientes de temperatura, humedad o presión, que modifican la trayectoria de la radiación. Su efecto es más acusado a bajas altitudes. El viento hace que el aire se mezcle y que disminuyan los gradientes térmicos. Se caracteriza mediante el denominado parámetro de estructura del índice de refracción. Se diferencia de la extinción en que este último es homogéneo y afecta a todo el objeto por igual mientras que en el caso de la turbulencia no es uniforme a través de toda la imagen.

La dispersión y las turbulencias hacen la imagen más borrosa (*blurring*), perdiéndose detalles.

0.3.6 Sistemas Infrarrojos

Las imágenes infrarrojas, al igual que las visibles están limitadas por los sistemas de captura y procesado que generan variaciones y errores funcionales, de ahí que dediquemos uno de los capítulos a los sistemas propios de medida y su influencia en la toma y tratamiento posterior.

Es importante comprender los principios básicos del infrarrojo y la correspondencia de niveles de las imágenes capturadas, así como el funcionamiento de los sensores y sistemas ópticos.

Los equipos empleados en la obtención, manipulación y representación de imágenes son decisivos a la hora de contrastar datos y analizar resultados. Según las bandas en que se divide el infrarrojo encontramos sistemas y sensores muy diferenciados. Para el infrarrojo cercano NIR, por ejemplo se usan las cámaras para bajo nivel de luz LLLTV (*low light level TVs*), los intensificadores de imagen, telescopios para observar la luz de estrellas y las gafas o prismáticos de visión nocturna. Las siguientes tres regiones son en las que trabajan las cámaras de infrarrojos. La onda corta (SWIR), media (MWIR) y larga respectivamente (LWIR). Pese a la clasificación realizada en el apartado 0.3.2, de estas bandas los límites fijados por las cámaras reducen las franjas de trabajo habitual para los sistemas que operan en MWIR y LWIR de $3\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$. y de $8\mu\text{m}$ a $12\mu\text{m}$ respectivamente.

La estrecha relación entre el ámbito de la Defensa y la evolución de las tecnologías; por la necesidad de desarrollo de equipos y aplicaciones militares con especial relevancia en periodos de tensiones mundiales y conflictos bélicos; se pone de manifiesto también en los sistemas infrarrojos. El primer detector práctico que se utilizó como sensor de radiación infrarroja, fue el sulfuro de plomo PbS, y exclusivamente en un entorno militar, durante la Segunda Guerra Mundial, en Alemania. Posteriormente se han desarrollado nuevos materiales, como el Seleniuro de plomo PbSe, el Teluro de plomo PbTe o el arseniuro de indio InSb ampliando el rango de detección de $3\mu\text{m}$. a $5\mu\text{m}$. Para la región LWIR, comenzó a utilizarse HgCdTe.

En 1957, la firma americana *Veringiner Company* elaboró el primer termógrafo; trabajaba lentamente, sin embargo, el tiempo necesario para transformación en imagen mediante este termógrafo, era de 30 minutos. En 1960 se concluyen los primeros termovisores; uno de estos transformo 16 imágenes por segundo. De 1960 a 1965 fue el periodo de desarrollo de la termovisión de carácter estrictamente militar; entre los años 65 y 68 hubo un rápido desarrollo de aplicación práctica de la termovisión; especialmente en la medicina, en el campo energético, en la industria metalúrgica, siderúrgica y en la construcción de edificaciones.

0.3.6.1 Subsistemas infrarrojos.

Puesto que no somos capaces de detectar la luz infrarroja, son necesarios dispositivos electrónicos que la conviertan en señales eléctricas, fase de la que se ocupan los detectores y la electrónica necesaria que actúa de interfaz entre las señales obtenidas y la representación de las mismas, interpretables por el ojo del observador.

La segunda generación de sistemas de infrarrojos consistía en una disposición lineal o array de detectores conectado cada uno a un pre-amplificador. El método utilizado para conseguir una imagen completa era mediante barrido o *scanning systems*. La estructura de estos sistemas limitaba el número de detectores a unos 200. Limitación subsanada con la aparición de la tecnología basada en silicio CCD.

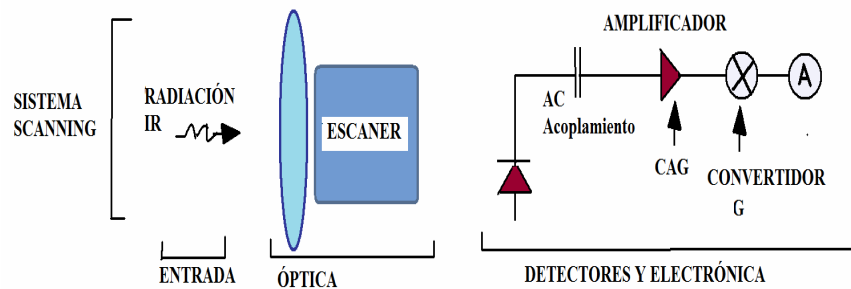


Fig. 0.7: Esquema genérico de un sistema de escaneo (*scanning*)

El desarrollo de los FPA's (*Infrared Focal Plane Arrays*) o matriz de detectores, posibilitó la aparición de los sistemas fijos denominados *staring systems*, en los que los detectores se disponen bidimensionalmente formando matrices y su salida es multiplexada hacia la etapa pleamplificadora. La implementación de las FPAs ha supuesto un gran avance para la tecnología de infrarrojos, en cuanto a sensibilidad y resolución. Las aplicaciones de FPAs para imágenes terrestres, trabajando en las bandas de $3\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$ y de $8\mu\text{m}$ a $12\mu\text{m}$, necesitan emplear detectores que poseen una banda de gap entre 0.1 y 0.25 eV, que no se podía alcanzar con detectores de silicio.

La cámara Phoenix de Indigo que forma parte del instrumental de medición de este proyecto basa su tecnología precisamente en esta técnica, componiéndose de una matriz de detectores de 640×512 píxeles.

Las limitaciones en la fabricación de los FPAs hacen que la superficie matricial tenga zonas muertas entre detectores contiguos. La relación entre la zona activa del detector y el área de la celda completa se denomina factor de relleno. Cuando la radiación de un objeto pequeño comparable a estas zonas, se va desplazando en la imagen al pasar por la zona activa de los detectores y fuera de ésta, provoca un efecto de parpadeo del objeto en la imagen.

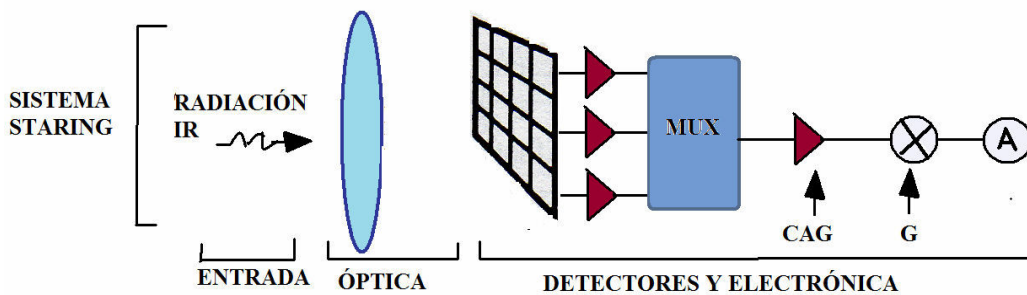


Fig. 0.8: Esquema genérico de un sistema fijo (*staring*)

El subsistema óptico es el primero en captar la radiación emitida por el objetivo de la escena en observación y enfoca esta radiación sobre los detectores. La disposición de estos varía de unos sistemas a otros, en los sistemas de barrido, un escáner mueve el campo de visión de la óptica sobre la escena, de forma que la señal de salida en el tiempo, de un detector; representa la intensidad de la escena a lo largo de una línea.

Tras los detectores se sitúa la electrónica de amplificación y adaptación, para adaptar los niveles eléctricos a unos valores y rangos más apropiados al resto de subsistemas electrónicos. En muchos sistemas, la siguiente etapa es la digitalización, que permite la posibilidad de añadir algoritmos de tratamiento digital. En general estos sistemas son comunes entre los sistemas de imágenes, sin embargo la óptica, detectores y la electrónica de los mismos es muy dispar y tiene que analizarse su funcionamiento y los efectos sobre la imagen captada a los que da lugar.

Podemos hacer una clasificación de las cámaras en base a tres generaciones, con sus correspondientes esquemas genéricos.

- 1ª Generación: Son cámaras de barrido utilizando un único detector o una matriz lineal de detectores fotoconductores (PsSe, InSb o HgCdTe). Trabajan, generalmente, en la ventana atmosférica de 8 a 14 μm ; con unos valores típicos de NETD de 0.2 ° C. Se comenzaron a introducir en los años 70 y se instalaron en miles de ellas en los 80. Un ejemplo de este tipo de cámaras son las basadas en el módulo común americano.
- 2ª Generación: Este tipo de cámaras se basa en una matriz bidimensional de detectores de HgCdTe, típicamente 480x4 (USA) o 288x4 (Europa). La señal correspondiente a una parte del blanco proporcionada por los cuatro elementos se suman, *Time Delay Integration* (TDI), lo que mejora la relación señal ruido en un factor de 2. Trabajan en las ventanas del infrarrojo medio y lejano. Su NETD está comprendida entre 0.1 y 0.05 ° C. Se comenzaron a instalar en los 80.
- 3ª Generación: Son cámaras que no tienen sistema de barrido ya que incorporan una matriz bidimensional de detectores, *focal plane arrays* (FPA), enfriados a temperaturas criogénicas, InSb, HgCdTe, QWIP, o sin enfriar, microbolómetros de VOx o a-Si, o basados en detectores piroeléctricos/ferroeléctricos. Comenzó a estar operativa desde los 90. La calidad de las imágenes térmicas de las cámaras no refrigeradas es suficiente para aplicaciones de corto y medio alcance.

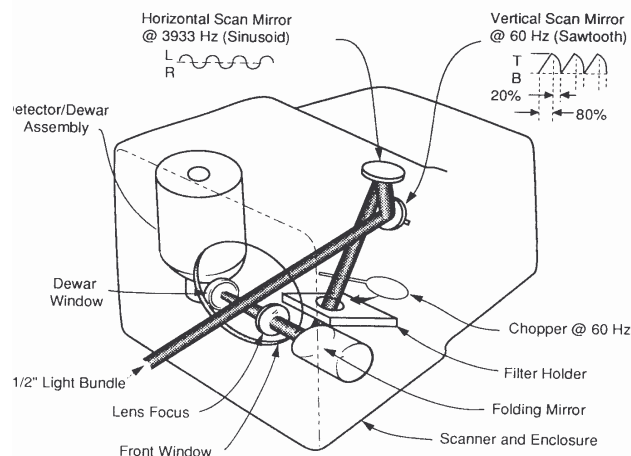


Fig. 0.9: Esquema de la primera generación de cámaras.

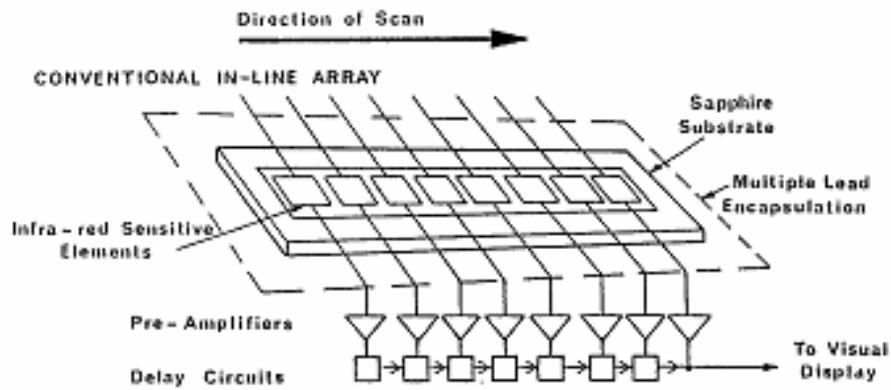


Fig. 0.10: Array de detectores de una cámara de segunda generación.

0.3.6.2 Brillo. Contraste

El brillo y el contraste son parámetros básicos con los que estamos familiarizados, ya que una modificación de cualquiera de ellos suele suponer un cambio visible en la imagen.

El brillo es el resultado de la reflexión y la refracción de la radiación en la superficie de un objeto. En general, el brillo es función del índice de refracción de la superficie, del grado de absorción de la radiación incidente y de otros factores, como las características concretas de la superficie observada (p.ej. grado pulido...).

El contraste se define como la diferencia relativa en intensidad entre un punto de una imagen y su alrededor. Un ejemplo simple es el contraste entre un objeto de brillo constante sobre un fondo de un brillo también constante. Si ambas superficies tienen el mismo brillo, el contraste es nulo, y el objeto perceptivamente será indistinguible del fondo. Según se incrementa la diferencia en brillo el objeto será distinguible del fondo al alcanzar un umbral de contraste.

Los controles de brillo y contraste son probablemente los más intuitivos para el observador. En la mayoría de los casos, son sustituidos por otras herramientas como Niveles o Curvas. En el proceso de calibración de las cámaras infrarrojas, uno de los primeros pasos, es la selección apropiada de estos parámetros, y cualquier comando de ajuste tonal incide en estas propiedades.

Para la medida de figuras periódicas simples, como la miras de barras que varían su brillo siguiendo una función sinusoidal, se emplean otras definiciones para el contraste. Una de las más comunes es la del contraste que se calcula mediante :

$$C_M = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})} \quad (0.34)$$

Donde C_M es el contraste, L_{max} es el mayor valor de brillo de la imagen, correspondiente al blanco y L_{min} es el menor valor de brillo de la imagen, correspondiente al fondo.

Existen ejemplos de fenómenos visuales asociados con el contraste. Teniendo dos objetos con igual luminancia y sin embargo ser apreciados con distinto brillo en función de la radiación que les rodea. En la figura 0.11, vemos cómo un mismo círculo de idéntica intensidad luminosa se aprecia con distinto brillo en función de la intensidad luminosa de su entorno.

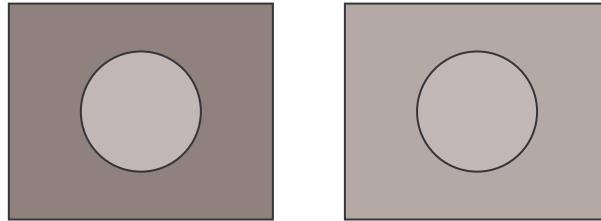


Fig. 0.11: Contraste simultáneo. Círculos misma intensidad, distinta percepción.

0.3.6.3 Conceptos ópticos

A lo largo de este documento haremos referencia a fenómenos ópticos y a su teoría física, reflexión...etc., siendo descritos y analizados conforme vayamos presentándolos. Las lentes Fresnel, el concepto de dispersión, la teoría de rayos, y el instrumental propiamente óptico empleado, nos harán ahondar sobre conceptos básicos de Óptica. No se han incluido sin embargo referencias a parámetros y leyes físicas de transmisión de calor, conductividad, calor específico...etc. por no considerarlas relevantes en nuestras medidas y consideraciones.

La óptica es la parte del sistema de visión que es capaz de enfocar la imagen observada y proyectarla en la matriz de detectores. Es uno de los elementos más importantes del sistema, aunque presenta un gran inconveniente: pérdidas por absorción y reflexión, lo que disminuye la energía que le llega al detector.

Para entender cómo funcionan las lentes y los problemas que llevan asociados es necesario analizar ciertos parámetros, aunque nos resulten elementales.

- Índice de Refracción: Cada material está caracterizado por un parámetro llamado índice de refracción (n). La Refracción es un fenómeno por el cual la propagación de la dirección de un rayo cambia cuando pasa de un medio a otro.
- La lente es el sistema óptico más simple y consiste en una superficie esférica definida como se muestra en la figura, donde viene caracterizada por los radios de curvatura, el índice de refracción y su anchura, que cuando es prácticamente despreciable se denomina lente simple.

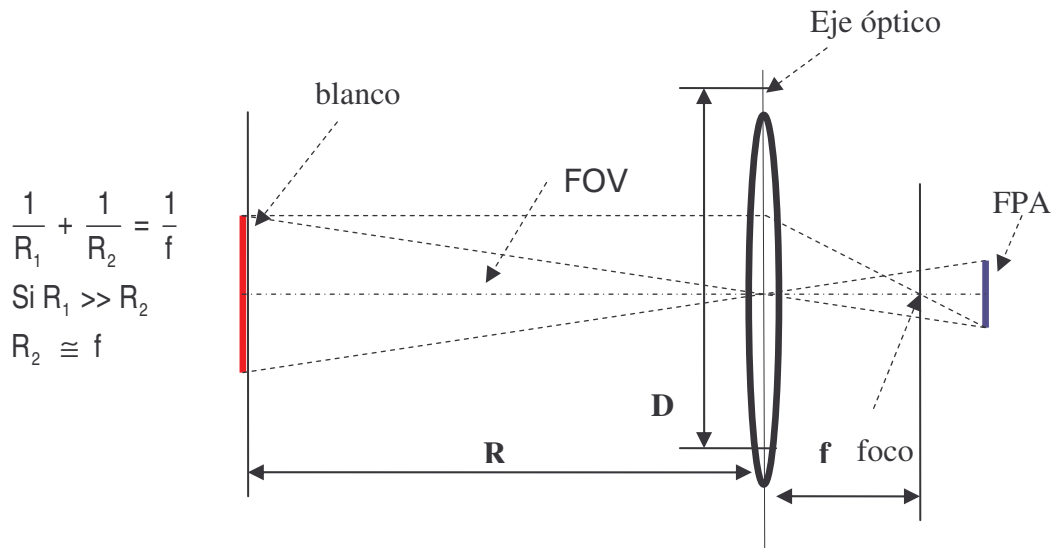


Fig. 0.12: Esquema de rayos para una lente simple.

f = focal del sistema

i = Distancia de la lente al punto donde se forma la imagen

R = Distancia de la lente a la que está situado el objeto

Para un objeto situado en el infinito, los rayos procedentes del objeto que atraviesan una lente, convergen en el foco imagen de dicha lente. Los objetos situados fuera del foco, siguen la relación siguiente.

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

La ecuación anterior permite calcular la posición exacta de la imagen de un objeto sin tener que usar el trazado de rayos. Si $0 \rightarrow \infty$ la imagen se forma en el plano focal imagen.

A partir de ella se deduce la magnificación del sistema que viene descrito por la expresión

$$M = i/R.$$

- Reflexión: Este suceso hace que una porción de la radiación incidente sobre una superficie se descomponga y se propague en una dirección completamente distinta. Es función del índice de refracción del material, aunque la dirección de propagación es independiente de la longitud de onda.

Las reflexiones en las imágenes infrarrojas suelen ser un inconveniente ya que muestran puntos calientes donde no existen, por el hecho de reflejar la radiación de los emisores fuente pudiéndolo interpretar el observador como uno de ellos. Este hecho justifica la necesidad de capas antirreflectantes sobre la óptica.

- Difracción: Es un fenómeno en el que las ondas de radiación pasan por los bordes de un objeto y penetran en el área sombreada del mismo, debido a la naturaleza ondulatoria de la radiación. Analizaremos con nuestro sistema, la relación de la difracción con la longitud de onda a partir de unas placas cuadradas, ya que este fenómeno depende del tamaño de la apertura que atraviesa, de la longitud de onda y de la distancia focal de la lente que será seleccionada.

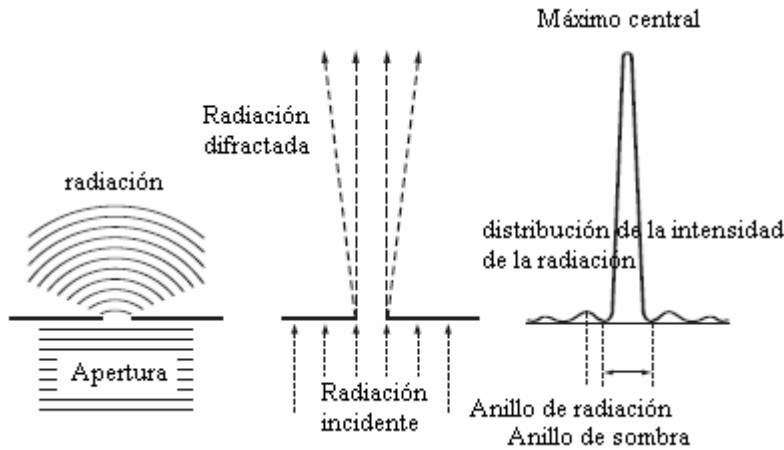


Fig. 0.13: Difracción de las ondas de Radiación.

Existen elementos ópticos de difracción laminados que controlan la dirección de la radiación creando difracción intencionadamente. Por ejemplo, cuando la radiación penetra en dos aperturas que están muy cercanas entre sí, se produce el mismo hecho que cuando se utiliza una apertura pequeña. En este caso, como se muestra en la figura siguiente, emerge una determinada dirección, a lo largo de la cual la propagación de las ondas de radiación resulta más sencilla. Aquí, la dirección en la que el movimiento de las ondas se hace más intenso es la dirección en la que coinciden las fases de las ondas propagadas desde ambas aperturas. Por esta razón las ondas de radiación se propagan provocando entre sí un aumento de intensidad en varias direcciones, una dirección en la que las longitudes de onda cambian un ciclo y se solapan, una dirección en la que cambian dos ciclos y se solapan, etc. La dirección en la que las longitudes de onda cambian un ciclo (una longitud de onda) y se solapan, se llama difracción primaria, y esta construcción de apertura se denomina red de difracción.

Las características de la red de difracción son las siguientes:

- a. El cambio del espacio entre las aperturas (el periodo de red) modifica la dirección de difracción.
- b. Cuanto mayor es el ciclo de difracción, más aumenta la cantidad de difracción (el “ángulo de difracción”).
- c. Las longitudes de onda más largas presentan un ángulo de difracción mayor.

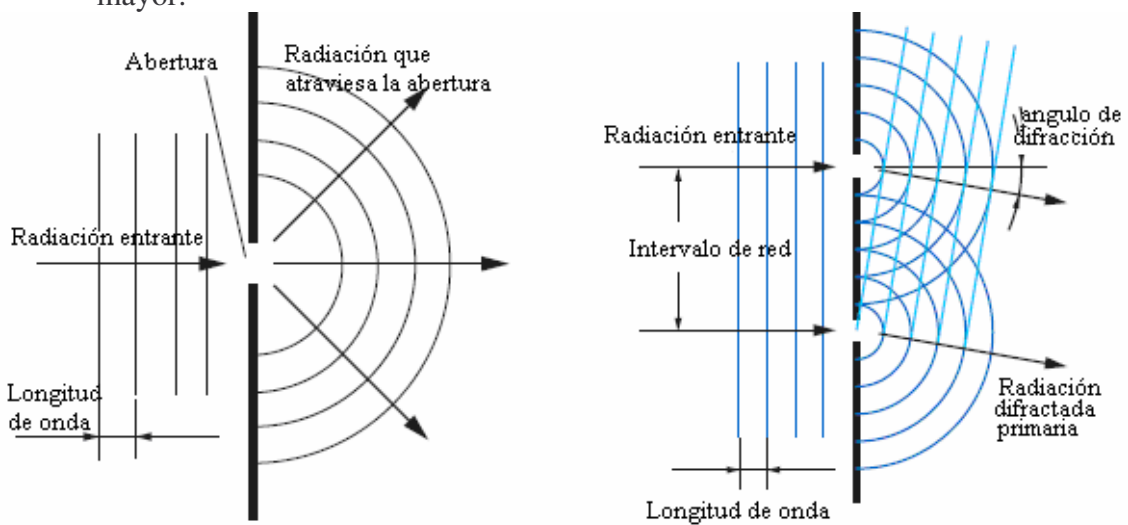


Fig. 0.14: Principio de generación de radiación de difracción

- **Dispersión:** Es un fenómeno por el cual las propiedades ópticas de un medio varían en función de la longitud de onda de la radiación que pasa por él. La diferencia del índice de refracción de dos longitudes de onda distintas se denomina dispersión parcial. La mayoría de los materiales ópticos tiene características de dispersión diferentes para ciertos rangos de longitudes de onda.

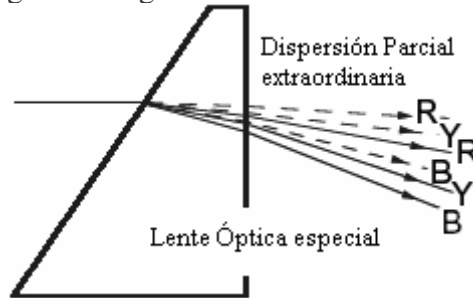


Fig. 0.15: Elemento óptico con Dispersión Parcial

- **Lente de Fresnell.** Con los elementos ópticos difractivos, las ubicaciones en las que la imagen se forma a lo largo del eje óptico a longitudes de onda diferentes se alinean a intervalos equivalentes. Sin embargo, para los elementos ópticos refractivos al tener características de dispersión no lineales, las ubicaciones para la formación de imágenes de cada longitud de onda se espacian de manera no uniforme. Por este motivo surgió la idea de una red de difracción de tipo fase, en la que la red adopta una forma de hoja de sierra.

Una red de difracción de tipo fase genera radiación difractiva formando la red en un círculo concéntrico. Cambiando parcialmente el periodo de la red (el espaciado de la red). Como se ha mencionado anteriormente, la radiación que emerge de la red de difracción tiene un ángulo de difracción mayor en las longitudes de onda más largas. En otras palabras, la radiación a una longitud de onda mayor forma una imagen más cercana a la red de difracción, mientras que la que tiene una longitud de onda más corta forma una imagen más alejada.

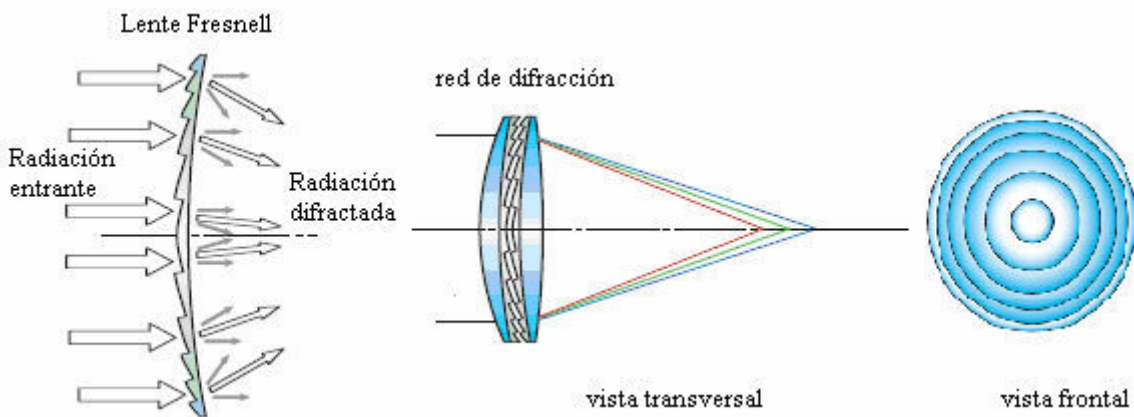


Fig. 0.16: Lente de Fresnell.

Estos conceptos serán comentados en nuestro sistema infrarrojo conforme lo caracterizamos frente a los fenómenos físicos mencionados. Aunque el fabricante no desvela el tipo de lente hiperespectral del sistema IMSS, algunas de las investigaciones realizadas sobre el mismo apuntan a un tipo de lente Fresnell, que aprovecha las características de dispersión parcial de la óptica.

0.4 Procesado de imágenes hiperespectrales

Desde el inicio de la digitalización de imágenes, su mayor resolución, y la aplicación práctica en entornos más allá de ámbitos científicos y militares; se ha visto sustentada por el desarrollo de ordenadores más potentes y procesadores con gran capacidad de cálculo y almacenamiento.

La mayoría de las imágenes digitales provienen de escenas del mundo real, sin embargo otras son artificiales creadas con técnicas de **fusión**, modelos de procesamiento o sistemas electrónicos de test.

En este punto, haremos una breve mención del tratamiento de imágenes que será desarrollado en el capítulo 4 con ejemplos del procesamiento sobre imágenes experimentales con nuestro sistema.

0.4.1 Definición de Imagen

El concepto de imagen, puede ser un tanto difícil de definir. Para nosotros hará referencia a una función bidimensional de la intensidad de radiación que, para un par de coordenadas que definan un único punto (x,y) , le haga corresponder el valor de la intensidad o brillo de la imagen en ese punto $f(x,y)$. Esta definición es conocida como imagen monocromática, ya que no contempla la componente espectral λ .

De esta forma, dependiendo del rango del espectro al que corresponde la radiación y a los diferentes sistemas de captura, somos capaces de obtener diferentes imágenes como muestra la figura 0.17.

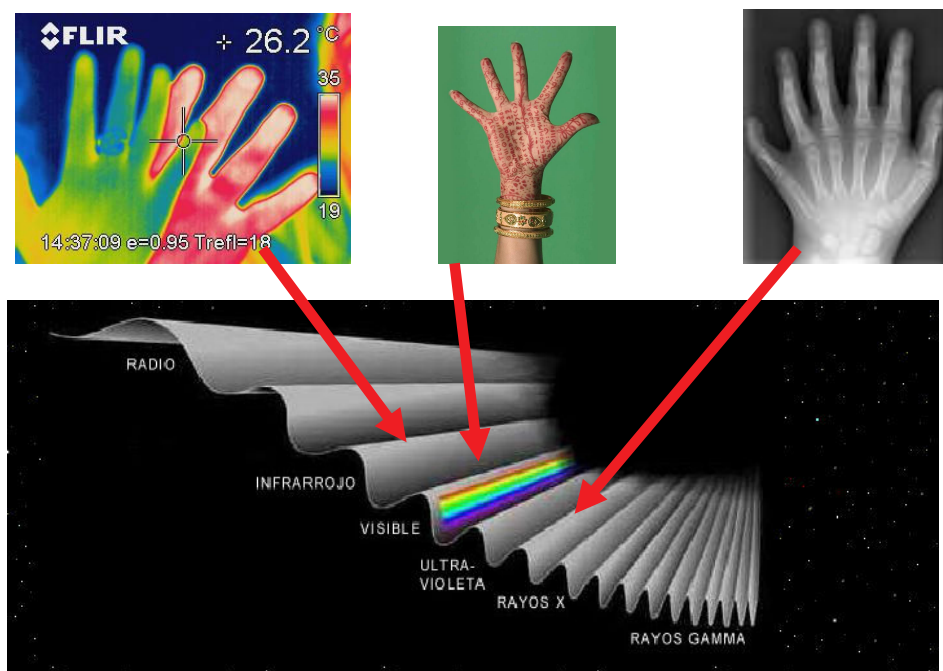


Fig. 0.17: imágenes en el espectro electromagnético

El valor de la intensidad de una imagen en un punto considerado, $f(x,y)$, se denomina nivel de gris (l) de la imagen en ese punto. Este nivel varía dentro del rango:

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (0.35)$$

El intervalo $[l_{\min}, l_{\max}]$ se denomina escala de grises. En la práctica, esta escala se traslada al intervalo $[0, L]$ donde $l=0$ se considera negro y $l=L$ se considera blanco. (mayor energía representable). Todos los valores intermedios son matices de gris variando de forma continua entre el negro y el blanco.

Los programas utilizados en el proyecto nos permitían variar el modo de captura en escala de grises o bien otro tipo de paletas; incluso ampliar el rango de niveles de forma directa con el rango de bits asociados a su codificación. Se hará mención en las variaciones de estos parámetros en sus respectivos apartados; en general, las imágenes presentes están capturadas en 8 bits, y por tanto el rango de grises va de 0 a 255, salvo las imágenes donde se ha aplicado la técnica de Fusión y se presentan con las tres componentes cromáticas básicas (rojo, verde y azul RGB⁸).

Por último, podríamos definir la Termovisión, como la técnica que permite la transformación de las imágenes que se forman por radiación infrarroja, emitidas por los objetos que nos rodean, en imágenes visibles.

0.4.2 Técnicas hiperespectrales

El concepto de imagen hiperespectral, fue introducido por el *Jet Propulsion Laboratory de NASA*⁹ en el desarrollo del sistema AVIRIS¹⁰, como espectroscopia de imágenes. Es una técnica de teledetección con gran acogida en la observación remota de la Tierra, aplicada a situaciones que requieren respuestas críticas, como la detección de objetivos para despliegues militares de seguridad y defensa, planificación, prevención y respuesta ante riesgos naturales, monitorización de vertidos y gases...etc.

El término HSI (*Hyper-Spectral Imaging*) hace referencia a la colección de una base de datos con información tanto en el dominio espacial como en el espectral y temporal. En el tratamiento de estos datos, existen 4 dimensiones, 2 espaciales, una espectral y otra en el dominio del tiempo.

La forma de obtener estos datos, como mencionamos en los sistemas infrarrojos genéricos comprende dos técnicas:

- barrido o *push broom* : los datos espaciales se capturan en la dimensión temporal
- paso fijo o *sep stare*: los datos espectrales se capturan en la dimensión temporal

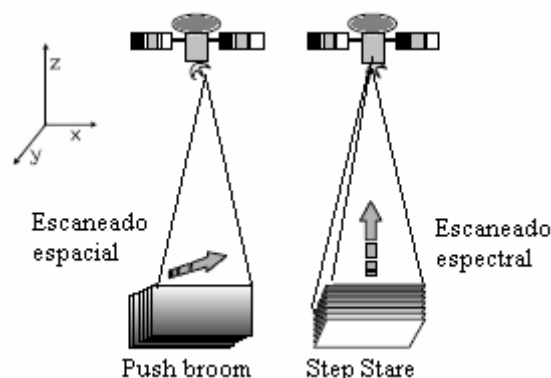


Fig. 0.18: Técnicas de detección remota.

⁸ Red, Green, Blue

⁹ National Aeronautics and Space Administration

¹⁰ Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer

Durante las últimas décadas se ha desarrollado un gran número de sistemas de imagen hiperespectral y estas tecnologías han sido aplicadas en la prevención de amenazas en plataformas espaciales, usando métodos dispersivos o FTIR (*Fourier Transform Infrared*) que requiere la operatividad de los sensores en modo barrido. La desventaja de este método es que el tiempo de permanencia del blanco es una función de la velocidad de la plataforma, y esto limita la relación señal/ruido del sistema (SNR). Muchas de las tecnologías emergentes, se basan en el modo paso fijo o *sep stare*, permitiendo un mayor tiempo residente del blanco pudiéndose mejorar las prestaciones de señal a ruido, SNR.

Este proyecto pretende discernir mediante imágenes hiperespectrales en firmas térmicas, la presencia de CO₂ y otros gases, así como la dependencia de la longitud de onda de emisión con su temperatura. Es importante asociar esta aplicación con el uso relativamente reciente que se hace de las imágenes hiperespectrales en la prevención de la amenaza de misiles.

Los misiles activados tienen una fuerte firma espectral en el infrarrojo medio debido a la alta concentración de CO₂ cuya señal está desplazada respecto al CO₂ frío, además de ser mucho mayor que la absorción de dióxido de carbono en la atmósfera. Existen dos picos en el espectro, referenciados como rojo y azul, observados en todos los motores de misiles, sólidos y líquidos; y que las diferentes firmas espectrales del cohete pueden ayudar a su identificación.

Un ejemplo de aplicación extraído de la literatura es la captura de la pluma del misil Atlas tomadas por el sistema IMSS.

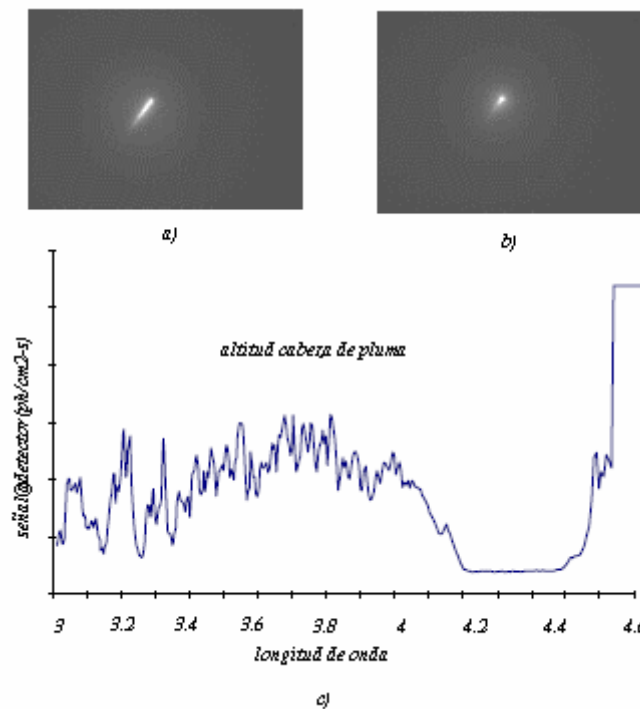


Fig. 0.19: a) muestra la imagen a 4.6 μm , la b) a 3.3 μm y la c) la diferencia espectral a lo largo del motor.

Las técnicas hiperespectrales y concretamente nuestro dispositivo IMSS, permiten detectar la firma espectral de un gas como el CO₂, teniendo importancia desde la aplicación militar que caracteriza ciertas combustiones como la incipiente preocupación por controlar y cuantificar la contaminación ambiental.

0.4.2.1. Comparativa entre sistemas hiperespectrales. Estado del arte

A continuación presentamos una comparativa de los sistemas hiperespectrales utilizados en la actualidad. Viendo la valoración extraída de las ventajas de cada uno de estos métodos, se reseña el IMSS como óptimo debido a su versatilidad y prestaciones.

	AOTF (Acousto Optical Tunable Filters)	CVF (Circular Variable Filters)	LVF (Linear Variable Filters)	IFT (Sagnac Imaging Fourier Transform)	IMSS (Image Multi-Spectral Sensing)	TE (Tuned Etalon)
Rango espectral FSR (Full Spectral Range)	1 octava	1 octava	1 octava	DC a corte	1 octava	<1 octava
Resolución espectral	50	288	200	200	400	100
Resolución espacial	4.65 mrad	f-number	f-number	f-number	f-number	f-number
Campo de Vision FOV(Field of View)	medio	medio	medio	pequeño	grande	pequeño
Caudal (Transmisión)	bajo	medio	medio	bajo/medio	alto	medio/alto
Colección de datos	Step Stare	Step Stare	Push Broom	Push Broom	Step Stare	Step Stare
Selectividad de longitud de onda	ágil	no	no	no	ágil	ágil
Complejidad del sistema						
Óptica	Compleja	Simple	Simple	Compleja	Simple	Compleja
Procesado de Señal	Simple	Simple	Simple	Compleja	Compleja	Simple
Partes mecánicas	no	si	si	no	si	si
Sensibilidad a la Temperatura	si	no	no	si	no	si
Tamaño	pesado	medio	medio	pesado	pequeño	pesado
Peso	alto	bajo	bajo	medio	liviano	alto
Potencia	alta	baja	baja	baja	baja	baja
Puntuación	4	7	6	3	10	5

Tabla 0.2: Estado del arte de sistemas hiperespectrales a modo comparativo.

SENSOR	EMPRESA	CANALES	RANGO (μM)
<i>AAHIS</i> <i>Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System</i>	<i>SETS</i> <i>Technology</i>	288	0.43-0.83
<i>AISA</i> <i>Airborne Imaging Spectrometer for Applications</i>	<i>VTT</i>	286	0.45-0.9
<i>ASAS</i> <i>Advanced Solid State Array Spectroradiometer</i>	<i>NASA</i>	62	0.4-1.06
<i>CASI</i> <i>Compact Airborne Spectrographic</i>	<i>ITRES</i> <i>Reserch</i>	288	0.43-0.86
<i>CIS</i> <i>Chinese Imaging Spectrometer</i>	<i>Shanghai</i> <i>Institute of</i> <i>Technical</i>	91	0.4-12.5
<i>DAIS 21115</i> <i>Digital Airborne Imaging Spectrometer</i>	<i>GER Corp.</i>	211	0.4-12
<i>DAIS 7915</i> <i>Digital Airborne Imaging Spectrometer</i>	<i>GER Corp.</i>	79	0.4-12
<i>FTVFHSI</i> <i>Fourier-Transform Visible Hyperspectral Imager</i>	<i>Kestrel Corp.,</i> <i>FIT</i>	256	0.44-1.15
<i>HIRIS</i> <i>High Resolution Imaging Spectrometer</i>	<i>NASA/EOS</i>	192	0.4-2.5
<i>HYDICE</i> <i>Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment</i>	<i>Naval Research</i> <i>Laboratory/ERIM</i>	210	0.413-2.5
<i>IMSS</i> <i>Infrared Multispectral Sensing</i>	<i>Pacific Advanced</i> <i>Technology</i>	320	2-5
<i>IRIS</i> <i>Infrared Imaging Spectroradiometer</i>	<i>ERIM</i>	256	2-15
<i>MIDIS</i> <i>Multiband Identification and Discrimination Imaging Spectroradiometer</i>	<i>Surface Optics</i> <i>Corp. JPL</i>	256	0.4-30

Tabla 0.3. Sensores hiperespectrales existentes en el mercado.

0.5 Conclusiones

En este capítulo se han introducido los conceptos básicos de la Teoría Infrarroja, así como la nomenclatura que describe a las diferentes magnitudes. Cabe mencionar la dispar literatura encontrada y la falta de una regulación que unifique de forma estandarizada tanto las magnitudes como sus unidades.

Se ha incluido en esta Introducción: las propiedades físicas relacionadas con la Radiación Infrarroja, los factores que limitan y determinan su propagación y una clasificación de los Sistemas Infrarrojos y su evolución, además de conceptos ópticos elementales que serán utilizados para explicar a lo largo del texto varios de los fenómenos presentes en las medidas.

Por último se ha dedicado un apartado a describir las técnicas hiperspectrales aplicadas al espectro infrarrojo, que es la base de nuestro proyecto; además de incluir unas tablas, con el objetivo de obtener una comparativa del sistema infrarrojo utilizado, el sensor multiespectral IMSS, con otros sistemas infrarrojos hiperspectrales.

1. Cámara de Infrarrojos.

Antes de pasar a describir la estructura de una cámara infrarroja y su comportamiento, justificaremos la necesidad de la caracterización de cada una de las partes del sistema y su posterior análisis global.

La utilización de un sistema hiperespectral implica que la energía que llega a la cámara, (función de la anchura de la banda de longitudes de onda para cada paso) es mucho menor que la que le llegaría si no existiese el sistema hiperespectral. Dado que la respuesta de la cámara es función de ciertos parámetros seleccionados (*brillo* y *contraste*), es necesario caracterizar la cámara en dichas condiciones. Por otra parte, para poder comparar la eficiencia de la lente difractiva, es necesario probar la cámara primero, en ausencia de la lente hiperespectral.

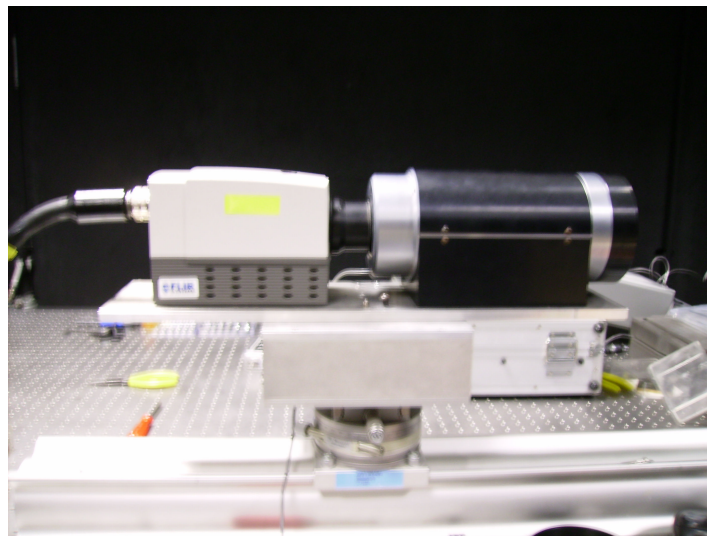


Fig.1.1: Cámara MWIR Phoenix + Lente Janos Campo Estrecho

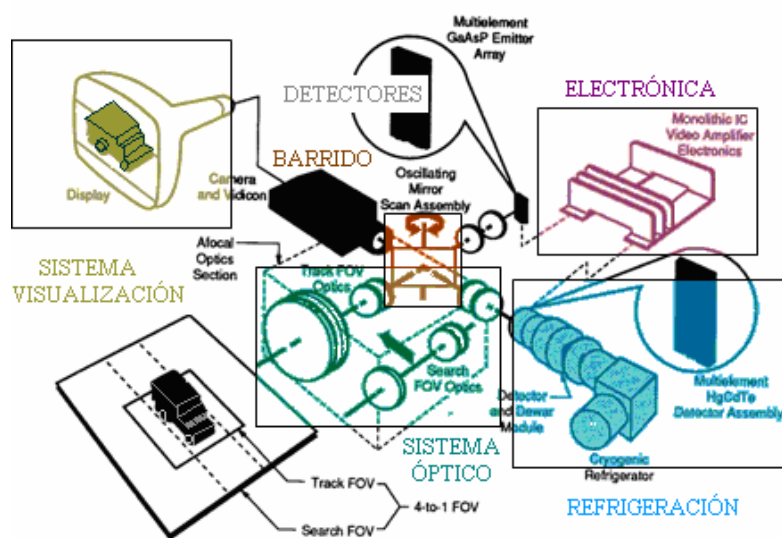


Fig.1.2: Diagrama de las partes de una cámara de IR

Las Cámaras de IR pueden descomponerse en 5 bloques fundamentales. En primer lugar el sistema óptico. Para las que no se basan en FPA¹, el siguiente bloque importante sería el sistema de barrido, que implica trabajar con una matriz de 1,4, ó 6² columnas barriendo el escenario mediante un espejo que gira. Los detectores, que pueden trabajar, bien a temperatura próxima al ambiente, o en torno a 80 K en caso de cámaras refrigeradas. El siguiente bloque engloba la electrónica de proceso y por último el sistema de presentación.

Para la caracterización de la cámara de infrarrojos, presentamos en primer lugar sus parámetros básicos y una clasificación estandarizada de las mismas.

1.1 Características genéricas de las cámaras y medida de las mismas.

En las pruebas de imágenes infrarrojas, existe un amplio abanico de funciones relativamente estandarizadas para evaluar las diferentes prestaciones de las cámaras; pudiéndose dividir en 7 grupos, cualitativas, características de respuesta, de ruido, de resolución de imagen, geométricas, de precisión y operativas.

1.1.1 Características Cualitativas (imagen subjetiva).

Las cámaras infrarrojas, son sistemas de imágenes usadas para mejorar la capacidad humana de ver durante el día, en la oscuridad y en condiciones de poca visibilidad, llevándose a cabo una evaluación subjetiva de las cualidades de la imagen. Es por ello, que las características cualitativas, que permiten reconocer formas son las más importantes en aplicaciones de observación militar con cámaras IR. Desde el punto de vista del observador, interesa que en los mejores rangos de detección (decida si hay algo o nada), sea capaz de reconocer (distinguir el blanco de objetos similares) e identificar (determinación del tipo específico) blancos enemigos, en diferentes escenarios. Estos conceptos de Detección, Reconocimiento e Identificación se engloban dentro de las características cualitativas de la imagen, por su dependencia con el observador.

Son un ejemplo, medidas como la MRTD (*Minimum Resolvable Temperatura Difference*) y la MDTD (*Minimum Detectable Temperatura Difference*). La MRTD mide la capacidad de detectar y reconocer blancos en un fondo no uniforme mientras que la MDTD es una medida de la capacidad de detección sobre fondo uniforme. A efectos prácticos, suele ser la MRTD la más importante. Dan algunas indicaciones sobre la resolución de temperatura del sistema y sobre la capacidad del sistema de medir objetos de pequeño tamaño. Como no caracterizamos la IMSS con la intención de utilizar el sistema en aplicaciones DRI³, no hemos añadido estas figuras en el capítulo correspondiente a caracterización del sistema.

¹ Matriz bidimensional de detectores, sistema de plano focal

² TDI (*Time Delay and Integrate mode*)

³ detección, reconocimiento e identificación

1.1.1.1 MRTD

Este parámetro subjetivo describe la habilidad del sistema observador-cámara para detectar detalles de bajo contraste térmico en el objeto testeado. La MRTD es una función de la diferencia de temperatura mínima entre una mira estándar de 4 barras y el fondo requerido para distinguir las barras por un observador frente a la frecuencia espacial del blanco. Generalmente la MRTD es la medida más importante para una cámara térmica para medir la capacidad de detectar e identificar un blanco y es una excelente herramienta de evaluación de cámaras térmicas de “observación”.

1.1.1.2 MDTD

La MDTD es una función de la diferencia de temperatura mínima entre un blanco circular y el fondo, requerida para un observador para detectar la imagen térmica del blanco frente a la dimensión espacial inversa.

1.1.2 Características de respuesta.

Estas medidas proporcionan información sobre la respuesta de las cámaras frente a variaciones en el tamaño y temperatura del blanco. Ejemplos de las funciones a evaluar son la función de transferencia SiFT (*Signal Transfer Function*), el rango dinámico, el nivel de saturación, SRF (*Slit Response Function*) y ATF (*Aperiodic Transfer Function*).

1.1.2.1 SiFT

La Responsividad es una relación entre la señal de entrada y de salida de un sistema, en un escenario donde el blanco mantiene un tamaño fijo mientras que varía la intensidad emitida. La SiFT o función de transferencia de señal es la parte lineal o pendiente de la responsividad comunmente utilizada como parámetro para medir las prestaciones del sistema.

La salida también puede obtenerse como una función del área del blanco con la intensidad del mismo constante. Esta responsividad bidimensional es la ATF o función de transferencia periódica. (*Aperiodic Transfer Function*). La SRF se define como una señal generada por un slit normalizado en anchura frente a la señal generada por un slit estrecho. Puede considerarse como una ATF unidimensional.

TEST	VARIABLE	RESULTADOS
Responsividad	Intensidad del blanco	SiTF Rango dinámico Saturación
ATF	Área del blanco	Función de transferencia del blanco. Función de puntos de visibilidad.
SRF	Anchura del blanco	Medidas de resolución.

Tabla 1.1: Funciones características de la respuesta del sistema IR.

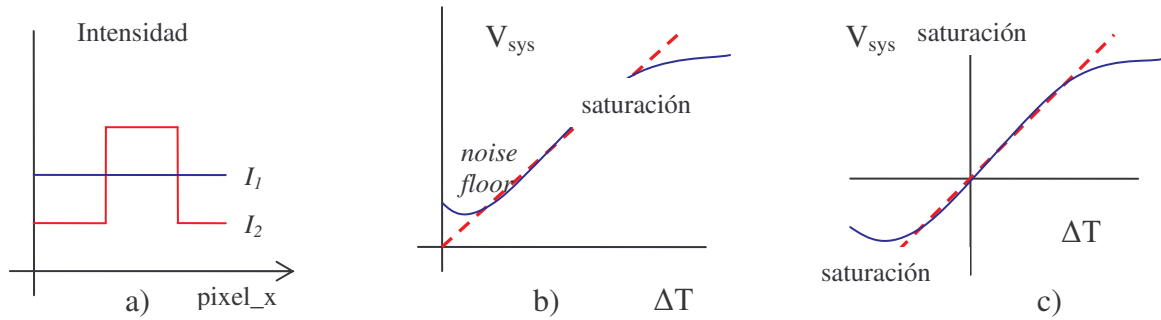


Fig. 1.3: a) I_1 nivel promedio de fondo, I_2 blanco.

La función de responsividad suele tener forma de rampa o S (*shaped*). En los sistemas fijos (*staring systems*) o de barrido acoplado en continua, la corriente de oscuridad o ruido floor limita la mínima señal detectable mientras que la máxima señal detectable viene fijada por el limite de saturación Fig. 1.8 b). En estos sistemas se tiende a representar la salida como una función del valor absoluto de la entrada. Para los sistemas de barrido acoplados en alterna, y los acoplados en continua con control automático de ganancia, la salida está centrada en un valor promedio. Fig. 1.8 c). La saturación, está impuesta normalmente por la electrónica de los amplificadores o convertidores analógico-digital que sucede al detector.

La SiFT no es por si misma un buen método de caracterización para comparar sistemas diferentes porque dependen de la ganancia (contraste) que se haya seleccionado en la cámara. También puede variar de un sistema a otro si la respuesta espectral de cada uno es distinta. Cuando la SiFT se especifica, implica normalmente que el sistema opera a máxima ganancia. Los cambios de ganancia se traducen en cambios de la pendiente.

La expresión genérica que define ésta medida puede escribirse como:

$$SiTF = \frac{\Delta V_{SYS}}{\Delta T} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \frac{A_d}{4 \cdot (f/\#)^2} \cdot \frac{\partial M_e(\lambda, T_B)}{\partial T} \cdot T_{SYS}(\lambda) \cdot T_{test}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.1)$$

Cada sistema particulariza la respuesta según sus condiciones concretas. La señal de salida se suele expresar en voltios, aunque también puede utilizarse una unidad arbitraria como niveles digitales o la luminancia del monitor.

Las relaciones entre entrada y salida pueden presentarte de diferentes formas, cuando el tamaño del blanco es fijo y la intensidad varía se obtiene la responsividad, y su parte lineal la SiTF, sin embargo cuando las variables son la anchura o el área del blanco, se obtienen otras funciones comentadas anteriormente con el fin de mejorar la precisión de las medidas en determinadas ocasiones.

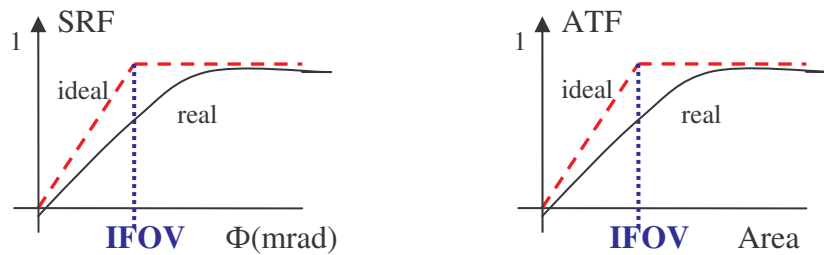


Fig. 1.4: Curvas SRF y ATF, parámetro IFOV.

La resolución espacial o resolución geométrica es un parámetro típico de las cámaras térmicas antiguas de *scanning* y también de *staring*. Se suele medir a partir de una ranura angular para la que la SRF *Slit Response Function* de la cámara es igual a 0.5 (función de respuesta a la ranura). Se define como una función de la señal generada por una ranura frente al ancho de ranura normalizada.a.

La resolución espacial definida de este modo es una buena medida para caracterizar la capacidad de la cámara de crear una imagen térmica del objeto y se denomina en ocasiones resolución espacial de observación. Sin embargo este parámetro no da información del tamaño del objeto como para saber la influencia de su tamaño en la medida. Las medidas de resolución espacial son rara vez mayores que la resolución espacial de observación y los fabricantes prefieren referirse al primer parámetro.

La resolución de imagen representada en número de píxeles por línea o por trama es una buena medida cualitativa. Está relacionada con la anterior definición de resolución espacial.

La función de responsividad también proporciona información sobre el rango dinámico y la linealidad del sistema.

1.1.2.2 Rango dinámico

El rango dinámico es el valor máximo de la medida de señal dividida por el mínimo valor medible. En los sistemas infrarrojos el parámetro NETD, (que presentaremos en el apartado siguiente correspondiente a ruido), es el valor mínimo de señal medible.

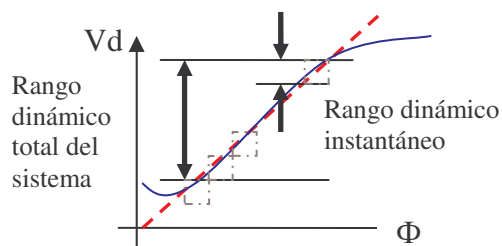


Fig. 1.5: RD total, e instantáneo. Para ganancias fijas, el RD_i es constante.

1.1.3 Características de ruido.

Permiten calcular cómo el ruido limita la sensibilidad de la cámara para detectar blancos con bajo contraste térmico. Principalmente se evalúa la NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*), FPN (*Fixed Pattern Noise*), IETD (inhomogeneidad), NEFD (*Noise Equivalent Flux Density*) y NPSD (*Noise Power Spectral Density*).

El ruido reduce la calidad de la imagen y limita la capacidad del sistema de discernir blancos con bajo contraste térmico. En general, para caracterizar los sistemas infrarrojos, el ruido se suele dividir en dos grupos: el ruido temporal y el ruido espacial. El ruido temporal hace referencia a las componentes de variación temporal de la señal de salida del detector durante la observación de un blanco uniforme en diferentes tramas. El ruido espacial sin embargo, se refiere a las diferentes señales generadas entre diferentes píxeles que no cambian de una trama a otra. Normalmente el ruido es un hecho difícil de caracterizar, la literatura presenta diferentes formas de caracterización, con un valor, un trío de valores estandarizados o el modelo tridimensional dividido en 8 componentes, resultantes de combinar la información temporal y espacial, de dos distribuciones: una vertical y la otra horizontal.

Además del análisis tridimensional del ruido es interesante ver cómo se distribuye este ruido en las diferentes componentes de una manera frecuencial, para lo cual se realiza un análisis de Fourier con los conjuntos de datos obtenidos para cada componente. De esta manera podemos ver si un valor alto de ruido en la distribución espacial de ruido por ejemplo horizontalmente en la imagen se corresponde con alguna frecuencia espacial determinada que pueda degradarnos la respuesta en frecuencia⁴ del sistema.

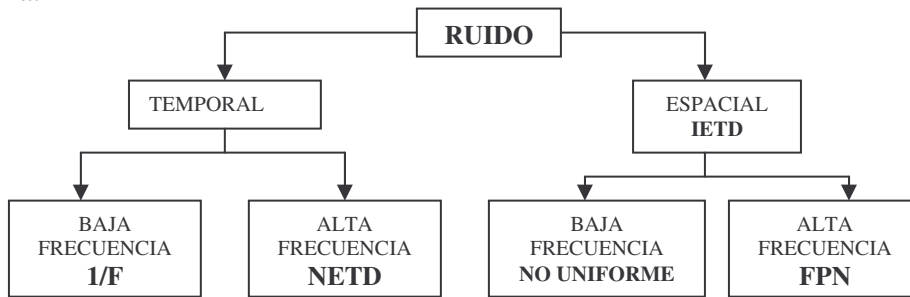


Fig. 1.6: Diagrama de bloques de tipos de ruido y sus figuras de merito.

1.1.3.1 Ruido 3D

A partir de los fotogramas que se capturan, se realiza un cálculo de las diferentes componentes del ruido, lo que hemos definido como ruido tridimensional, que nos dará información de la distribución del ruido en tres ejes, dos espaciales y uno temporal. Estas componentes son muy útiles para discernir cual es la fuente principal del ruido del sistema, además de usarse en programas de simulación de las prestaciones del sistema.

σ_{tvh} (mK)	σ_{Tot} (mK)	
σ_t (mK)	σ_{tv} (mK)	σ_{th} (mK)
σ_v (mK)	σ_h (mK)	σ_{vh} (mK)

Tabla 1.2: Parámetros de ruido

El valor σ_{tvh} es la principal componente del ruido temporal, y es la componente que da el ruido puramente aleatorio del conjunto de datos. La componente σ_t está asociada al ruido 1/f, y es importante adquirir un número de fotogramas con el suficiente tiempo de observación.

⁴ resolución

El ruido espacial, resulta como una combinación de las componentes espaciales σ_{vh} , σ_v y σ_h , además de dar información del ruido en la imagen en cada una de las direcciones vertical u horizontal.

σ_t : componente temporal

σ_v : componente vertical

σ_h : componente horizontal

1.1.3.2 NETD

Existen parámetros que aparecen en los catálogos de cámaras infrarrojas que describen características intrínsecas de las cámaras. Principalmente, hay un parámetro denominado “sensibilidad térmica”, “resolución térmica” o NETD que proporciona información sobre la influencia del ruido. Los parámetros tienen denominaciones diferentes pero son medidos normalmente como una diferencia de temperatura de ruido equivalente.

$$NETD = V_n \cdot SiFT \quad (1.2)$$

La NETD está definida como la diferencia de temperatura entre un blanco y su fondo. También se define como la desviación estándar de la dispersión de la salida causada por el ruido del sistema, además la NETD puede ser considerada como una buena estimación de las incertidumbres debidas al ruido sistemático. Debemos recordar sin embargo que la NETD depende de la temperatura del objeto.

Se suele medir solo para unos valores fijos de temperatura e interpolar dentro de un rango.

$$NETD = \frac{4 \cdot f_{\#}^2 \cdot \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{A_{detector}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{óptica}}(\lambda) \cdot \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \cdot D^*(\lambda) d\lambda} \quad (1.3)$$

1.1.3.3 FPN

El ruido FPN, o *Fixed Pattern Noise* (**Patrón fijo de ruido**) es un ruido clasificado como espacial y considerado de alta frecuencia, ya que se genera por variaciones rápidas de la intensidad de los píxeles de la cámara. Es una medida muy similar a ésta última, con la salvedad que en el FPN se eliminan todas las componentes temporales. Se suele calcular tras filtrar paso alto, el promedio de una cantidad considerable de tramas, siendo la desviación estándar σ_{vh} .

Teóricamente, el FPN puede ser eliminado totalmente a partir de la entrada, sin embargo no es así; debido a variaciones del hardware y a los errores por truncamiento impuestos por el circuito. Puede minimizarse para determinados puntos de la calibración si bien en otros fondos su efecto puede apreciarse considerablemente. En general esta medida se presenta con 2 puntos de corrección, a temperatura mínima, máxima y su media: T_1 , T_2 , $(T_1 + T_2) / 2$.

1.1.3.4 NO UNIFORMIDAD.

En el esquema de ruidos de la figura 1.6 se corresponde con el ruido considerado como espacial. Es una medida de las manchas, borrones y sombras en algunas zonas de la imagen que pueden confundir al observador. Por tanto debe ser definida en unas condiciones concretas de intensidad de flujo de entrada, puede variar de una región de interés a otra. Generalmente, la zona de menor no uniformidad, es decir la más uniforme suele ser el centro del FOV (“*sweet spot*”). Es un ruido típicamente más bajo en cámaras refrigeradas. Se calcula de forma similar al FPN pero con un filtro paso bajo. Si el sistema es realmente bidireccional la componente horizontal y vertical serían iguales. Veremos como el sistema IMSS, es muy dependiente de éste parámetro conforme se calienta y cómo el efecto es mayor en la dimensión horizontal de la imagen.

1.1.4 Características de Resolución de imagen.

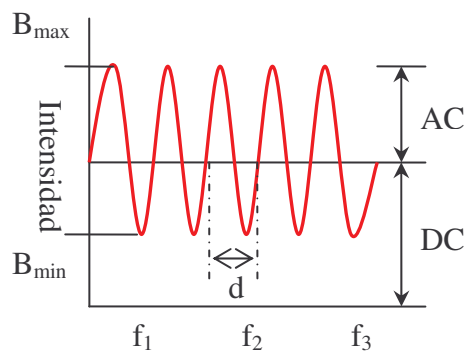
Dan información sobre la capacidad de la cámara para percibir pequeños detalles en imágenes de alto contraste. Principalmente la función de transferencia MTF (*Modulation Transfer Function*), IFOV/EIFOV (*instantaneous / effective instantaneous field of view*), DAS (*Detector Angular Substance*), CTF (*Contrast Transfer Function*), número de pixels, resolución espacial y otros parámetros subjetivos.

La función de transferencia óptica OTF (*Optical Transfer Function*) juega un papel fundamental a la hora de evaluar y optimizar un sistema óptico. Su naturaleza compleja, nos da dos funciones más; la función de transferencia modulada o MTF que corresponde a la magnitud y la PTF (*Phase Transfer Function*) a la fase, que aparece como consecuencia de ópticas desenfocadas o que presentan aberraciones⁵.

1.1.4.1 MTF

Los sistemas electrónicos también pueden ser descritos mediante estas funciones de transferencia.

La modulación es la variación de una señal sinusoidal sobre su valor medio, podemos considerarla como el cociente entre la amplitud alterna y su nivel de continua.



$$\text{Modulación} = M = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{AC}{DC} \quad (1.4)$$

Fig. 1.7: Señal moduladora e índice de modulación.

⁵ texto óptico 0.3.6.3

Para sistemas ópticos d es una medida de distancia. Cuando el blanco está situado en un colimador de longitud focal f_{COL} , la frecuencia espacial es $f_x = f_{COL}/d$. Para circuitos electrónicos, d es una medida temporal y su frecuencia eléctrica $f_{Hz} = 1/d$.

La función de transferencia de modulación es la modulación producida en la salida dividida por la señal de entrada modulada a una frecuencia espacial concreta.

$$MTF = \frac{Modulación_{SALIDA}}{Modulación_{ENTRADA}} \quad (1.5)$$

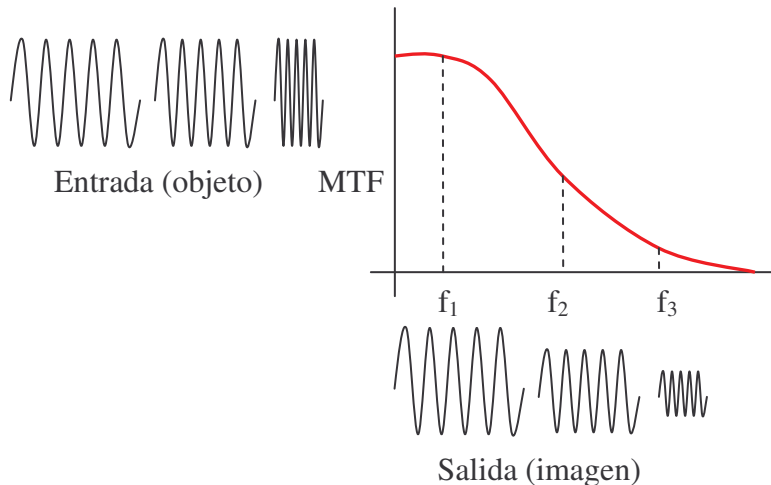


Fig. 1.8: Función de Transferencia de Modulación para 3 frecuencias dadas.

Los sistemas de imágenes IR captan la radiación del blanco y del fondo a su vez, por lo que la modulación de entrada dependerá de las temperaturas y emitancias de ambos.

$$M = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} = \frac{\epsilon_T \cdot M_e(\lambda, T_T) - \epsilon_B \cdot M_e(\lambda, T_B)}{\epsilon_T \cdot M_e(\lambda, T_T) + \epsilon_B \cdot M_e(\lambda, T_B)} \quad (1.6)$$

El efecto del monitor en la conversión de flujo de entrada al voltaje de salida o luminancia está implícito en la medida propia de la MTF, y como consecuencia de ello, la medida es función de las señales ópticas y eléctricas consideradas.

La combinación de la MTF óptica y la MTF electrónica dan como resultado la MTF del sistema infrarrojo, siendo el producto de MTFs usado para el diseño, análisis y especificaciones de los sistemas.

Teóricamente existen otras funciones calculadas a partir de ésta, como SLR (*Slit Response Function*) y CTR (*Contrast Transfer Function*).

La MTF, CTF y PTF⁷ son medidas de cómo el sistema responde a frecuencias espaciales. Éstas no contienen información en cuanto a la intensidad de la señal, sino que son medidas que nos describen con qué certeza se reproduce la escena.

⁶ B background=fondo, T target= blanco

⁷ normalmente MTF y PTF son medidas sobre una señal analógica de video, pero por convenio se presentan como una función de frecuencia espacial

En algunos sistemas la PTF (*Phase Transfer Function*) no es de especial interés ya que sólo nos indica un desplazamiento espacial con respecto a un origen seleccionado de forma arbitraria. Las no linealidades que alteran la PTF, pueden no ser apreciadas visualmente sobre la imagen, salvo por miras con propiedades geométricas específicas, es por ello, que no nos hemos extendido en esta medida, ni se presentan figuras obtenidas a partir de los sistemas de infrarrojos utilizados.

La mayor frecuencia espacial resoluble es la frecuencia de corte del sistema, en sistemas sobremuestreados, sería cero; mientras que en el resto viene dado por la frecuencia de Nyquist. Los sistemas pueden detectar señales cuya frecuencia espacial esté por encima de su frecuencia de corte pero no serán capaces de reproducirlas con fidelidad (vemos menos barras en la mira). Un buen criterio en la elección de sistemas, es que la frecuencia de corte de la MTF sea mayor que la frecuencia de interés, y este rango de frecuencias será específico de la aplicación. Es por ésta dependencia frecuencial, que la MTF resulte más descriptiva para las prestaciones que un simple valor que limite la resolución espacial.

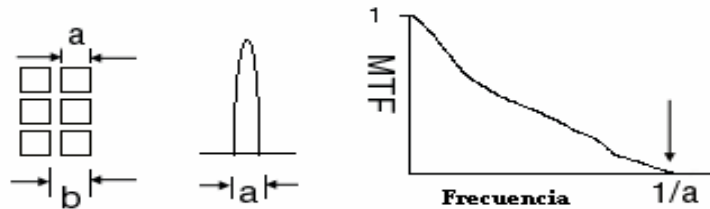


Fig. 1.9: Relación detector/ frecuencia de corte

La curva de la MTF, también da información cualitativa sobre la imagen. Es diferente para porciones distintas del campo de visión y la orientación, en general se suelen presentar la MTF horizontal y la vertical del sistema.

Existen dos métodos generalizados para determinar la MTF. La forma directa, que se basa en la medida de la respuesta frente miras de barras. La forma indirecta, por otra parte procesa mediante la transformada de Fourier de la LSF (*Line Spread Function*), presentada a continuación. Función que puede ser medida directamente o derivando la respuesta al pulso que genera una mira *slit*.

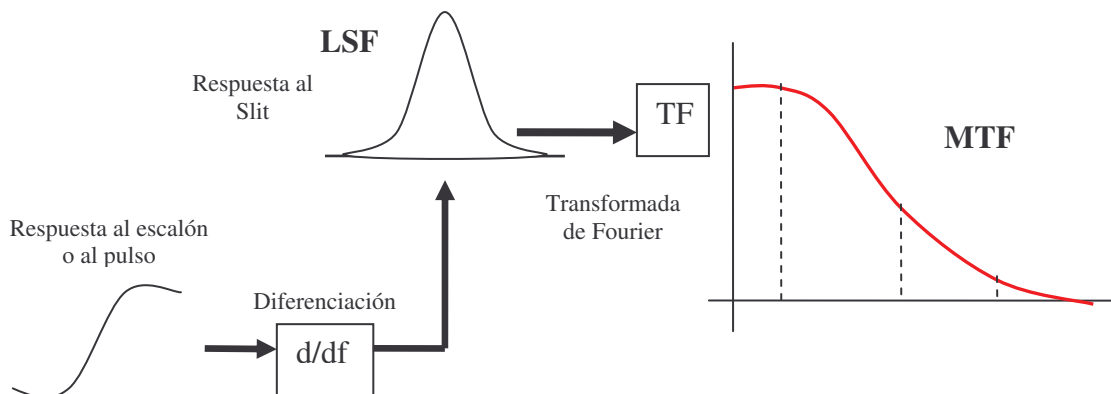


Fig. 1.10: Metodología de análisis de la MTF.

1.1.4.2 LSF

La LSF es el resultado “imagen” producido por el sistema infrarrojo cuando está captando una línea ideal. Esta línea modelizada por una mira que ocuparía un conjunto alineado de detectores. Al realizar la transformada de Fourier de ésta medida, su módulo nos representaría una MTF unidimensional, y directamente la frecuencia espacial de la mira de barras utilizada en la determinación de la MTF. Está afectada por la no linealidad del sistema, teniendo únicamente sentido en la zona de no saturación de la Responsividad. Por otra parte, el enfoque es primordial. Debe ocupar un único píxel, en caso de ocupar 2 píxeles, obtendríamos la mitad de la frecuencia de corte y 1 lóbulo en la gráfica de la MTF.

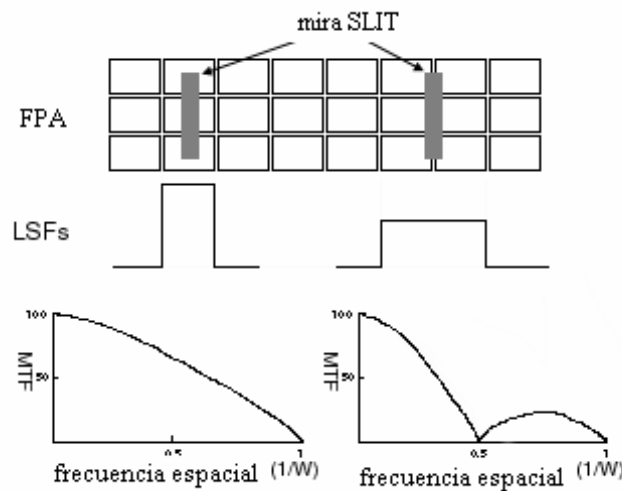


Fig. 1.11 Efectos del desenfoque en la MTF

1.1.5 Características Geométricas.

Tanto para el blanco como para su imagen, la caracterización geométrica engloba desde el campo de visión FOV (*Field of View*) y el IFOV, la Magnificación, Distorsión, Rotación, alineación...etc.

1.1.5.1 FOV

El FOV es el ángulo por el que entra radiación en el sistema, es decir es el ángulo abarcado por la matriz. El abarcado por el detector, sería el IFOV, en este caso sería el denominado “field stop”. Se determina en el plano focal imagen, normalmente en el último plano focal del sistema.

d=diámetro del *field stop*.

$$\tan\left(\frac{FOV}{2}\right) = \frac{d}{2 \cdot f} \tag{1.7}$$

Para objetos que están muy lejos se consideran en el infinito, se utiliza aproximación paraxial, es decir se considera que el ángulo de los rayos incidentes es muy pequeño y se puede aproximar la tangente por su ángulo.

$$FOV \cong \frac{d}{f} \quad (1.8)$$

Otro parámetro que caracteriza los sistemas ópticos es el F# (Número f) y se define como:

$$F\# \cong \frac{f}{D} \quad (1.9)$$

f: focal del sistema

D: diámetro de la pupila de entrada

1.1.5.2 IFOV

El campo instantáneo de visión, IFOV, es uno de los parámetros típicos entre las modernas cámaras térmicas de matrices. Se define como una dimensión angular de un elemento de la matriz de detectores.

1.1.5.3 Distorsión

Generalmente el efecto de la Distorsión se describe como un desplazamiento de una línea o punto de su posición esperada. Se define como la distancia polar entre la posición esperada y la actual de una fuente puntual dividido por el FOV vertical.

Este parámetro es importante ya que el sistema IMSS se ve afectado en gran medida. La distorsión en ocasiones está causada por la no linealidad de los bloques ópticos y electrónicos que componen el sistema. Suele ser dependiente de la zona de interés, generalmente siendo mínima en el centro del FOV, aumentando las imperfecciones conforme nos acercamos a la periferia. En ocasiones sus efectos están presentes en los monitores y otros sistemas de visualización. Debido a que la información se procesa diferente por sistemas de visión diferentes, la interpretación del observador sobre la calidad de la imagen va a depender del sistema y sus prestaciones. Es por ello que también se caracterizan los monitores.

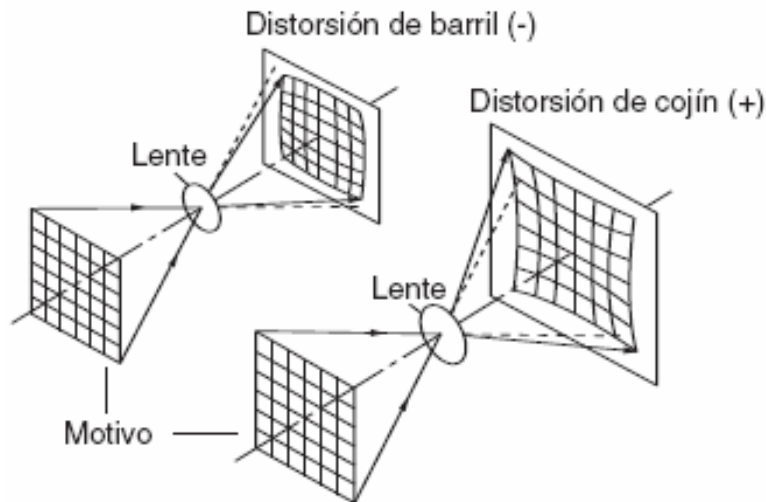


Fig. 1.12: Distorsión típica barril, cojín.

1.1.6 Características de Exactitud, Precisión.

Es necesaria la caracterización para evaluar las cámaras térmicas comerciales como “termómetros sin contacto”. El calibrado en radiancia permite obtener de la medición temperaturas reales. No es el caso de nuestra cámara, pese a estar las medidas cotejadas con temperaturas conocidas.

Se miden características como el error mínimo, la SRF (*Slit Response Function*, para marcar la estabilidad en temperatura) y la NGE (*Noise Generated Error*).

1.1.7 Espectrales.

Al igual que en las cámaras visuales, puede existir una cierta función con la sensibilidad espectral, que consideraremos en el sistema completo con la lente IMSS.

1.1.8 Operativas.

Estas características proporcionan la información sobre aspectos prácticos del manejo y uso de la cámara. Las posiciones tanto del blanco como del observador, las dioptrías de la lente y el rango focal son parámetros de este tipo.

1.1.9 TOD

De forma reciente, se ha presentado un método alternativo de caracterizar las prestaciones de los sistemas electro-ópticos, el *Triangle Orientation Discrimination* traducido literalmente como discriminador de la orientación del triángulo, como su nombre indica basa su test en miras de triángulos con diferentes posiciones. Esta metodología presenta una serie de ventajas sobre los actuales estándares de caracterización de prestaciones de sistemas infrarrojos como la MRTD o la MRC. Estas tienen el importante *handicap* que tiene que ver con el hecho de que la respuesta de los FPA depende de la posición relativa de la mira y el blanco.

1.2 Funcionamiento de la Cámara:

En primer lugar se muestra un resumen de la cámara utilizada durante el proyecto, dejando para un apéndice 8.1 la información relativa a sus especificaciones y características básicas. En este apartado desarrollaremos la metodología llevada a cabo durante su utilización y las previas configuraciones necesarias.

FABRICANTE	INDIGO SYSTEMS
MODELO	PHOENIX MWIR
DETECTOR	INDIO ANTIMONIO InSb FPA
RANGO ESPECTRAL	1 μ m a 5 μ m
FILTRADO DE BANDA	3 μ m a 5 μ m
TAMAÑO DEL DETECTOR	25 μ m * 25 μ m
RESOLUCIÓN	640 x 512 píxeles
TIEMPO DE INTEGRACIÓN	10 μ s hasta todo el tiempo de trama (1ms)
MODO DE INTEGRACIÓN	Snapshot (instantánea)
TASA DE TRAMA	Max. 124 MHz
CORRECCIÓN DE INHOMOGENEIDAD	2 PUNTOS, NUC interna y externa
SALIDA DATOS	Simultánea video analógico (PAL) y video digital 14bits paralelo.

Tabla 1.3: Especificaciones técnicas de la cámara Indigo Phoenix

La configuración estándar de la cámara incorpora un filtro frío que restringe la respuesta espectral a la banda de 3 a 5 μ m.

Para todas las medidas hemos dejado un mínimo de 30 minutos para la estabilización, aunque el sensor está refrigerado a 77K en un tiempo de 5 a 8 minutos.

Las herramientas de configuración y calibrado que vienen con el software de la cámara han sido utilizadas de forma alternada según el tipo de medición y según las especificaciones que se requerían en cada medida.

A continuación se presentarán los pasos a seguir desde que se conecta la cámara hasta que se capturan las imágenes, y el software con los que lo implementamos. El primer programa que se utiliza es el **PhoenixUserInterface.exe**, las mismas prestaciones pero con una ventana gráfica más interactiva se obtiene con el **IndigoPhoenixCAM.exe** y el de captura **IRvista.exe** que también permite modificar algunos parámetros de configuración.

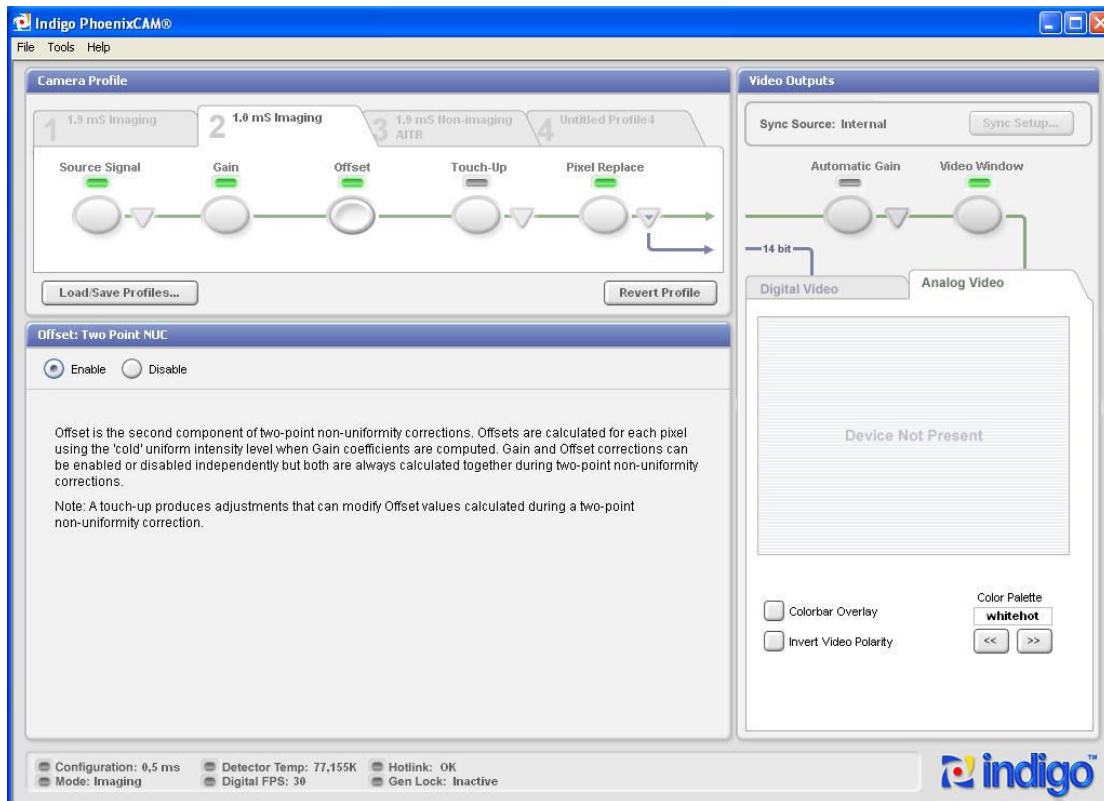


Fig. 1.13: IndigoPhoenixCAM.exe

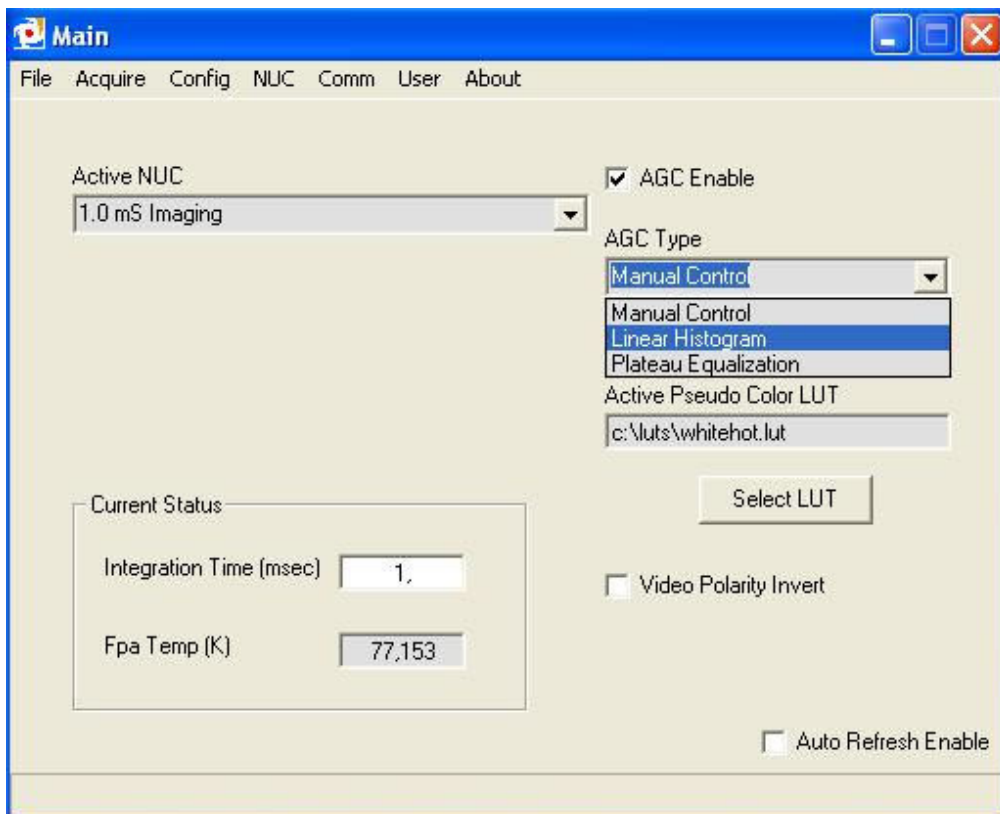


Fig. 1.14: Pantalla principal, parámetros básicos PhoenixUserInterface.exe

1.2.1 Control automático

Tras fijar unos valores de brillo y contraste térmico óptimos, (como se explicará en el capítulo 3, ya que es necesario considerar el sistema completo), puede aparecer una variación de los mismos con el tiempo. Este dato es importante sobre todo al iniciar una sesión con la cámara, ya que transcurrido un tiempo elevado este valor será estable. Sin embargo si trabajamos con la opción de AGC (Control Automático de Ganancia) los valores de ganancia (contraste térmico) y brillo se irán auto ajustando para dar una señal no saturada.

El protocolo seguido en la mayoría de las medidas fue primeramente seleccionar control automático de ganancia, con ajuste lineal. A partir de ahí modificar los diferentes tipos de ecualización y los valores de brillo y contraste adecuándolos a las condiciones del escenario enfocado y deshabilitar el control automático de ganancia para hacer las medidas con los mismos parámetros.

The screenshot displays the AGC configuration window with the following settings:

- AGC ROI Current Parameters:** ROI X Start: 116, ROI Y Start: 151, ROI X Size: 313, ROI Y Size: 132, ROI Box Time: 0, ROI Box Color: 0.
- AGC ROIs:** full 320 x 256, centered80x64, full 320 x 256.
- AGC Controls:** AGC Enable (checked), AGC Type: Manual Control, Max Gain: 16, AGC Filter Value: 5.
- Manual Control:** Brightness % Change: .1, Contrast % Change: 1. **Abs Brightness: -22.83, Abs Contrast: 87.52.**
- Linear Histogram Parameters:** Low End %: 1, High End %: 1.
- Plateau Equalization:** Des Pseudo Gain: 0.500.
- Auto Refresh Enable:** checked.

Fig. 1.15: Brillo, Contraste, tipo de control de ganancia. *Main/ Config/AGC*

1.2.2. Tiempo de integración:

El tiempo de integración es un parámetro muy importante. Ya que cuanto mayor es el tiempo de integración mayor es la relación señal/ruido.

En la cámara, la elección de ésta variable está supeditada a la configuración simultánea con el parámetro correspondiente a la corrección de no-uniformidad.

Realiza un ajuste del tiempo de integración a partir de un modo de captura instantánea. Permite elegir entre 3 máscaras predeterminadas configuradas con 1ms o 1.9 ms, la opción de modificar estos tiempos implica diseñar tablas propias de configuración de NUC. (*Non Uniformity Correction*)

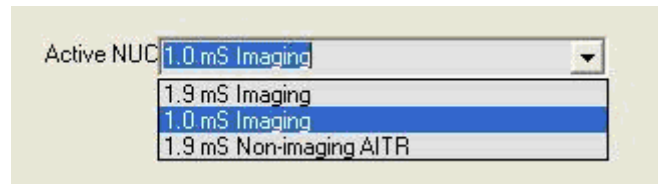


Fig. 1.16: Tiempo seleccionado par alas medidas *Main/menú Acquire/ control*

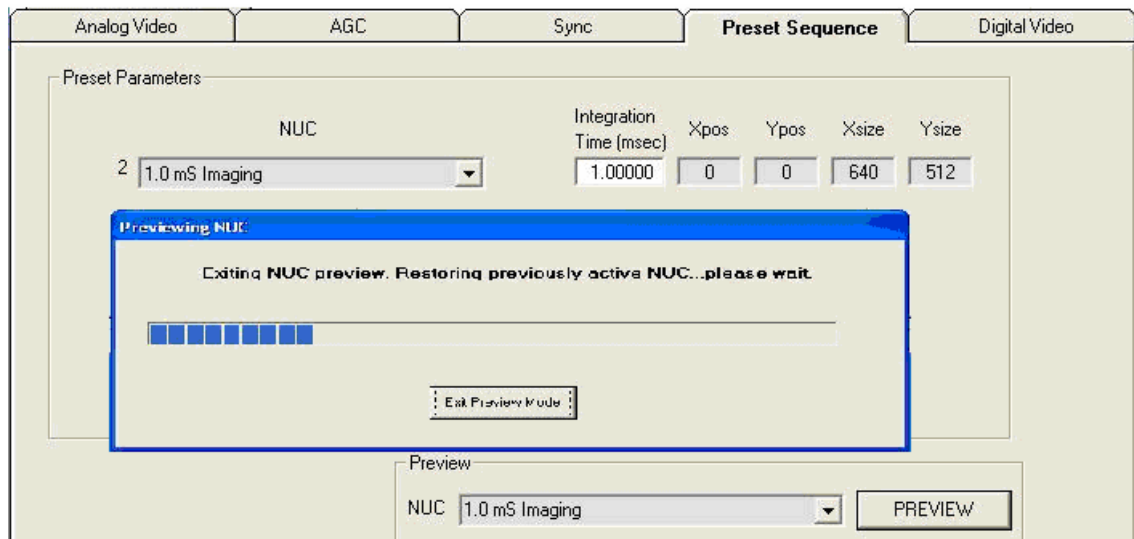


Fig. 1.17: Modificación NUC, *Main/menú Config/Preset Sequence*

1.2.3 La corrección de la no-homogeneidad. NUC

Como se ha mencionado con anterioridad en referencia al tiempo de integración, la cámara tiene 3 máscaras configuradas de corrección de NUC. Si bien se puede crear para cada aplicación una NUC óptima para el tipo de medidas.

Está posibilidad se hace imprescindible a la hora de hacer un modo de captura síncrono, (aunque no se llevara a cabo durante este proyecto, la lente IMSS disponía de un control de salida síncrono que permitía subsanar los efectos de retardo que genera la parte móvil del sistema.)

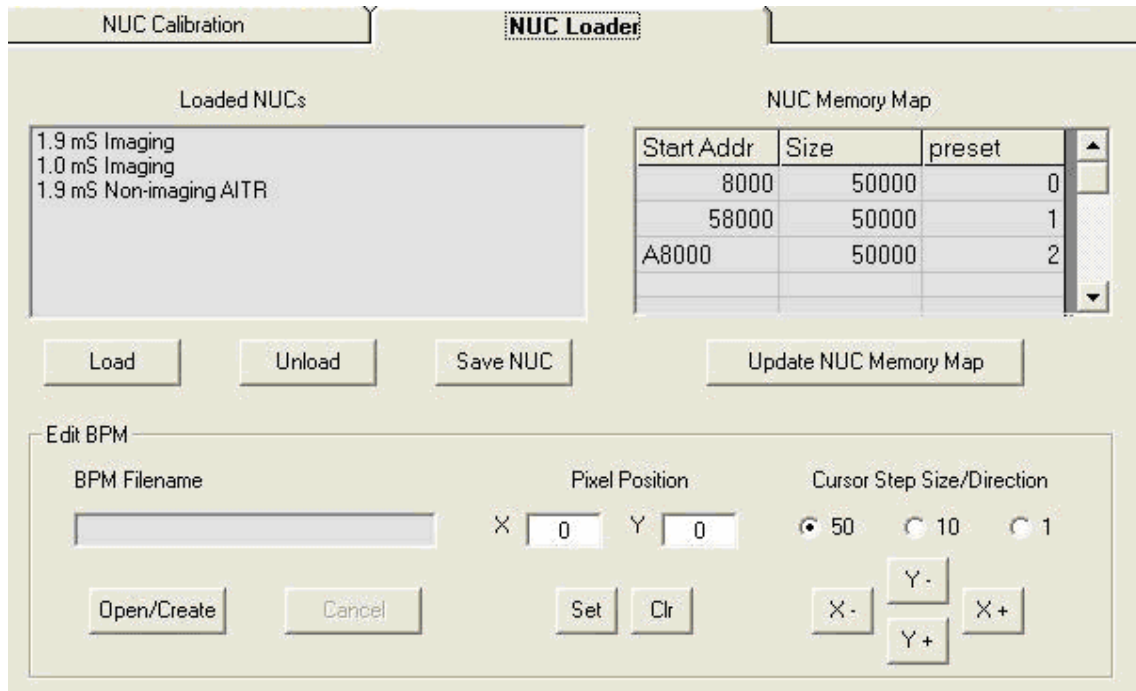


Fig. 1.18: Selección de la máscara NUC. *Main/menú config/NUC/Load*

La corrección de la inhomogeneidad puede realizarse de forma externa e interna, mediante dos puntos de corrección. El recuadro azul en la figura muestra la opción interna que ajustamos a dos temperaturas de conmutación de un obturador frente al detector.

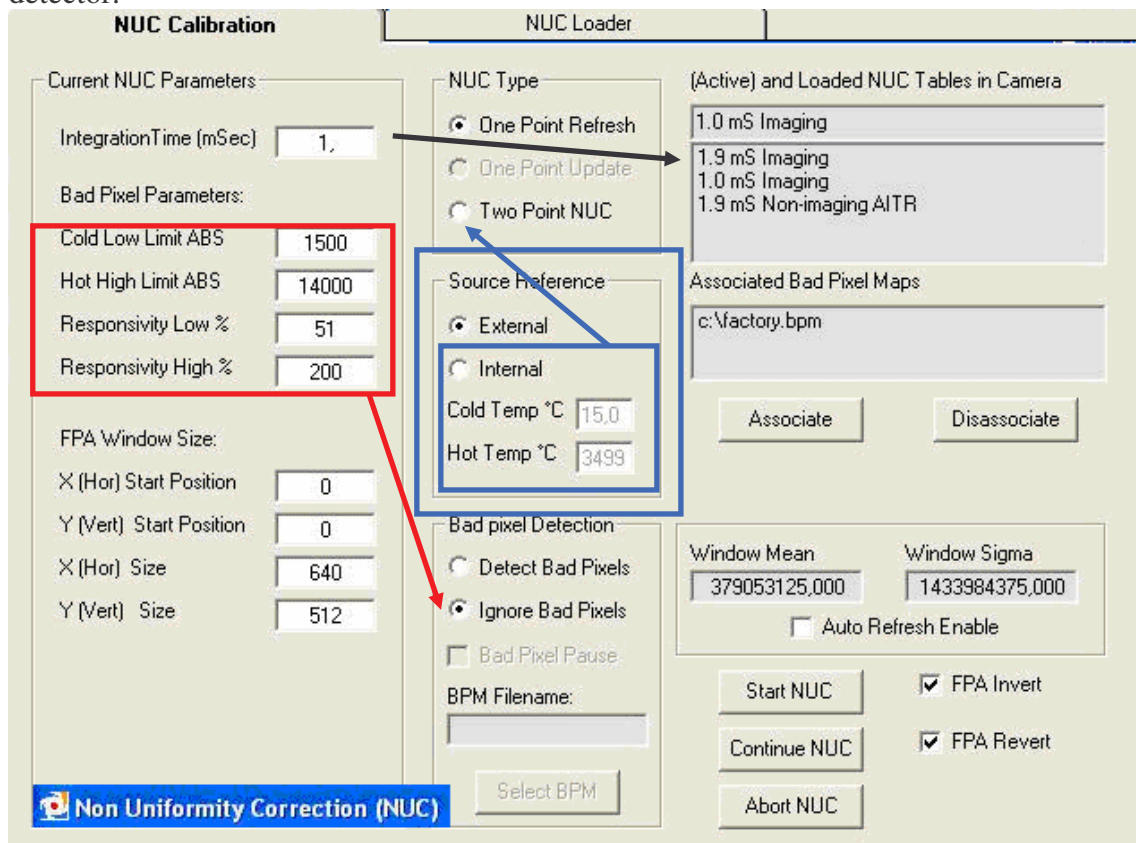


Fig. 1.19: Configuración de la corrección de NUC y Bad Píxeles

1.2.4 Bad Píxeles

Esta medida está estrechamente relacionada con la corrección de NUC como se puede apreciar en las diferentes ventanas de configuración. Es un parámetro que hace alusión a los píxeles no operativos, que por diferentes motivos no dan una señal adecuada del punto que representan en la escena y se pueden sustituir o corregir eliminándolos al estar considerados como un efecto espúreo en la imagen. En el siguiente capítulo se incluyen imágenes donde podemos ver como se distribuyen los píxeles malos localizados.

A partir del cuerpo negro, para realizar un análisis de los “bad pixels” que podemos identificar en la imagen, se tienen en cuenta tres características.

- Por ruido Temporal; viendo los pixels que tienen un comportamiento temporal por encima de la media. Se considero un criterio tal que fuese superior al triple de la desviación estándar a cada lado de la media. (3 veces σ)
- Por Ruido Espacial, viendo los pixels que tienen una desviación respecto a la media de un fotograma por encima de la desviación estándar de ese fotograma
- Por el estadístico χ^2 , que nos da una idea de una distancia estadística, viendo cuando este valor es superior a 10 veces la media cuadrática del estadístico.

$$\chi_j^2 = \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \langle x_i \rangle)^2 \quad (1.10)$$

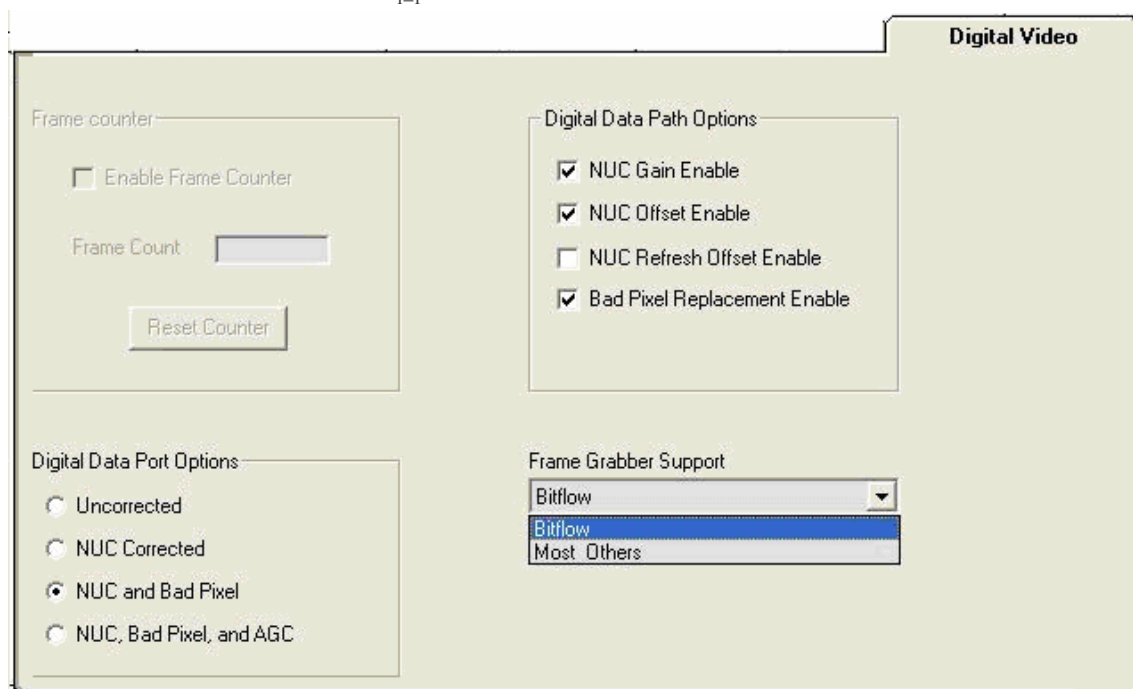


Fig. 1.20: Selección de corrección de no uniformidad y Bad Píxel por defecto.

1.2.5 Captura de datos y Configuración de *Frame Grabber*

La adquisición de datos y la salida de video analógica y digital de 14 bit es simultánea. Un ordenador es el encargado de la captura y almacenamiento de los datos digitales y el control de la cámara.

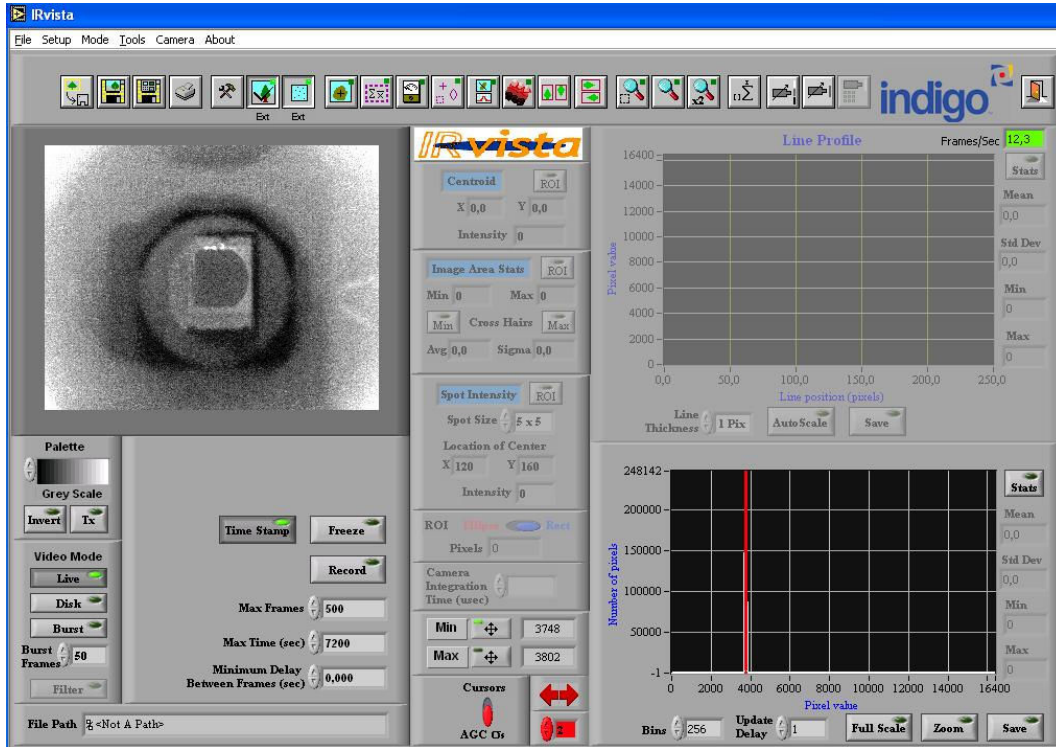


Fig. 1.21: IRvista.exe en modo monitor, con NUC y BPR. AGC

1.3 Caracterización de la Cámara en ausencia de la lente.

Las pruebas realizadas en laboratorio y exteriores están resumidas de forma esquemática en el [apéndice 8.3](#) tanto para la cámara sin lente, con la lente Janos, y con la lente IMSS. En el capítulo 3 se hace un análisis más completo sobre la caracterización del sistema, si bien en este capítulo se han mencionado las correspondientes a la cámara, como tiempo de integración, NUC, BPR ampliándose en dicho capítulo con imágenes capturadas y resultados, y otras medidas de ruido y funciones de transferencia.

Comentaremos seguidamente la metodología de calibración de la cámara de forma generalizada haciendo referencia a los pasos necesarios para verificar su correcto funcionamiento. La caracterización para añadir la lente IMSS se presenta en posteriores capítulos tras describir los parámetros fundamentales del sistema hiperespectral.

Antes de ensamblar cualquier tipo de lente, con la configuración cuerpo negro frente a la cámara, procurando que la lente enfoque el centro uniforme del mismo, se hace un análisis de la [estabilidad temporal](#) de la cámara. Es necesario esperar un tiempo de unos 5 minutos para enfriar los detectores, aunque para grabar las medidas

esperamos una media de 30 minutos. En este momento se hace una calibración externa a un punto y se adquieren unas tramas. Resulta interesante tras varias horas de funcionamiento y sin calibrar hacer una adquisición para comparar con la adquisición primera, ya que suelen aparecer comportamientos irregulares en la señal de la cámara en función del tiempo de funcionamiento.

Se realizaron diversos análisis del ruido a una temperatura de 25 °C., con una ganancia variable, con el NUC y tiempo de integración 1 ms. Haciendo una adquisición de fotogramas consecutivos en diferentes momentos de tiempo, y analizando la zona completa del array de detectores. Se hizo primero una calibración externa a 2 puntos con un fondo uniforme estabilizado a temperaturas de 15°C y 35°C, ya que son las temperaturas que usa la cámara en la tabla de corrección interna de no-uniformidad.

Con este primer análisis se quiso comprobar las condiciones de estabilidad del array de detectores y de su señal de salida a lo largo del tiempo, con lo que poder estimar el tiempo necesario para realizar una re-calibración de la cámara y restaurar las condiciones óptimas de funcionamiento. Aunque se trabaje con contraste (ganancia) constante, la señal de la cámara al transcurrir el tiempo se va saturando, teniendo que ajustar el nivel de brillo para mantener la imagen a niveles no saturados. Este fenómeno es muy normal en cámaras refrigeradas, ya que aunque siempre existe una temperatura de los detectores a partir de la cual están operativos, y la cámara empieza a dar imagen, el tiempo necesario para que la temperatura de estos alcance un valor estable suele ser muy superior, podría decirse que aparece una deriva del brillo. El problema es que la lente IMSS no está refrigerada y el propio calentamiento que genera al estar encendida limita el tiempo operativo del sistema.

Realizamos medidas del ruido temporal (NETD) y del ruido espacial (IETD) a diferentes temperaturas del cuerpo negro, para obtener una variación gráfica de estas figuras con la temperatura. Estas medidas se realizaron con un contraste y brillo de la cámara dados por el ajuste lineal de ganancia de forma automática y posteriormente modificados para cubrir todo el rango, y fueron repetidas con los valores óptimos en el calibrado exterior con las referencias.

Se obtuvieron medidas de ruido usando la otra tabla de NUC, que corresponde a un tiempo de integración de 1.9 ms, realizando una calibración externa a temperaturas de 10 °C. y 40 °C. Debido a que un aumento del tiempo de integración, disminuye el ruido temporal en las medidas para los mismos pares de valores de brillo y de contraste. La diferencia de temperatura que permite no saturar la señal de vídeo, para realizar las medidas de ruido se vio reducida.

También se realizaron estas medidas con diferentes valores de contraste fijo ajustando el brillo en cada medida para no saturar el valor de la señal de vídeo.

En cuanto al ruido tridimensional hay que destacar el aumento en general de las componentes temporales con el tiempo, que no se restablecen a los valores originales con una simple calibración a un punto, ya que los parámetros originales de la corrección a dos puntos se ven afectados por el ruido $1/f$.

Un parámetro que nos da una medida de la calidad de la corrección realizada en el array es la correctibilidad. La correctibilidad se define a partir de la estadística χ^2 , como:

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{(N-1)(n-1)\sigma_{ii}^2} - 1} \cong \sqrt{\frac{\sigma_{esp}^2}{\sigma_{temp}^2}} \quad (1.11)$$

Y simplificando, se puede ver que nos da una relación entre el ruido temporal y el ruido espacial residual que queda en la cámara una vez que realizamos la corrección de no-uniformidad. Como el ruido temporal es algo que está ahí y se supone que no va a depender de la corrección cuanto menor sea este valor nos indicará que tenemos menos ruido espacial, con lo que la corrección de no-uniformidad será más efectiva.

1.3.1 Medidas con cuerpo negro con/sin colimador.

Para testar el funcionamiento de la cámara y la lente se utiliza el sistema compuesto por un cuerpo negro frente a la cámara en ausencia de la óptica hiperespectral. Se muestra a continuación un test de configuración genérico para CTF, MTF, IFOV y TOD, con las miras estándar utilizadas.

En el capítulo 3 concretaremos la configuración para cada medida incluyendo además imágenes en visible de los diferentes montajes del banco de pruebas.

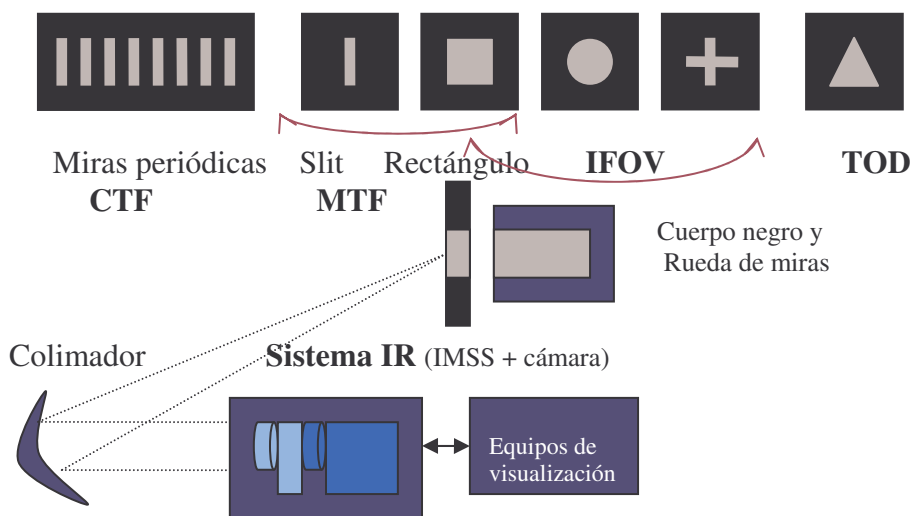


Fig. 1.22: Gráfico de metodología de test para evaluación de sistemas infrarrojos.

El rango dinámico de la lente en todas las longitudes de onda en que trabaja es muy inferior al de la cámara, siendo lo verdaderamente importante la caracterización del sistema completo. Por tanto describiremos el sistema de medida tras presentar la lente hiperespectral en el siguiente capítulo.

1.4 Conclusiones

Uno de los primeros puntos en este proyecto fue la caracterización de la cámara infrarroja en ausencia de lente. Para la caracterización de los parámetros de las cámaras térmicas, partiendo de catálogo se hace necesario verificar los parámetros dentro de especificaciones.

Se pudo observar que al aumentar el brillo en la configuración se desplaza la pendiente de la responsividad a la derecha, mientras que al variar el contraste se varía la inclinación de la pendiente de la misma. Jugando con este par de valores, se busco la pareja óptima de valores de brillo y contraste que mejor cubría todo nuestro rango de 3 a 5 μm , aunque tuvo que modificarse en las pruebas exteriores, y se recalcularon las medidas en laboratorio para el nuevo par.

Resultó fundamental, deshabilitar el control automático de ganancia, aunque optimiza el enfoque en cada longitud de onda, impide contrastar las diferentes longitudes de onda, con coherencia.

Se han dejado para el capítulo 3, los resultados de las medidas realizadas sobre la cámara, para compararlas con las variaciones en las mismas al introducir la lente. Además de la primera caracterización de la Phoenix en laboratorio, se repitieron las medidas de NETD y SiFT configurando la cámara brillo/contraste con los datos considerados en las medidas exteriores.

Con esta primera caracterización de la cámara se aseguró su buena respuesta y unos niveles de ruido espacial y temporal bajos, adecuados para obtener una alta calidad de imagen hiperespectral. También a partir de estos datos, pudo estudiarse las variaciones que aparecen sobre las imágenes, al añadirse la lente.

2. Lente Hiperespectral IMSS. Sensor de imagen multi-espectral.

En el capítulo de introducción, definimos las imágenes hiperespectrales como una colección de datos con información tanto en el dominio espacial como en el espectral. Este proyecto, desarrollará un análisis de imágenes hiperespectrales, utilizando un sistema multispectral (IMSS)¹, que permite seleccionar de forma programable, la longitud de onda; moviendo la lente con un motor paso a paso, y capturando en cada posición las imágenes.

El espectrómetro de imágenes IMSS es un tipo de instrumento dispersivo. El sistema IMSS emplea un elemento óptico para dispersar y focalizar la luz a la vez. El concepto básico de funcionamiento se muestra en la figura 2.1 donde la IMSS aproximadamente se compara con un monocromador estándar.

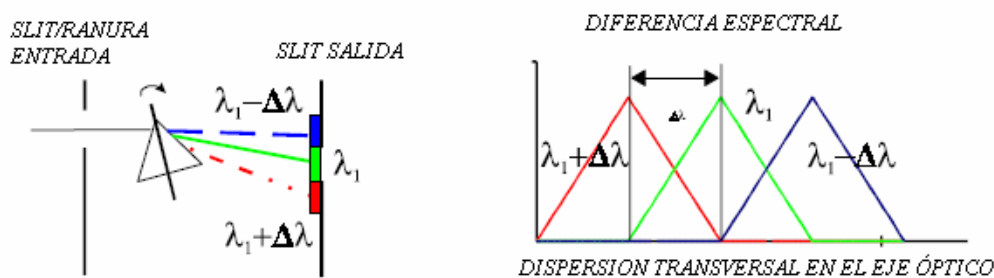


Fig 2.1 Monocromador estándar

En un monocromador, los elementos clave son una ranura de entrada y otra de salida, y en medio un prisma que hace de elemento dispersor de la radiación descomponiéndola espacialmente según sus componentes frecuenciales. Cuanto más estrecho es el slit o ranura mayor resolución presenta. La luz es dispersada perpendicularmente al eje del slit de salida y escaneado a través del mismo.

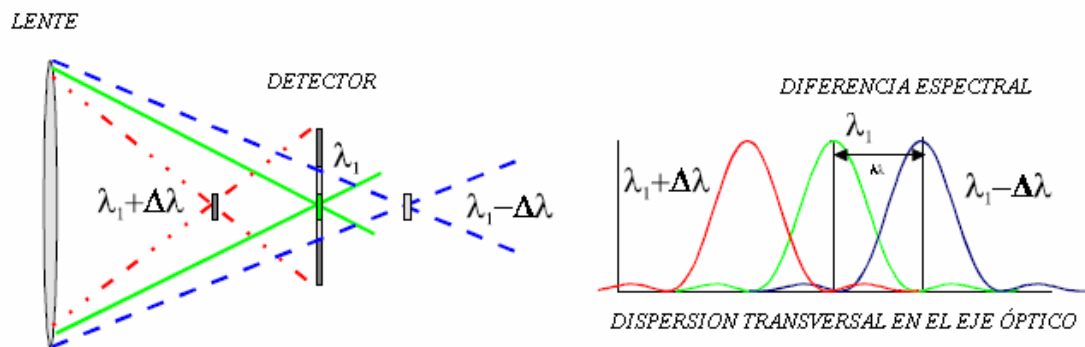


Fig. 2.2: Esquema interno de la IMSS

La lente dispersiva separa las diferentes longitudes de onda que capta el detector de forma seleccionable durante el barrido. La principal ventaja de la IMSS frente a un espectrómetro convencional es el **procesado completo de toda la radiación**, ya que se capta toda la radiación incidente, separando luego la correspondiente a cada longitud de onda.

¹ Image Multi-Spectral Scanning

2.1 Descripción

FABRICANTE	<i>PACIFIC ADVANCED TECHNOLOGY (PAT)</i>
MODELO	<i>IMAGE MULTI-SPECTRAL SENSOR (IMSS)</i>
RANGO ESPECTRAL	3 μm a 5 μm
RESOLUCIÓN ESPECTRAL NOMINAL	Dependiente de λ , 0.25% $\Delta\lambda/\lambda$ (0.01 μm a 4 μm)
NÚMERO F	Dependiente de λ , 2.5 μm a 4 μm
FOCAL	Dependiente de λ , 82mm a 5 μm 102mm a 4 μm 127 μm a 3 μm
ANCHO DE BANDA DE RUIDO ESPECTRAL	0.04 μm
FOV <i>(Field Of View)</i>	5.3x5.3 grados (7.7 grados en diagonal)@ 4 μm
IFOV <i>(Instantaneous Field Of View)</i>	463 μrad a 5 μm 372 μrad a 4 μm 297 μrad a 3 μm
FPA	Típico 256x256 InSb Phoenix 640x512 pixels
Tamaño	5.5 x 4.75 x 7 pulgadas
Peso	5 libras \approx 2.3 kg
Alimentación	115 V _{AC} a 24 V _{DC} 2 A

Tabla 2.1: Especificaciones Técnicas del IMSS

2.1.1 Ventajas

- La IMSS se compone de una óptica sencilla, su diseño consiste en una lente simple que funciona a la vez construyendo la imagen y dispersándola en función de la longitud de onda seleccionada.
- Esta tecnología puede ser utilizada desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano, estando limitado únicamente por el detector.
- El sistema es ligero debido principalmente a la sencillez y portabilidad de la óptica, pudiendo ser programado para capturar una colección de longitudes de onda por un tiempo ilimitado.

2.1.2 Inconvenientes

- La lente tiene partes móviles, por tanto la distancia entre la lente y el array de detectores cambia en función del paso espectral, mientras que el cociente longitud focal/longitud de onda se mantiene constante. Este cambio en la focal modifica el número F del sistema y por tanto la magnificación cambia. Este cambio debe ser compensado incrementando la complejidad de la óptica con un zoom mecánico o bien modificando de nuevo las imágenes mediante software.
- El ruido photon shot, que comprende todo el ancho de banda, es menor que en un sistema FTIR, sin embargo hay que considerarlo, dado que es proporcional a la raíz cuadrada del número de fotones que llegan.
- El procesado de la imagen hiperespectral requiere más pasos para eliminar el desenfoque.

2.2 Parámetros y prestaciones

Las principales variables de configuración y las prestaciones del sistema se listan y desarrollan en el apéndice 8.2, si bien mencionaremos a continuación los parámetros más relevantes que han sido necesarios para la caracterización del sistema en nuestra aplicación y la captura de las imágenes.

- Modo de captura: **Step mode** (paso a paso) o **Scan mode** (continuo). Son las dos opciones que nos proporciona el software, y que utilizamos de forma alterna según la medida realizada y para contrastar los resultados. De esta forma la opción paso a paso nos sirvió principalmente para la caracterización en laboratorio, mientras que con el modo continuo registramos las imágenes exteriores.
- Funciones de control de la lente: espaciado, longitudes de onda, blanco...En posteriores apartados presentaremos las opciones de configuración y los valores elegidos para nuestras diferentes adquisiciones.
- Cada valor de píxel puede ser visualizado como un número digital o con su temperatura de calibración en grados Celsius °C. Sin embargo tuvimos que calibrar en radiancia el sistema completo a partir de las imágenes capturadas

y sin tratarlas directamente con el software de la lente. También dedicaremos varios apartados a este hecho.

- Los algoritmos de procesado. Al ser un software cerrado, y no disponer de información sobre los mismos, se han combinado diferentes parámetros para optimizar resultados.

2.3 Justificación del procesado de Hypatt.

La lente IMSS, por su propia naturaleza, convolucionada espacial y espectralmente información produciendo una imagen, cuyos puntos son función de la posición y de la longitud de onda a su vez. La radiación que atraviesa la lente y posteriormente es detectada por la cámara, está sujeta a unas variables que son consideradas por el software de la lente. La diferente longitud de onda que vendrá asociada a cada imagen, el tamaño relativo de los objetos, y otras consideraciones nos obligan a hacer una serie de tratamientos con los ficheros captados en bruto.

En el apéndice se ha añadido información propia del dispositivo y sus prestaciones, mientras que este capítulo se encarga de hacer una descripción del funcionamiento del sistema y de su utilización con los problemas asociados.

El manual del sistema impone un orden de aplicación de las diferentes funciones de procesado a la colección de imágenes, partiendo de la deconvolución espacial, le siguen la compensación de magnificación y la deconvolución espectral. Como característica básica podemos adelantar que las deconvoluciones espacial y espectral, eliminan el desenfoque y la magnificación compensa el efecto de la focal dependiente de la longitud de onda.

2.4 Software de la lente IMSS

El programa HyPATT II proporciona también la extracción de un espectro de los datos adquiridos y almacenados, corrigiendo las limitaciones del sistema mediante la aplicación de los siguientes métodos.

En este apartado indicaremos los pasos a realizar con la herramienta dejando las funcionalidades y explicación del manejo del software para el apéndice 8.2.

Antes de la adquisición y previo a la configuración de los equipos, el software se carga en entorno Windows, con sus archivos ejecutables y de calibración. Existen dos versiones del programa, la primera para una plataforma Windows 98 o anteriores y una versión más actualizada con la que hemos trabajado, bajo Windows XP.

En un directorio PAT están todos los ficheros asociados:

- **imss.cal** (archivo de calibración de la cámara). En el capítulo 3, en el que se caracteriza el sistema completo cámara + lente, se explican las diferentes modificaciones llevadas a cabo sobre este fichero y sus consecuencias en la captura y la interpretación de los resultados.
- **pat.txt** (archivo de configuración del *frame grabber*)
- **instrument function** (funciones para la deconvolución espectral)
- Directorio de las máscaras del procesado espacial

El software proporciona la capacidad para seleccionar opciones de video, brillo, y visualización de las imágenes, pero debido a la mayor versatilidad que proporcionan los programas de control de la cámara, la configuración en monitor se hizo directamente de la salida de vídeo de la misma. Con el software IRvista y los Config.exe.

El software *IRvista* de control de la cámara Phoenix, así como los *ToolBox* de *Labview* y *Matlab*, permiten más posibilidades respecto al manejo de imágenes, histogramas y niveles de píxel, por tanto muchas prestaciones han sido desarrolladas en los entornos mencionados.

2.4.1 Programa HyPAT II.exe

La primera configuración necesaria, es la de la lente. Describiremos seguidamente los pasos a realizar y el porqué, dejando las múltiples funciones de control de la IMSS, durante la captura de datos, almacenamiento en el PC y las funciones de post-procesado para el capítulo 8 en modo de apéndice. También explicaremos otros parámetros de calibración en el capítulo 3, de caracterización del sistema, por estar justificados tras diferentes resultados desprendidos de las imágenes y de las medidas en el exterior.

Hay 4 pasos diferenciados a la hora de abordar este software. El primero es el referente al formato de los datos que maneja, el segundo a los parámetros de control y adquisición, el tercero consiste en distinguir niveles digitales en la imagen y su relación con las temperaturas, y por último la extracción espectral de la colección de imágenes.

Al abrir el programa, existen dos funciones habilitadas, la del control del periférico que desplaza la lente y activa la captura, y la de cargar ficheros de imágenes almacenados. Estos ficheros pueden tener dos tipos de extensión *.pat y *.imss, con la particularidad de que el *.imss debe ser transformado al primero para poder ejecutar las demás funciones del software. La forma de abrirlos es a partir de un fichero intermedio al que se accede completando los valores del cuadro de la figura siguiente, y que está relacionado directamente con las opciones de captura.

× Dimension : 640
Y Dimension : 504
Header Size : 0
Bits Per Pixel : 14
Data Offset : 0
of Frames : 61
Byte Order
 MSB - LSB LSB - MSB
OK Cancel

Fig 2.4 Dimensiones de FPA, tamaño de cabecera, bits codificados, offset, nº tramas y codificación *BIG ENDIAN*

La información de la imagen viene codificada en el formato ***.pat**, y es condición imprescindible para poder abrir los ficheros y trabajar con ellos.

Los parámetros estáticos de la imagen aparecen como una tabla de características. Esta incluye el tamaño de la imagen, el número de tramas, la resolución de bit, valores de intensidad máxima y mínima, media, y la desviación estándar. Para la opción IMSS, las variables descritas serían las longitudes de onda del rango, el modo de operación, la resolución espacial, centro de magnificación, blanco...etc. Las dos figuras siguientes corresponden a dos de los ficheros estándar utilizados en las medidas exteriores.

Image IMSS	
Width:	640
Height:	504
Number of Frames:	61
Bits Per Pixel:	14
Max # of Intensities:	16384
Maximum Intensity:	6995
Minimum Intensity:	4896
Mean Intensity:	5828.434
Standard Deviation:	433.894
Date Created:	Thu Nov 08 14:27:14 2007

Fig 2.5: Información de la colección hiperespectral. Parámetros de la Imagen

Image IMSS	
Long Wavelength <um>:	5.000
Short Wavelength <um>:	0.000
Mode of Operation:	Step
Step Resolution:	8
Framerate <hz>:	50.000
Integration Time <sec>:	0.000
Range to Target <m>:	100.000
Center of Magnification X:	242
Center of Magnification Y:	320
Spectrum Table:	Yes

Fig 2.6: Información de la colección hiperespectral. Parámetros de la Captura

2.4.1.1 Control de la Lente y adquisición de datos

La ventana de configuración de la lente y la captura de imágenes, se divide en 4 secciones: Parámetros de la lente, posición actual de la lente, posiciones de la lente y rango del blanco.

- Lens Parameters, parámetros de la lente. Existen dos modos de controlar las lentes, modo *Scan* y modo *Step*. Para el primero de ellos, hay un único disparo o *trigger* enviado desde el control de las lentes hacia el *frame grabber*, que indica el inicio del ciclo de adquisición. A su vez, la lente se mueve desde la posición correspondiente a la mayor longitud de onda seleccionada hasta la menor, haciendo un barrido. El *frame grabber* adquirirá el número de tramas (*frames*) indicadas. El módulo de *step resolution* solo se considera para el modo *Step*, pese a poder ser seleccionado en la otra modalidad. El modo *Scan*, permite la adquisición a mayor velocidad grabando tramas de forma continua, a la tasa de captura (*frames* a adquirir) de la cámara, mientras el sistema de la lente IMSS se mueve a una velocidad conocida y dada por el fichero de calibración. El controlador de la lente, calcula la aceleración y velocidad para el desplazamiento requerido de forma que el número de tramas seleccionadas estén equiespaciadas en el rango de selección. HyPAT II compensa el hecho de que la lente sufra aceleración y desaceleración durante su recorrido. El modo *Step*, sin embargo es más lento y permite mayor precisión espectral en la adquisición. En este modo, el sistema de la lente se mueve y se para, en cada posición espectral definida entre los límites de longitud de onda.

- Lens Position, posición de la lente. Se actualiza de forma automática a un lugar seleccionado, bien introduciéndose directamente o con los límites predefinidos.

- Position Lens, recorrido de la lente. Estos comandos permiten al usuario mover la lente a cualquier posición dentro del rango. La resolución del paso espectral dependerá de los parámetros seleccionados en el primer módulo.

- Range to target, rango de distancia al blanco. Si un objeto está fuera de la distancia hiperfocal de la lente, la calibración espectral será incorrecta. La distancia hiperfocal teórica está del orden de 100 m. Sin embargo, los controladores de la lente compensan via software este error si la distancia al objeto se introduce en la ventana. (Figura 2.7).

- Collect Data, inicio de captura. Antes de la adquisición, el software calcula e informa sobre el número mínimo de *frames* necesarios, a partir del rango y los parámetros dados. Cuantos más se capturen menor velocidad alcanzará la lente. El número máximo no obstante está limitado por las capacidades de almacenamiento del sistema, siguiendo la siguiente ecuación. En el caso de nuestro equipo no existe esta limitación siendo muy superior la capacidad de almacenamiento en comparación con el volumen de datos que genera el sistema. Las versiones con las que se disponía cuando se adquirió este sistema, sí planteaban este problema.

$$N^{\circ} \text{ total de pixels} * 2 \text{ Bytes/pixels} * n^{\circ} \text{ de frames} \quad (2.1)$$

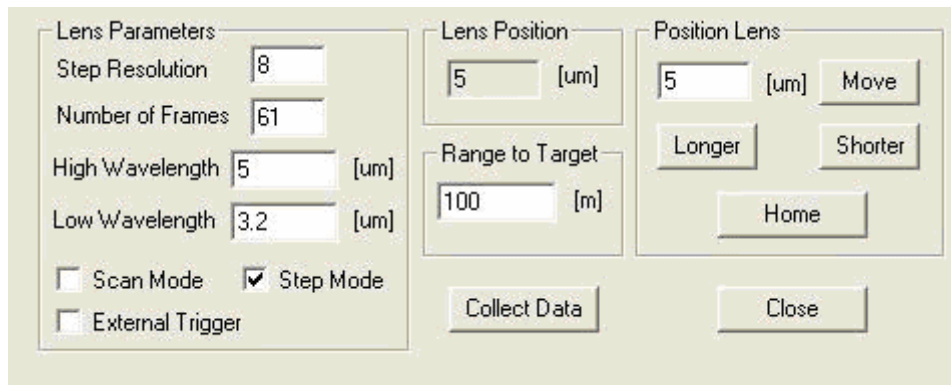


Fig. 2.7: Valores del control, modo paso a paso, $\lambda=5 \mu\text{m}$.

La adquisición de datos en modo continuo conlleva la habilitación de la captura por parte del software. La sincronización del desplazamiento de la lente con el *Frame Grabber* se lleva a cabo por un interfaz implementado por el CIDA² en entorno Labview.

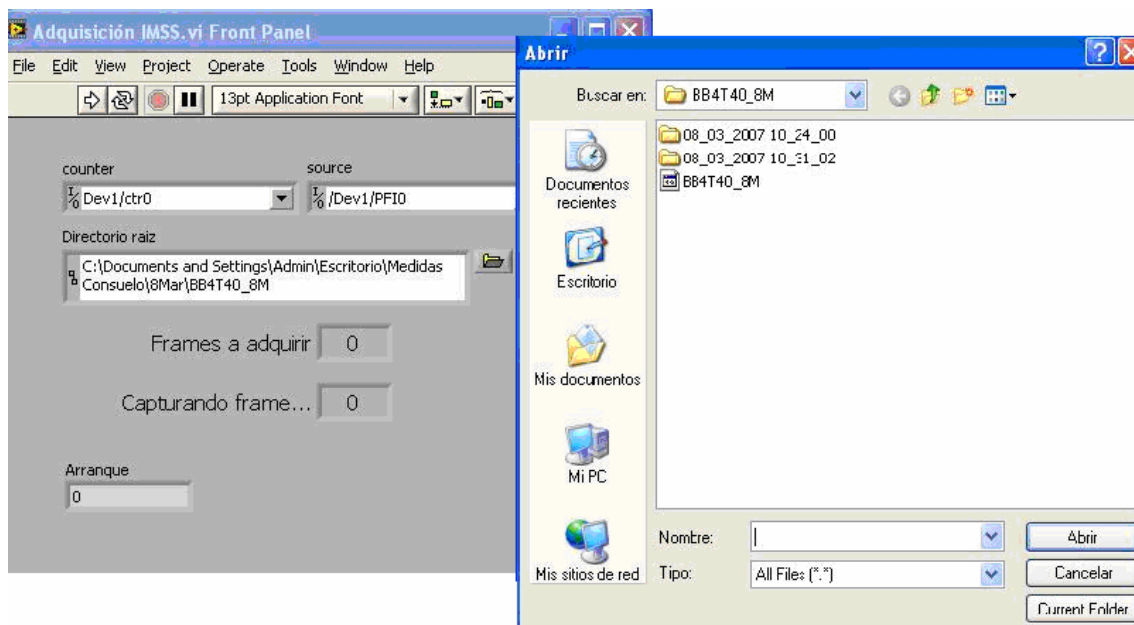


Fig 2.8: Herramienta Adquisición IMSS.vi, parámetros

² Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Armada Española.

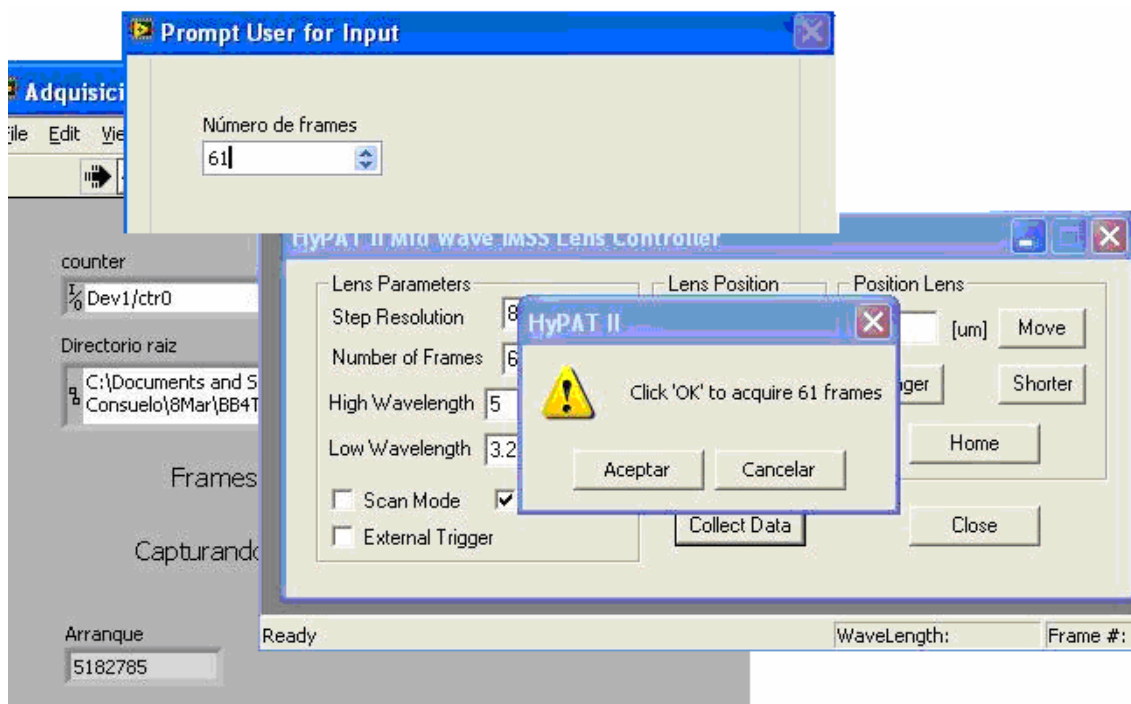


Fig. 2.9: Secuencia de adquisición. Sincronismo lente/*Frame Grabber*

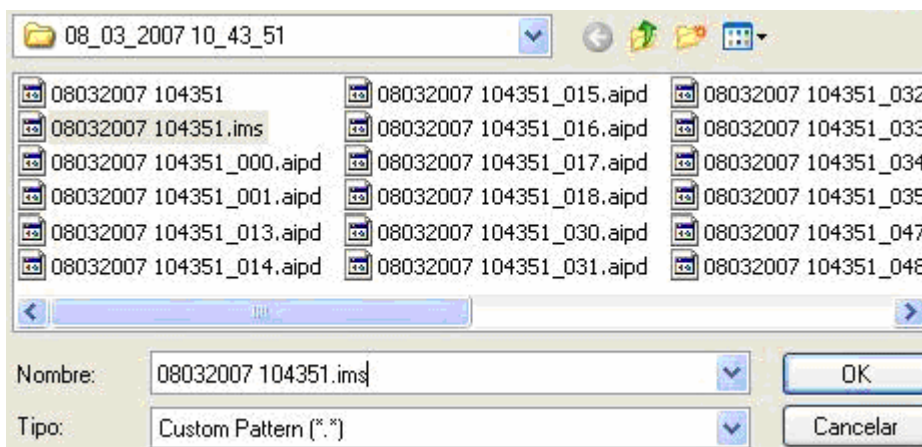


Fig 2.10: Colección de ficheros generados en cada captura, modo *Scan*

En cada adquisición se lee de un fichero *.dat que contiene los parámetros de configuración, y del fichero de calibración *.cal. Se genera entonces un archivo que contiene un fichero con el nombre del archivo y los datos de formato y parámetros, otro con extensión *.ims y un número de ficheros igual al número de *frames* capturados con extensión *.aipd. Todo este paquete de datos es el que se transforma a formato *.pat al configurar los parámetros de la Figura 2.4 para poder tratarse con la herramienta de la lente.

La adquisición en modo Step, resulta más sencilla y el volumen de datos es mínimo. Se selecciona una longitud fija en la que se posiciona la lente, y la captura se hace con el software IRvista.exe de la cámara. Las opciones de esta herramienta fueron expuestas en el capítulo 1, ya que es propio de la cámara de infrarrojos.

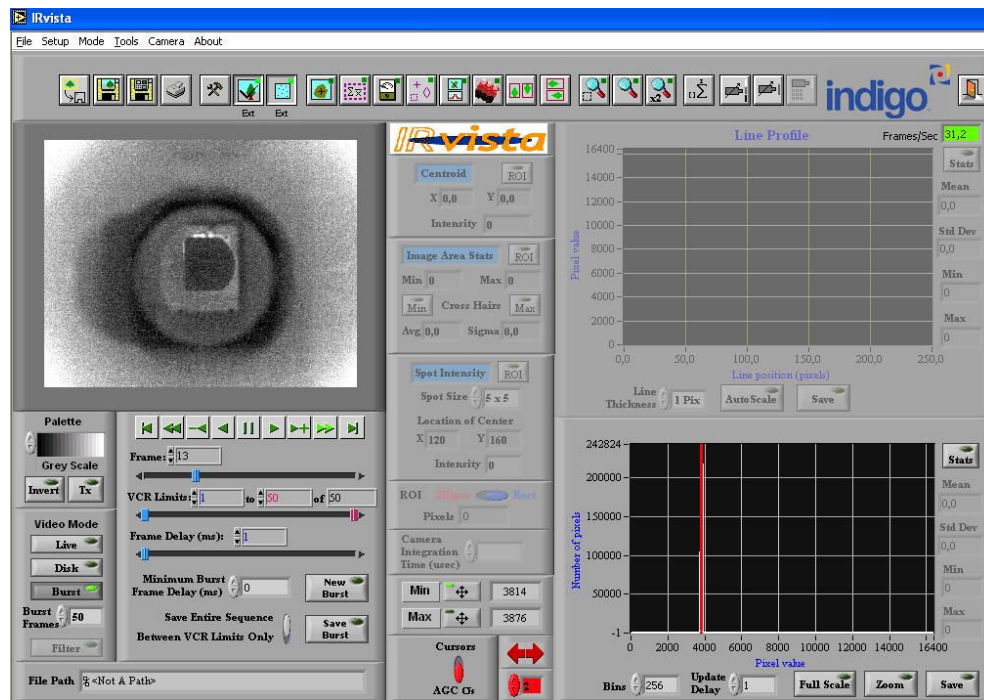


Fig 2.11: Software IRvista.exe. Captura Modo Scan, 50 frames para promediar, cuerpo negro 4'', T=50°C, $\lambda=5\mu\text{m}$.

2.4.1.2 Medida de Temperatura

Es posible hacer una “calibración en radiancia” de la cámara y del sistema, haciendo uso de esta funcionalidad del software. A continuación describiremos el procedimiento para medir la temperatura de objetos en el campo de visión. Primeramente la cámara debe ser corregida de no-uniformidades. Este proceso ha sido explicado en el anterior capítulo.

Una vez corregida, la cámara se calibra para mediciones de temperatura. Para ello, son necesarias dos puntos con temperatura conocida, una más fría y otra más caliente, respecto a la temperatura de interés.

El flag³ de NUC en la cámara puede ser usado pero los resultados serán más precisos con la referencia de temperatura exterior. Durante el procedimiento son capturadas varias tramas de datos de un escenario uniforme. Cuantas más se capturen mejor promedio estadístico se obtendrá.

La metodología seguida durante la calibración es la siguiente: La cámara infrarroja captura la radiación de objetos en el campo de visión, y esos son grabados como un número digital de 12 a 14 bits. Durante el proceso de calibración se asocia con la temperatura del objeto, siendo más precisa tras las comparaciones con las temperaturas fría y caliente sobre la escena de interés.

Los cálculos involucrados en el proceso, asumen que la relación entre la temperatura y el valor digital que codifica la radiancia es lineal. Por tanto, a partir de la escena capturada y su nivel digital, se corresponde con un nivel de temperatura píxel a píxel.

³ parte de la trama que codifica información de control

2.4.1.3 Extracción Espectral

Una variedad de opciones que posibilitan la rápida extracción del espectro, y otras funciones han sido embebidas en la plataforma Windows usando el interfaz HyPAT II, que permiten abrir y visualizar desde una simple trama hasta un video de imágenes hiperespectrales.

Los archivos que se podían procesar, se ha comentado que tienen extensión ***.pat**. Directamente al abrirlos, de forma automática se distribuye la escala de grises del rango a una desviación estándar por encima y por debajo de la media, $\pm\sigma$. Esta distribución no siempre es la óptima para todas las imágenes.

Para todos los datos hiperespectrales que se crearon fue necesario:

1. Especificar la secuencia de *frames*
2. Ajustar la paleta de colores
3. Crear un fichero de seguimiento o *track file* que determina el blanco para el cual es extraído el espectro. Es posible generar un espectro de los datos en bruto, y un espectro espacial y de los datos deconvolucionados; eliminando el desenfoque en el dominio espacial.
4. El software permite compensar las variaciones de la magnificación de la lente a través de las bandas espectrales, aunque aquí es donde se planteó el primer problema.

El orden del procedimiento a seguir, sería primeramente deconvolucionar en el dominio espacial, eliminando así la relación con la componente espacial. Posteriormente, realizar la compensación de la magnificación debida a las diferentes focales en la adquisición de las distintas longitudes de onda, corrigiendo la variación del tamaño del blanco. Y por último hacer la deconvolución espectral.

- **Deconvolución espacial.** Bajo este paso, hay dos técnicas implementadas en el software. Ambas referidas a los algoritmos en los que se basan. La primera es la llamada JAN. Corresponde a una estrecha y no lineal deconvolución que conlleva una considerable cantidad de tiempo. Este algoritmo tiene precargadas las funciones necesarias y aunque más lento, es el más preciso. La otra opción, es mediante el uso de la convolución *kernel*⁴ que se describe en el apéndice por no haber dado resultados satisfactorios en nuestras imágenes.

En caso de haber dispuesto de la información de los algoritmos que siguen este proceso, así como del funcionamiento interno del sistema hiperespectral, habría sido interesante el desarrollo de una aplicación específica mediante la programación de una máscara adaptada a la cámara y a los blancos requeridos.

- **Compensación de magnificación.** Conforme la lente IMSS se traslada axialmente a lo largo del eje óptico, para focalizar las diferentes longitudes de onda, la

⁴ tipo de algoritmo de convolución. *kernel* (núcleo)

longitud focal cambia, a su vez cambia el campo de visión y con ello se produce un cambio de magnificación del tamaño de la imagen en el plano focal. La huella de la imagen en los píxels cambia en respuesta al cambio de magnificación, y determina un cambio a su vez, en la señal del sistema mientras se escanea de una longitud de onda a otra. El campo de visión de la longitud de onda más corta, dictará el campo de visión útil en la compensación de magnificación, ya que corresponde con la longitud focal mayor, y mayor magnificación.

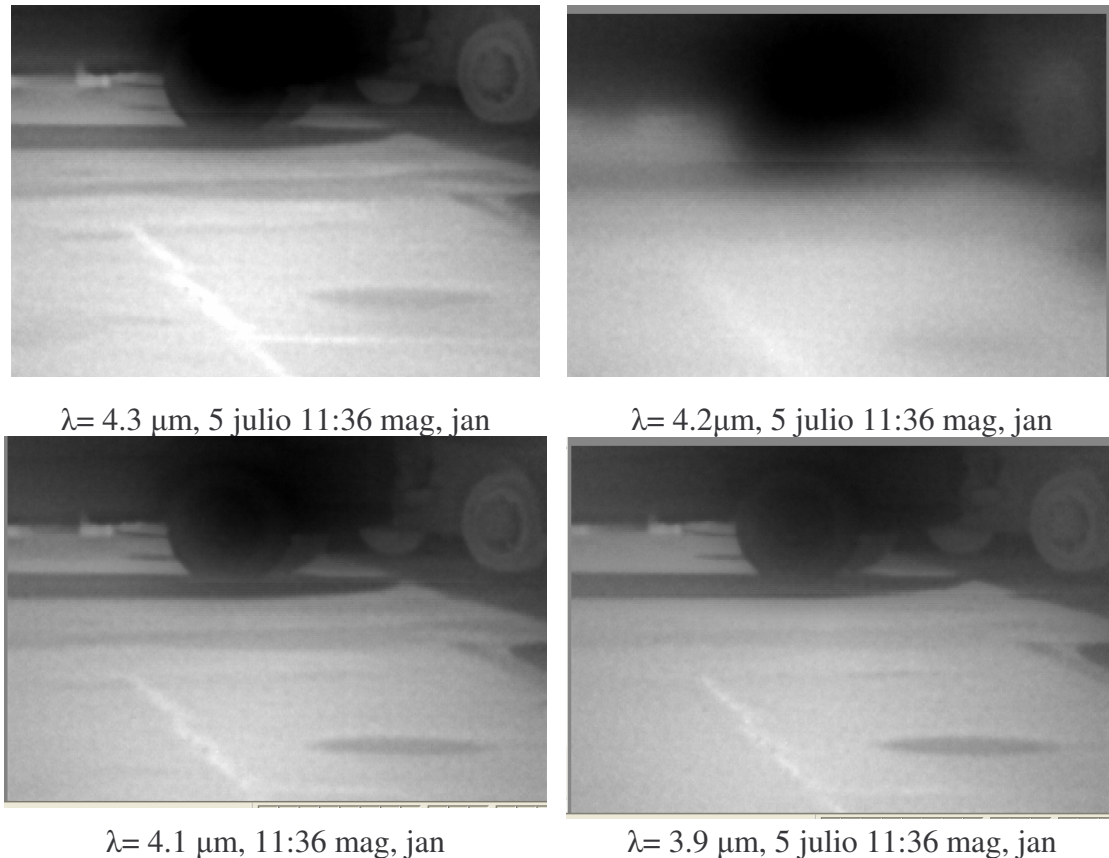


Fig. 2.12: Imagen compensada en aumento, y deconvolucionada espectralmente.

El algoritmo de compensación de magnificación corrige los cambios de la magnificación des-magnificando la imagen y en bruto, mantiene los objetos al mismo tamaño durante toda la secuencia de tramas. Esto se consigue reasignando un valor a cada píxel espacialmente en función de la condición de magnificación para cada trama. Se implementó una función en Matlab a partir de la recta de desplazamiento del centro de magnificación en la colección de imágenes hiperespectrales, y magnificando con un escalado regular.

A longitudes de onda más corta, la huella del píxel es menor que a longitudes de onda más largas, lo que produce una densidad de flujo diferente. Sin embargo, cuando un blanco tiene una señal significativamente mayor que el fondo, la densidad de flujo es prácticamente la misma (en un escenario cuyas condiciones son conocidas). Usando la corrección de magnificación y manteniendo la longitud de onda menor, como el valor relativo de la magnificación la señal; puede ser compensada.

La gran dificultad que se planteó al aplicar el algoritmo de compensación de la magnificación fue la obtención del píxel correspondiente al “**centro de magnificación**”. El sistema se calibra antes de su distribución para un centro determinado por la cámara

y las diferentes lentes que en ocasiones se ensamblan en medio. Este valor se considera durante la calibración de la lente con la cámara y se encuentra en el fichero de calibración⁵ *.cal. Este fichero se ejecuta en la configuración del sistema, escribiéndose directamente sobre la cabecera de los datos y siendo transparente al usuario.

No obstante, el sistema lente IMSS + Cámara IR, ha sido calibrado durante este proyecto, como medida necesaria para su correcta utilización. Los proveedores del hardware PAT, comercializan el sistema cerrado al usuario, y realizan la calibración a las cámaras de utilización de forma personalizada. Para adaptar la lente a la IMSS, tuvimos que obtener el centro de magnificación por medio de diferentes medidas exteriores y modificando los ficheros que proporciona el software. Detallaremos en el siguiente capítulo, que hace mención a la calibración de todo el sistema, los pasos a seguir y las conclusiones obtenidas para la determinación de este píxel o centro de magnificación y la magnificación provocada.

- **Creación de un fichero de *tracking* o seguimiento.** Cada trama hiperespectral representa la intensidad espectral de un escenario. El *software* HyPAT II permite al usuario especificar las regiones espaciales que serán analizadas para obtener un espectro infrarrojo, las N tramas grabadas y el camino que sigue la zona de interés ROI⁶ para seguir a un blanco. Si la ROI es suficientemente pequeña como para incluir únicamente el blanco, se produce un pico bidimensional de detección para cada *frame* que producirá un valor que es interpretado como la intensidad espectral del blanco.

Esta estimación permite determinar el espectro virtual de cualquier blanco dentro del campo de visión, sencillamente aplicando diferentes ficheros de seguimiento en el proceso de extracción.

- **Generación del espectro.** A partir del fichero de seguimiento generado se crea un archivo de salida con el nuevo espectro, en formato Excel.

- **Deconvolución espectral.** Una vez generados los ficheros de seguimiento y espectro, se puede mejorar o realzar el mismo, mediante el algoritmo de MERLIN, que hace una función de deconvolución espectral y obtiene un espectro más abrupto. Se pueden seleccionar el número de iteraciones y la sigma, siendo por defecto 10 y 0.3 respectivamente. Entre cada iteración se aplica una función de “alisado” que suaviza la respuesta y evita amplificar el ruido de pico (*spike jitter*).

Extenderemos el concepto de deconvolución espectral así como la metodología utilizada para datos hiperespectrales en el siguiente apartado.

2.5 Procedimientos de Caracterización .Algoritmo de deconvolución.

Como dijimos al presentar la lente IMSS, ésta convolucionada espacial y espectralmente información para recrear una imagen, cuyos puntos son función de la posición y de la longitud de onda a su vez.

A continuación listaremos los parámetros utilizados y los valores óptimos para nuestras medidas.

⁵ Se adjunta en el apéndice III

⁶ *Region of Interest*

- La función espacial que rige los puntos en su dominio espacial, es bidimensional teniendo información en el plano XY, seleccionamos el algoritmo JWS para la deconvolución espacial pero la imagen no resultaba nítida. Por otra parte el algoritmo de deconvolución espacial JAN, proporciona más posibilidades de combinación de sus 3 *parámetros que pueden ser modificados para adaptarlos a la aplicación:*

1. Desviación típica (sigma), todo el ancho y la mitad del máximo de la función espacial.
2. el número de iteraciones.
3. la función de suavizado o alisamiento.

- La función espectral, es octogonal a la espacial, a lo largo del eje Z o en el dominio espectral: MERLIN, es el algoritmo que permite la deconvolución espectral, lo aplicamos tras la deconvolución espacial con JWS.

Las funciones de suavizado para mejorar la respuesta, aplicadas en el dominio espacial resultan diferentes en el dominio espectral. Los parámetros con MERLIN son el factor K, y el número de iteraciones; y la función de alisamiento, que se aplica tras cada iteración del algoritmo no lineal de deconvolución.

Se utilizaron los valores recomendados por el fabricante para comparar los resultados tras ambas deconvoluciones espacial y frecuencial, así como la deconvolución espectral aplicada sobre los datos en bruto. Los parámetros usados son $k=0.3$ y 10 iteraciones, que son los valores obtenidos más óptimos, tras aplicar el algoritmo sobre los valores en bruto no se aprecia mejora del espectro. Sin embargo, cuando se hizo la deconvolución espacial con un filtro de suavizado, se mejoró bastante, pese a seguir teniendo un espectro ruidoso. Los mejores resultados han sido obtenidos realizando un procesado espacial primero con las máscaras de Dennis o con el algoritmo de JAN con $\sigma=3$ y 10 iteraciones. Y posteriormente aplicando la deconvolución espectral con MERLIN con $k=0.3$ y 10 iteraciones, y una función de filtrado SG 16.

2.6 Conclusiones

Cómo se ha visto hasta ahora, en este capítulo se estudió la lente hiperespectral, desde la configuración de la captura hasta el procesado que lleva a cabo el software que suministra el fabricante. Se han diferenciado dos conclusiones importantes a tener en cuenta en la caracterización del sistema hiperespectral, por un lado la aparición de un efecto óptico que condicionó las medidas, y por otro, la dificultad de aplicar la herramienta HypatII.exe con los nuevos parámetros y sobre nuestra cámara.

2.6.1 Narciso

La disposición relativa de la óptica del sistema con el detector puede dar lugar a pequeños puntos o zonas oscuras o brillantes en la imagen, no procedentes de la escena observada, sino causadas por efectos de reflexión no deseados. La aparición de estos

efectos está motivada no sólo por las lentes de la óptica de enfoque, sino también por los cristales de protección del sistema. El efecto denominado **narciso** se produce por la reflexión de la superficie del propio detector sobre las lentes de enfoque o la ventana, de tal forma que el detector puede "verse a sí mismo". Este efecto se vuelve más pronunciado y molesto cuanto más enfocada aparece la imagen reflejada. En los sistemas de disposición matricial se suele emplear la etapa de adaptación de ganancia/nivel para eliminar el efecto narciso de la señal de salida.

El narciso se observó en nuestro sistema, en las medidas de laboratorio durante la calibración con miras. No solo las medidas dejaron de ser válidas, sino que fue necesario apagar todo el sistema hasta conseguir que se enfriara, lo que podía llevar hasta el día siguiente.

Este hecho nos limitó el tiempo de las medidas de forma continua, además de requerir un control del calentamiento de la lente.

2.6.2 Conclusiones sobre el software *HypatII.exe*.

El fabricante del sistema hiperespectral; además de realizar la adaptación entre la lente y la cámara utilizada, proporciona el software para la adquisición y el post-procesado.

Primeramente se analizaron las imágenes utilizando el software de la IMSS, en el laboratorio con la configuración cámara-lente-colimador-cuerpo negro. Se procuró que la imagen del cuerpo negro no cubriera el FOV de la cámara para así poder ver el efecto del posible cambio de tamaño del blanco. El primer problema que planteó este software fue en la captura en modo *Scan*, por la sincronización entre las tramas capturadas y su correspondiente longitud de onda asociada. Se solventó, capturando en modo paso a paso *Step* y tratando las imágenes con el software *IR_vista*.

El problema siguiente fue deconvolucionar espacialmente, ya que la herramienta permite variar diferentes parámetros, máscaras y filtros preprogramados; pero sin ningún tipo de documentación ni ayuda acerca de su funcionamiento. Además de este inconveniente, la corrección de magnificación y la deconvolución espectral de los datos, eran igualmente tratadas, a base de máscaras dependientes en ocasiones del escenario, y nada adecuadas para nuestra aplicación.

Por otra parte, el efecto de la óptica en medidas menores de 100m, que era necesario corregir; aparece explicado en el manual pero al igual que el resto de operaciones, es totalmente transparente al usuario.

Sumado a este cúmulo de inconvenientes, estaba la violación de privilegios que aparece al modificar los parámetros del fichero de calibración, con valores adaptados a nuestro sistema, principal objetivo de este proyecto.

En definitiva, esta herramienta, ha generado en el transcurso de las medidas, más problemas que resultados, no obstante las imágenes obtenidas se han podido tratar en otras plataformas; con la previa adaptación del formato de los datos.

3. Caracterización del sistema hiperespectral: Cámara IR+ Lente IMSS

El sensor de imagen multiespectral (IMSS), es uno de los pocos sistemas hiperespectrales infrarrojos comerciales. Consiste en una cámara MWIR estándar, en nuestro caso la *Phoenix de Indigo*; una óptica ensamblada en forma de lente difractiva seleccionable en longitud de onda, fabricada por *Pacific Advanced Technologies* (PAT) y un PC para la adquisición, almacenamiento y procesamiento de las imágenes.

El funcionamiento del sistema completo, depende en gran medida de la interrelación y el acoplamiento de cada uno de los bloques que lo conforman. La configuración del instrumental conjunto es primordial a la hora de obtener fiabilidad en los datos medidos. Es por ello, que con el fin de adquirir datos para contrastar la eficiencia del sistema IMSS, la cámara *Indigo Phoenix* ha sido caracterizada primeramente en ausencia de la lente.

Se ha caracterizado el sistema completo para posteriormente probarlo en aplicaciones militares; en la detección y reconocimiento de gases como CO₂, en firmas térmicas de varios vehículos. Los procedimientos de calibrado de los equipos utilizados y las funciones medidas; han sido escogidos en función de esta aplicación, principalmente las curvas obtenidas para la cámara infrarroja.(SiFT, MTF...etc.)

Para poder desarrollar cualquier aplicación con el sistema completo, ha sido necesario conocer el sistema y sus limitaciones. En este capítulo se presenta por una parte la caracterización de la cámara IR, la caracterización del sistema completo cámara + IMSS, los test de calibración y por último las medidas prácticas.

3.1 Descripción del instrumental y procedimientos

El primer paso en la caracterización del sistema, se llevó a cabo en el Laboratorio de Termovisión del CIDA¹, en un entorno de temperatura y humedad controladas. Como se comentó en el capítulo 1, dedicado a la descripción y manejo de la cámara infrarroja; el sistema compuesto por la *Phoenix de Indigo* + la lente *Janos* enfoca a partir de 100m de distancia al blanco. Distancia que simulamos en el banco de pruebas, con un colimador entre el sistema y el objeto a discriminar. Este objeto varió entre distintos cuerpos negros, de respuesta claramente definida, y diferentes miras estandarizadas.

En este capítulo se muestran los resultados de varias medidas y figuras de mérito. Se detallará para cada una: el cuerpo negro, las miras y el colimador utilizado, ya que se colocó el sistema en dos bancos de trabajo diferentes y los procedimientos de calibración dependieron en cierta medida del equipo utilizado. Así mismo, las medidas exteriores se contrastaron con una lente diferente y con una cámara LWIR, tomando un sistema de referencia de placas térmicas y un cuerpo negro alineados con el tubo de escape de los vehículos utilizados.

La figura 3.1 muestra un diagrama donde se identifican las diferentes partes que componen el instrumental utilizado para el calibrado y la configuración, de cada uno de los aparatos.

¹ Centro de Investigaciones de la Armada española.

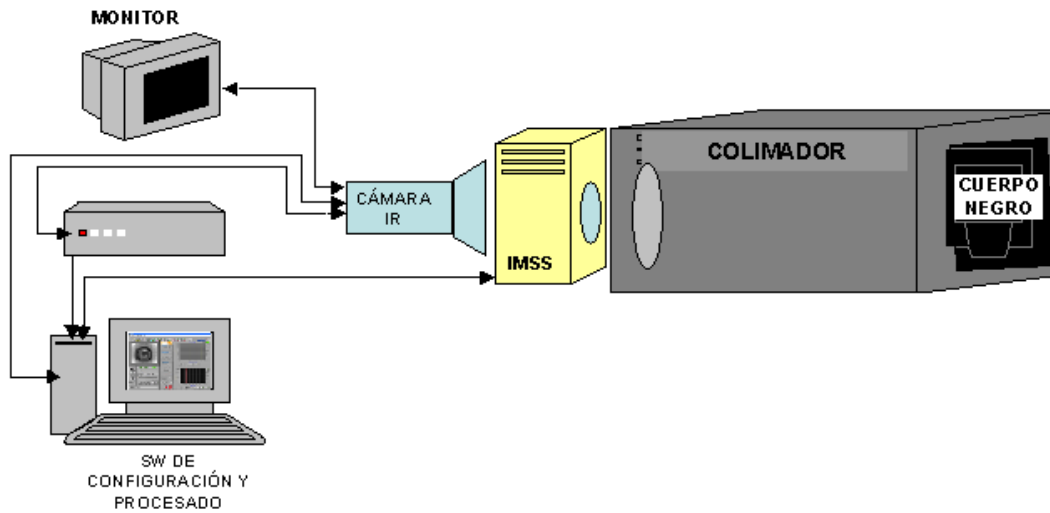


Fig. 3.1: Esquema de conexiones del instrumental.

Observando la imagen de derecha a izquierda, tenemos el cuerpo negro controlado por el bus GPIB, situado en el foco de un colimador. A la entrada del colimador, hemos alternado la cámara infrarroja con diferentes lentes, incluida la IMSS, para contrastar los resultados. Las medidas de la cámara en ausencia de lente, se llevaron a cabo sin el colimador, colocándose directamente frente a los cuerpos negros de 2 y 4 pulgadas. (Figura 3.2)

Los dispositivos de la izquierda, como el monitor, el *frame grabber* y el ordenador de procesamiento, completan el sistema total.

Se muestra a continuación una fotografía del laboratorio, en el banco_I de pruebas, donde aparece la cámara IR, la lente IMSS, y el cuerpo negro de 4 pulgadas, en ausencia del colimador; configuración que se utilizó para las medidas de SiFT y ruido.

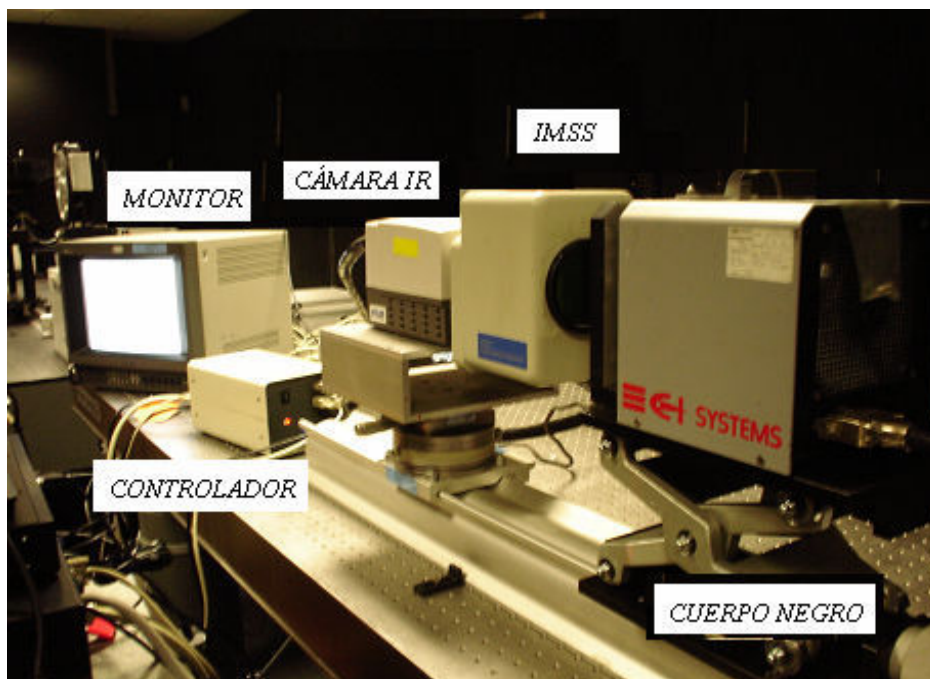


Fig. 3.2: Montaje cuerpo negro + lente IMSS + cámara IR

3.1.1 Banco de trabajo, rueda de miras, y cuerpo negro.

Las primeras medidas durante la configuración del sistema y su calibrado, se llevaron a cabo en el banco de trabajo I, mientras que en el banco de trabajo II se obtuvieron las curvas de MTF de la cámara IR y del sistema cámara IR + lente IMSS, además de las curvas de MRTD, MDTD de la cámara IR. Ambos bancos de pruebas incorporan su propio colimador, rueda de miras y cuerpo negro.

En el banco II, de *Optikos*, las medidas están automatizadas y controladas por software, debido a la precisión que conllevan lo utilizamos únicamente para las medidas anteriormente citadas. Describiremos por tanto, los procedimientos y la configuración de cada uno de los dispositivos usados en el banco I.

Utilizamos dos cuerpos negros para las medidas de SiTF, NETD y configuración de parámetros relativos a la cámara infrarroja, justificado principalmente por varios motivos. Si bien, tanto con el cuerpo negro de 2 pulgadas como con el de 4 pulgadas, conseguíamos "cubrir" el total de la lente con el cuerpo negro; la presencia de puntos calientes y reflejos no deseados nos obligó a considerar las dos posibilidades.

Para la determinación del centro óptico de la cámara, y los efectos de dispersión de la lente en función de las longitudes de onda; fue necesario colocar una mira rectangular a la salida del cuerpo negro. Se tomaron diferentes colecciones de imágenes referenciadas a las dimensiones de la mira.

Los efectos de magnificación y desplazamiento que la óptica provocaba debido al cambio de la focal del sistema, para cada una de las longitudes de onda, fueron caracterizados a partir de esta mira, y de acuerdo con el máximo de radiación recibida.

Por otro lado, la curva Irradiancia espectral (M) del cuerpo negro; es función de la temperatura seleccionada y su valor es diferente para cada longitud de onda. Este efecto será considerado más tarde en las medidas exteriores, para determinar las gráficas Intensidad *versus* longitud de onda ($I-\lambda$) y posteriormente estimar la temperatura a partir de la radiancia medida, y calcular también la emisividad del blanco.

La figura 3.3 muestra las curvas de Irradiancia para el cuerpo negro a 25° C, la grafica b) no es si no una ampliación de la respuesta a) de una parte del rango a nuestra zona de interés de longitudes medias del infrarrojo. (MWIR)

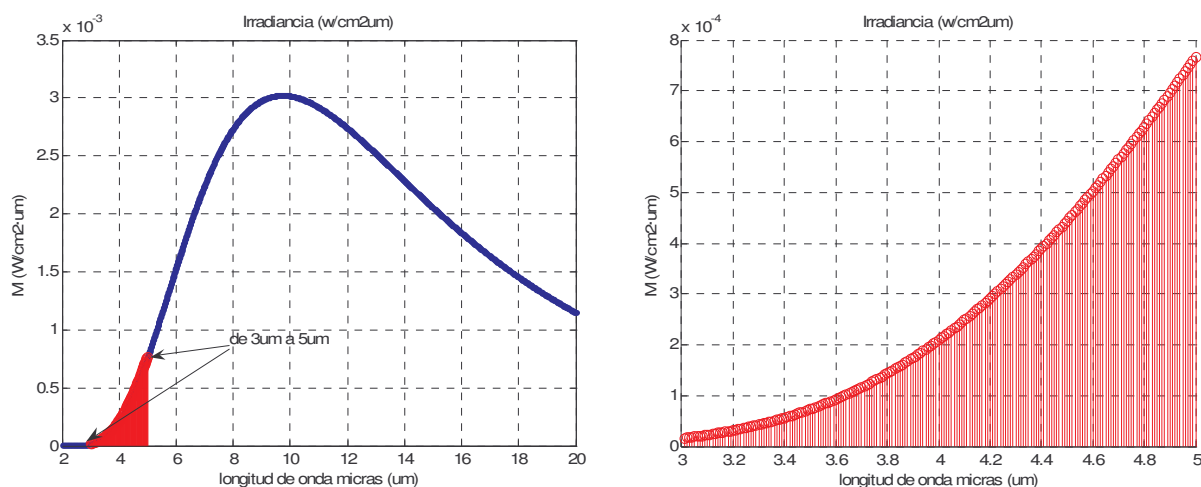


Fig. 3.3: a) Curva Irradiancia.

b) Rango de 3µm. a 5 µm.

3.1.1.1 Configuración del banco II. (Optikos)

Las medidas de SiFT, NETD, y otras de configuración se tomaron en el banco_I, donde se realiza manualmente el control del cuerpo negro, de la cámara, las miras...etc. El software asociado a cada dispositivo se gobierna por separado. Sin embargo en el banco_II, la calibración y las medidas están automatizadas y embebidas bajo la herramienta I-site².



Fig. 3.4: Imagen Banco_ II.

Este banco de medidas tiene implementadas todas las funciones de caracterización de cámaras, aunque sólo lo utilizamos para medir la MTF, y contrastar los datos obtenidos con el otro banco. Comentaremos las principales funciones para nuestro sistema, extendiéndonos más en la medida de LSF y MTF cuyos resultados se muestran en sucesivos apartados de este capítulo.

² Se explica su configuración y manejo en el apartado 3.3.1.2.2

3.1.2 Placas térmicas para el calibrado

Puesto que en este apartado hemos mencionado los dispositivos que intervienen en la caracterización del sistema completo, pasamos a describir el equipo de referencias utilizado en las medidas exteriores, compuesto por 4 placas térmicas, cada una regulada y estabilizada mediante un controlador independiente, que permite seleccionar su temperatura individual y mantenerla constante. En el apartado 3.4.7, mediante este sistema, se desarrolla el procedimiento para determinar el efecto de la dispersión de la radiación con la longitud de onda; de la misma forma que se hizo en el laboratorio con la mira rectangular y el cuerpo negro³. También, este equipo, nos sirvió para calibrar en radiancia el sistema hiperespectral. Ppara diferentes valores de señal recibida, y distancias del blanco conocidas, se midieron los valores de la señal de salida de la cámara. Estos valores se utilizaron para obtener la evolución en la temperatura del tubo de escape, y la magnificación en una zona céntrica de la lente. En el capítulo 4, las referencias aparecerán en las imágenes exteriores alineadas junto a los coches, pudiéndose apreciar la imagen en infrarrojo, y el nivel de radiación, dependiente de la longitud de onda, que asociaremos a su temperatura real.



Fig. 3.5: Equipo de calibrado con placas térmicas en espectro visual.

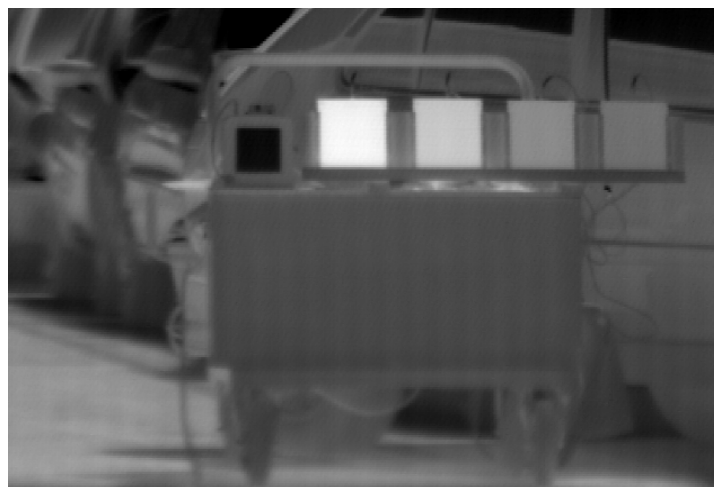


Fig. 3.6: Equipo de calibrado con placas térmicas en infrarrojo lejano.

³ apartado 3.4.4.

3.2 Configuración del Sistema

Los pasos a seguir en la configuración del sistema, parten de la configuración de la cámara, descrita en el capítulo 1. Mencionaremos los cambios que han sido necesarios al ensamblar la lente y los parámetros que se han tenido que considerar como consecuencia del desenfoco y del cambio de magnificación provocados por el nuevo dispositivo.

3.2.1 Tiempo de integración

Se varió el tiempo de integración de los detectores. Se han considerado los tiempos de 1ms, y 1.9 ms; que son los que permite utilizar la cámara infrarroja. Para elegir otro valor es necesario crear una máscara que se cargue al iniciar el software.

3.2.2 NUC y BPR

También para analizar el efecto de NUC y BPR sobre la imagen final, se procedió de forma análoga a la caracterización de la Phoenix en ausencia de lente, salvo que en el caso anterior consideramos el cuerpo negro frente a la cámara.

Con la configuración de Colimador + lente IMSS + BB, se seleccionaron en modo *Step* (paso a paso), 10 longitudes de onda de 3 μm a 5 μm , en pasos de 0.2 μm de resolución espectral, con el fin de observar los cambios en la imagen al variar la NUC y BPR. El proceso se repitió para diferentes temperaturas, debido a que variando el contraste no era suficiente para distinguir la mira en todo el rango. También se repitió con ambos cuerpos negros y diferentes formatos de almacenamiento. Mostraremos el comportamiento para diferentes longitudes de onda seleccionadas y los parámetros considerados en su captura. En esta figura, para una longitud de onda $\lambda=5\mu\text{m}$ se presentan a la izquierda los valores de los parámetros de las imágenes. Las graficas son: la extraída de la imagen en dos dimensiones xy, seguida de la imagen en tres dimensiones correspondiendo la z con los niveles de intensidad en cada píxel y debajo se disponen dos perfiles horizontal y vertical centrados en el máximo.

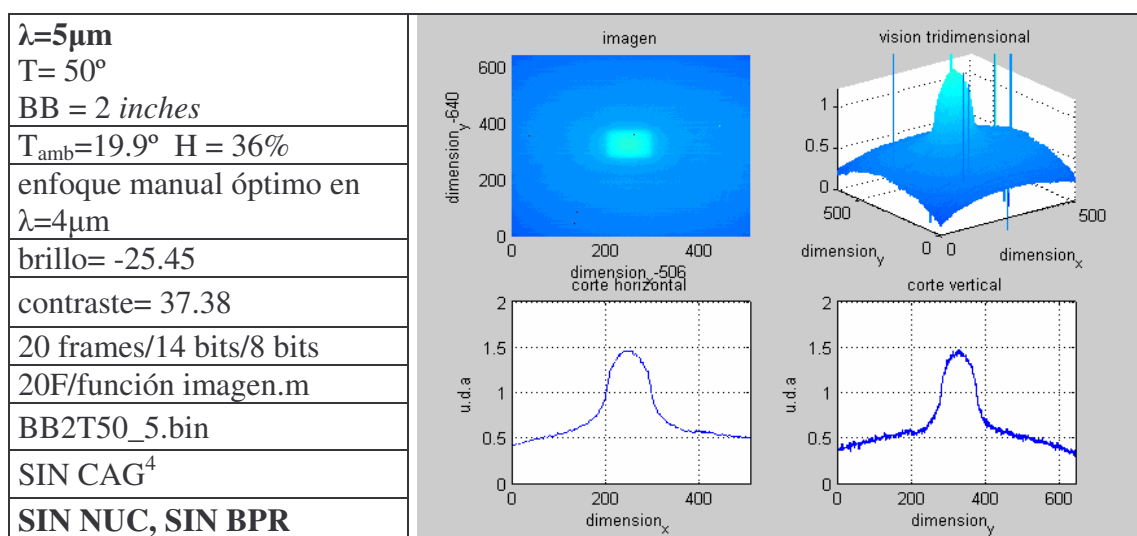


Fig. 3.7: Imagen sin corrección NUC, ni BPR.

⁴ Control Automático de Ganancia

Analizando las diferentes longitudes de onda, al ser el comportamiento semejante en todas ellas, se puede estimar que sin NUC, ni BPR, la imagen no es uniforme. Por otra parte, se observa que los perfiles verticales presentan más variaciones que los horizontales, consecuencia del distinto tamaño horizontal y vertical del detector además de la propia óptica, que se comporta distinto en cada plano, (fenómeno de distorsión).

A continuación presentamos la figura correspondiente también a 5 micras, pero en esta ocasión tras considerarse la opción de NUC, pero no de BPR.

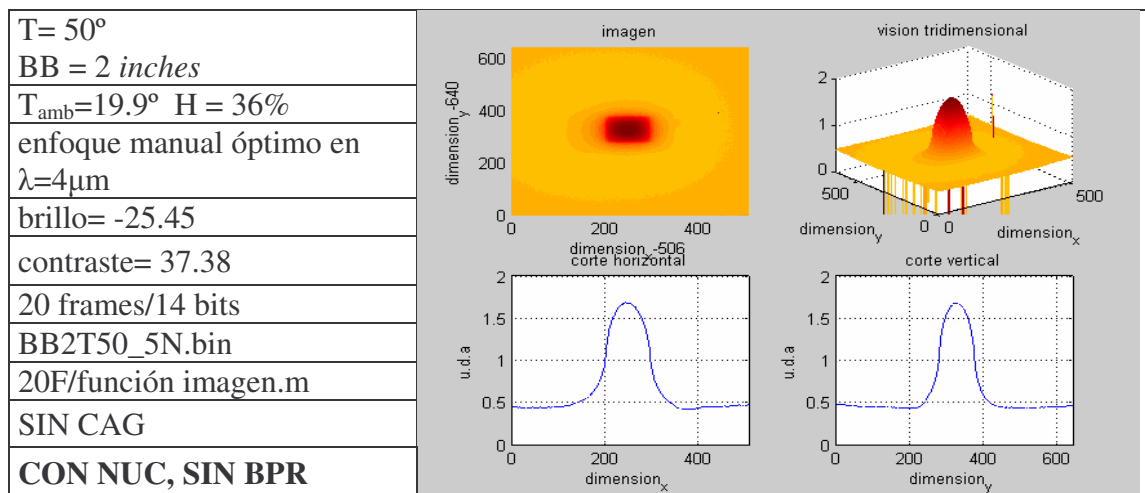


Fig. 3.8: Imagen con corrección NUC, pero sin BPR.

Al incluir la NUC la imagen mejora bastante desapareciendo muchos de los picos que aparecían anteriormente y se observa que los pixeles malos que quedan tienen en casi todos los casos una respuesta inferior a la debida. Por el rango de niveles de la paleta de colores, se aprecia que la imagen es más contrastada y el fondo es mucho más uniforme.

Por último, se muestra el efecto final tras aplicar NUC y BPR.

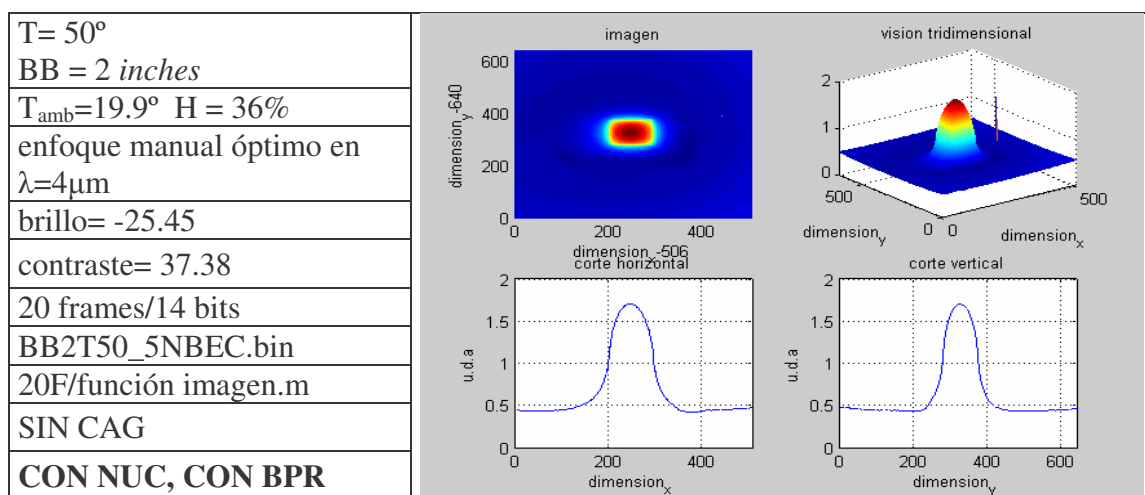


Fig. 3.9: Imagen con corrección NUC y BPR.

En este caso se aprecia, que al incluir BPR, los píxeles que tenían una respuesta excesivamente baja han sido reemplazados. Sólo quedan un par de ellos con una respuesta excesivamente alta.

Pese a tratar con paletas de colores diferentes debido al distinto rango de niveles en las imágenes, se distingue perfectamente el cuerpo negro muy contrastado con el fondo para los valores de brillo y contraste considerados, valores condicionados por el rango de temperaturas necesarias en las pruebas exteriores.

Para poder comprender mejor el comportamiento tras aplicar la NUC elegida, vemos el efecto a partir de dos gráficas correspondientes a los perfiles de una imagen capturada a una longitud de onda de $5\ \mu\text{m}$ con y sin NUC.

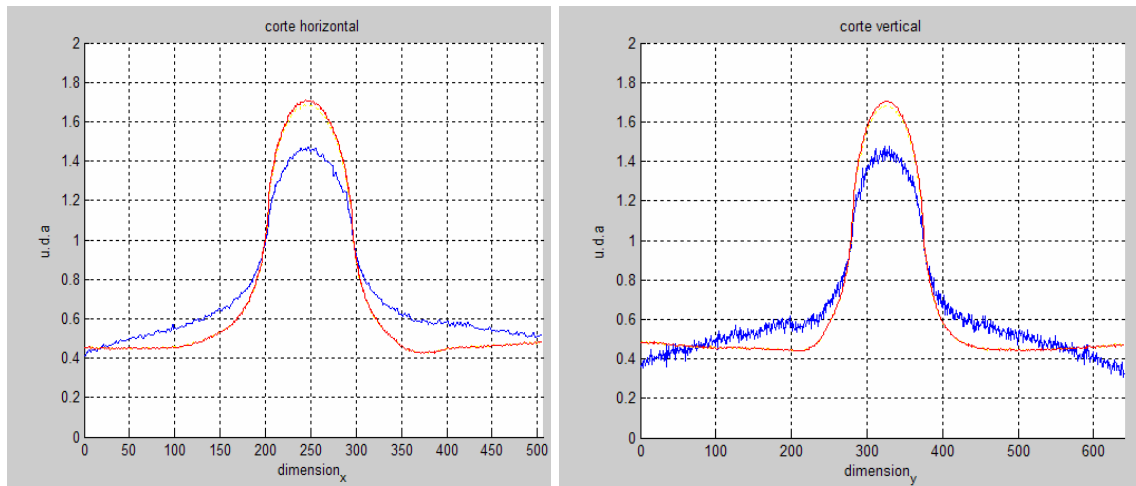


Fig. 3.10: Señal roja con NUC, azul sin NUC, perfil horizontal y vertical a $5\ \mu\text{m}$

Pareciera que con el NUC, aumentase la intensidad, pero en realidad en muchas zonas del perfil que corresponden al fondo, la intensidad se ha reducido al aplicar el NUC, mientras que en la zona del cuerpo negro ha aumentado. Lo que sucede, es que al no aplicar el NUC, cada píxel responde de una forma un tanto arbitraria, y eso implica que las diferencias entre unas zonas de la imagen y otras tiendan a desaparecer. Con el NUC, todos los píxeles tienen la misma respuesta (en los puntos de ajuste), y por tanto los contrastes que existen en la imagen real se trasladan con mayor fidelidad a la imagen adquirida por la cámara. En nuestro caso la imagen se hace más uniforme en el fondo y el cuerpo negro aparece mucho más contrastado.

Las imágenes seleccionadas para este apartado, tienen en común la temperatura y el cuerpo negro considerado, la longitud de onda, los formatos de almacenamiento y el tipo de enfoque realizado. Para esta secuencia se enfocó la cámara IR+ lente, a una longitud de onda central de $4\ \mu\text{m}$, con ajuste lineal, y manualmente se determinaron los valores de brillo y contraste. Posteriormente se anuló el control automático de ganancia para mantener estos datos fijos en las diferentes longitudes de onda. Aunque en apartados posteriores hagamos mención a otros parámetros como temperaturas, formatos, y periféricos considerados; el procedimiento de ajuste será el mismo.

En el apéndice 8.3 se incluyen las hojas de anotaciones de la configuración de cada medida, así como las modificaciones que se hicieron sobre el procedimiento.

A continuación incluimos una secuencia tomada también para el cuerpo negro de 2 pulgadas, y considerando una mira de 4 barras en el centro de la imagen. El porqué de incluir esta imagen en las diferentes consideraciones sobre NUC y BPR, parte de buscar

explicación a la mala calidad de las imágenes tomadas a bajas longitudes de onda en nuestro rango. Consideramos una longitud de 3.4 μm .

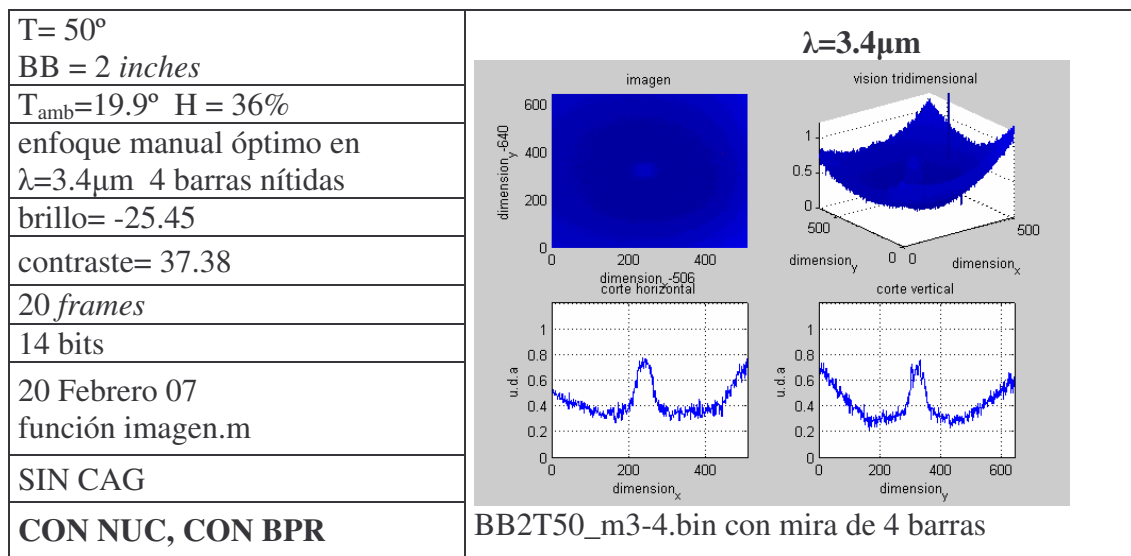


Fig. 3.11: Imagen corregida con NUC y BPR, para longitudes de onda bajas.

Se descartaron las longitudes de 3 μm a 3.2 μm de las medidas, por motivos mecánicos de retroceso en el motor de la lente.

Partiendo de 3.2 micras en todas las medidas se observaba cómo al realizar la captura sin BPR, por debajo de 3.4 μm prácticamente no se distinguía detalle alguno de la mira. Si el número de píxeles malos hubiese sido muy grande, esta situación se hubiese podido justificar por el hecho de aplicar BPR. El efecto de aplicar BPR es local, es decir, afecta al valor de la señal en el píxel de que se trate pero no en los adyacentes, lo que se traduce en la imagen como puntos espurios que aparecen desperdigados. El cuerpo negro, tiene un tamaño bastante grande y ocupa muchos píxeles, pero la señal del cuerpo negro a la temperatura de 50° C., es menor conforme disminuye la longitud de onda (en este rango, ya que la longitud de onda es menor que la correspondiente a su máximo de radiación), y por eso la cámara recibe menos energía en esa zona, y es a su vez, algo mas sensible a los píxeles malos. De ahí se desprende, que la imagen parezca mejorar al corregir con BPR.

Llegados a este punto, en sucesivos apartados se aumentó la temperatura del cuerpo negro, para tener mayor señal a estas longitudes de onda mas problemáticas.

No obstante la calidad de la imagen a cortas longitudes de onda como se verá no consiguió mejorarse mucho y se pasó a hacer un estudio de la respuesta espectral del sistema para entender y poder justificar al menos este comportamiento.

En la figura 3.12, se muestran tres imágenes en infrarrojo para una longitud de onda de 4.2 μm del cuerpo negro con una mira cuadrada, correspondientes a una imagen sin NUC, con NUC y sin BPR, y con NUC + BPR, respectivamente. Podemos ver el efecto visual que tiene la consideración o no de estos parámetros.

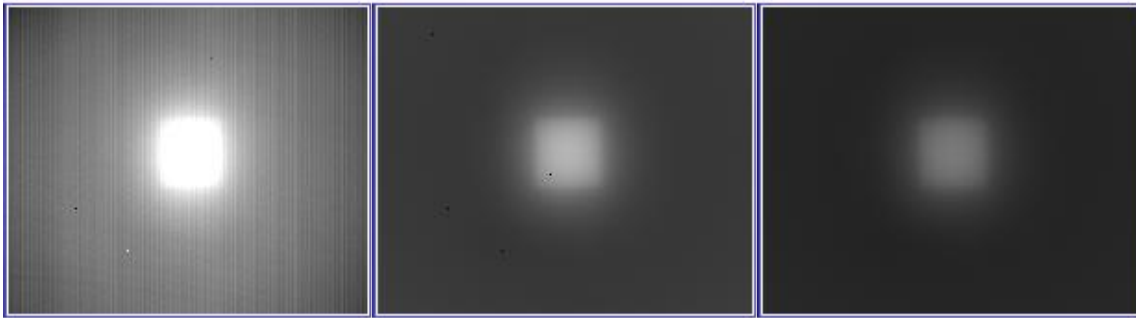


Fig. 3.12: Secuencia IR tras la aplicación de correcciones de NUC y BPR.

3.2.3 Consideraciones de almacenamiento de muestras.

Gran parte de la resolución de las imágenes IR, depende del modo de captura empleado. De esta forma la información que extraigamos posteriormente tiene una relación directa con el número de bits con que codificamos la señal recibida. La captura en "bruto" corresponde a los 14 bits disponibles en el formato de trama. Sin embargo, tanto en la visualización en monitor como en la manipulación en software de procesamiento posteriores, en ocasiones se toman 8 bits. Las consideraciones de brillo y contraste son determinantes cuando la captura se hace directamente con 8 bits.

Se muestrearon con ambas opciones, las respuestas a las diferentes longitudes de onda, con varias temperaturas prefijadas del cuerpo negro y las combinaciones de NUC y BPR, anteriormente descritas. La necesidad de comparar escenarios con contenido frecuencial distinto, cuyo nivel de señal es variable para diferentes valores de los parámetros brillo y contraste; nos obligó a capturar siempre a la mayor resolución, a 14 bits.

La figura 3.13 presenta tres imágenes cada una correspondiente a un modo de funcionamiento: 14 bits con corrección NUC y BPR, 14 bits sin corrección y 8 bits.

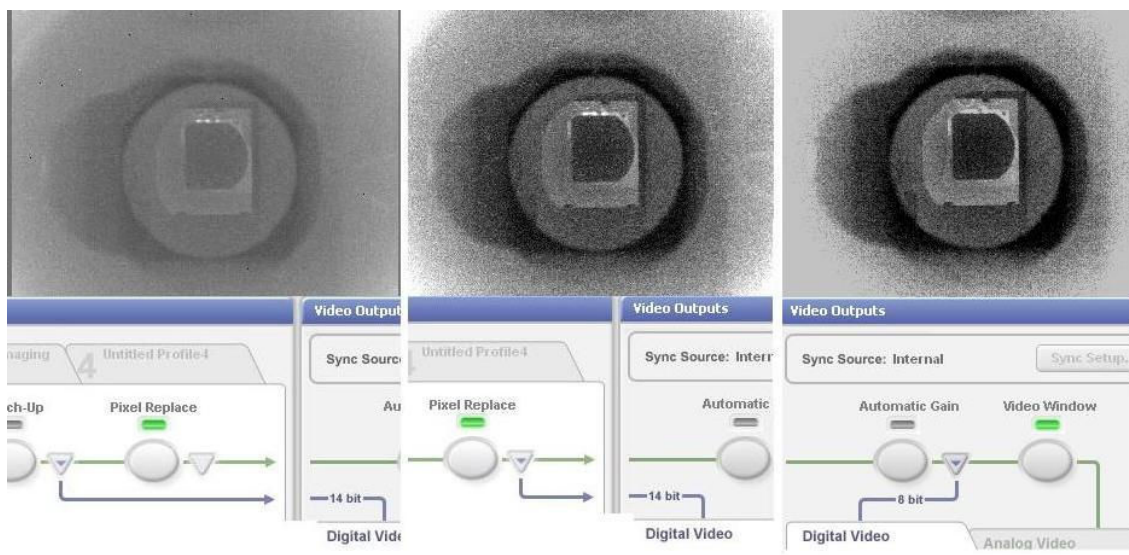


Fig. 3.13: Modos de captura. *Software Phoenix User Interface.*

El formato de almacenamiento *.bin en que quedan guardadas las imágenes IR contiene en su cabecera información relativa al modo de captura, en relación con el tipo

de cámara y la codificación de los datos en cada *frame*. La existencia de otros dispositivos con capacidades de 16 bits y 32 bits, es el motivo de que haya determinados algoritmos estándares para el tratamiento de imágenes; diseñados en función de la resolución del sistema. Este hecho es relevante, ya que el *Toolbox* de Visión de *Labview* permite manipular imágenes de 32, 16 y 8 bits de resolución. Existen opciones en la herramienta, sólo disponibles para formatos de 16 bits y superiores, lo que implica que no hayan podido aplicarse sobre nuestras imágenes. Por otra parte para poder tratar las imágenes con otras funciones, se pierde información tras hacer la conversión a 8 bits, de los datos tomados a 14 bits.

3.2.4 Control Automático de Ganancia

Se dedica este apartado a justificar el hecho de que se desactive el control automático de Ganancia en la configuración de la cámara, al calibrarla para realizar las medidas con unos valores de brillo (*offset*) y contraste (ganancia) previamente fijados.

En muchos sistemas de imágenes, y en especial para los sistemas de infrarrojos, la radiación ambiental presenta un nivel medio de radiación bastante alto. Para aprovechar al máximo el rango dinámico del convertidor A/D, se emplea la etapa de normalización de ganancia y nivel. La señal eléctrica del detector, debida a esta radiación de ambiente se desplaza al centro del rango del convertidor, cuyo rango dinámico será quien limite los niveles de saturación.

Se suele situar antes de la etapa de normalización un circuito de control automático de ganancia CAG. El CAG ha de asegurar que todas las señales se sitúan dentro de los límites y rangos de las demás etapas. La intensidad del fondo, del objetivo o incluso el tamaño de éste pueden afectar al CAG. El CAG tiene una ventana electrónica de actuación, de tal forma que las señales sólo afectan al CAG cuando se encuentran dentro de esta ventana.

En función de los niveles de señal, el CAG fija una ganancia, lo cual justifica no sólo que sea conveniente desactivarlo, sino necesario para poder comparar los diferentes niveles de intensidad para cada longitud de onda, con un mismo brillo seleccionado.

La ganancia debería ser fija en ciertos momentos, por ello, se ha desactivado este control automático antes de realizar las capturas.

3.2.5 Alineamiento del sistema

Todas las medidas con NUC, BPR, y sin ellas, y las combinaciones con 8 bits y 14 bits en la captura, tuvieron que ser repetidas, al apreciarse el efecto variable que se generaba con el eje vertical. Efecto no tan importante en la alineación de la lente con la horizontal, como con la alineación de la lente con la cámara.

Es necesario hacer esta mención, ya que la validez en las medidas depende en gran parte de esta consideración. La lente IMSS, disponía de dos niveles hidráulicos para ajustar su posición horizontal; sin embargo, la cámara IR en la cara de ensamblado con la lente presenta una leve inclinación respecto a la vertical, lo que implica un desajuste en la alineación de ambos dispositivos.

Se solventó este problema, elevando posteriormente la cámara unos milímetros, y fijando la lente IMSS al banco de medidas, habiendo estado, en principio, diseñada para quedar en voladizo unida a la cámara. Para las medidas exteriores, el soporte de ensamblaje se colocó sobre una plataforma de seguimiento, pudiendo ser ajustada tanto axial como longitudinalmente los grados necesarios hasta la óptima alineación.

3.3 Características del Sistema y medida de las mismas.

En el capítulo 1, comentamos los parámetros de medida y la calibración que se realiza con la cámara de infrarrojos; desde la configuración hasta la modificación de los parámetros óptimos en función de cada medida.

Repetimos para el sistema completo, varias curvas que se han considerado importantes en relación con la aplicación que nos ocupa. Así tenemos los cálculos de funciones relativas al ruido, y a la respuesta espectral del sistema.

3.3.1 Respuesta del IMSS en longitud de onda y en energía.

Para esta medida, el sistema experimental estuvo compuesto por un cuerpo negro de 4 pulgadas situado en el foco de un colimador para simular que el blanco se encuentra en el infinito (Figura 1.22). Sin la lente es necesario situar el cuerpo negro justo en frente de la cámara, no considerando por tanto los efectos del colimador incluidos en las medidas⁵ con la lente.

3.3.1.1 SiTF⁶

La función responsividad proporciona información sobre la linealidad, rango dinámico y saturación. La curva de responsividad tiene típicamente una forma de S debido a la denominada corriente de oscuridad que se da siempre pero se manifiesta a bajos niveles de radiación captada, y a la saturación que aparece con alta radiación.

A continuación describiremos los pasos a seguir para caracterizar al sistema en responsividad, tanto en el capítulo 1 como en el apéndice 8.1 se extienden las prestaciones y variaciones de los parámetros considerados en esta medida.

- Configuración de la cámara IR Phoenix: Se estabiliza aproximadamente a los 30' después de su encendido. El calibrado de brillo y contraste, partiendo del ajuste lineal, se modifica en modo manual Brillo= -25.07% y Contraste= 27.42; y se desactiva el control automático de ganancia para mantener fijos estos valores que coinciden con los considerados en las medidas exteriores. La medida se realizó para diferentes valores de brillo y contraste previamente a las imágenes de humos. Las curvas forman parte del apéndice.
- Configuración de la lente IMSS: Realizamos esta medida en modo *capture = Step*, considerando 10 longitudes de onda. Tras haber modificado el fichero de calibración con el centro de magnificación $x_c=242$, $y_c=320$, Temperatura ambiente estable a 25 °C y con el cuerpo negro de 4 pulgadas.
- Para cada curva se seleccionó la misma región de interés (ROI), prefijada en el centro de la imagen cuyos vértices opuestos son (192,384) y (384,192) formando un cuadrado. (Para ser rigurosos la ROI debería haber sido proporcional a la magnificación de la longitud de onda, a costa de variar el número de detectores considerados).

⁵la pendiente de la curva sin lente es más acusada no solo por el efecto de la lente sino también por no considerar el colimador

⁶ las medidas de SiFT, y NETD se realizaron con dos aplicaciones implementadas en Labview por el laboratorio.

- Tomamos un rango de temperaturas entre 15°C y 50 °C en pasos de 1 grado y muestreadas de forma ascendente⁷. No tenía sentido considerar temperaturas más altas del cuerpo negro ya que los detectores se saturan sobre este máximo, aunque midamos temperaturas mayores como es el caso del tubo de escape el nivel de radiación a la distancia considerada es mucho menor que en las medidas del laboratorio. Se considera un tiempo de integración de 1ms y dos puntos para la NUC (*Non -Uniformity Correction*), 15°C y 35°C; en todas las funciones calculadas con el sistema.

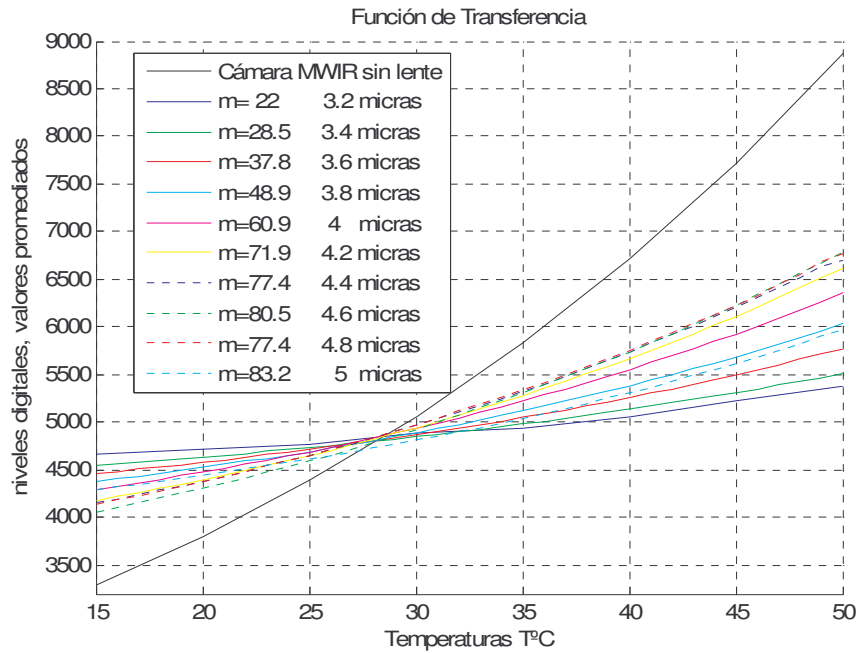


Fig. 3.14: Curvas de Sift (λ)

La definición de SiTF, vimos que podía escribirse de la forma:

$$SiTF = \frac{\Delta V_{SYS}}{\Delta T} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{A_d}{4 \cdot (f/\#)^2} \cdot \frac{\partial M_e(\lambda, T_B)}{\partial T} \cdot T_{SYS}(\lambda) \cdot T_{test}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.1)$$

en la figura 3.14, se puede ver la variación en la pendiente⁸ con la longitud de onda, considerable si tenemos en cuenta la relación directa que guarda dicho parámetro con el valor de brillo prefijado, siendo éste, el valor de las medidas exteriores. De la gráfica se desprende un mayor rango dinámico en las longitudes de 4.6 μm . y 4.8 μm . No obstante, el rango dinámico no depende de la longitud de onda. Depende de la ganancia y del brillo. Lo que sucede es que la intensidad de la señal para una temperatura determinada es diferente en cada longitud de onda.

La siguiente figura, muestra la SiFT medida en el laboratorio antes de realizar las mediciones exteriores, en la fase previa de calibración. A una longitud de onda de 4 μm , se modificaron los valores de brillo y contraste hasta obtener la mejor imagen posible. Con el sistema enfocado para esta longitud de onda se obtuvieron las curvas a 3.5 μm . y 4.5 μm , y se compararon con la curva de la cámara sin lente IMSS.

⁷ Para la MTF se varía ascendiendo y descendiendo sobre el rango de temperaturas.

⁸ m = pendiente de la curva

En esta primera calibración, se verificó la percepción que teníamos de las imágenes, siendo claramente más nítidas y con mejor resolución visual en el rango de longitudes de onda entorno a $4.5\mu\text{m}$.

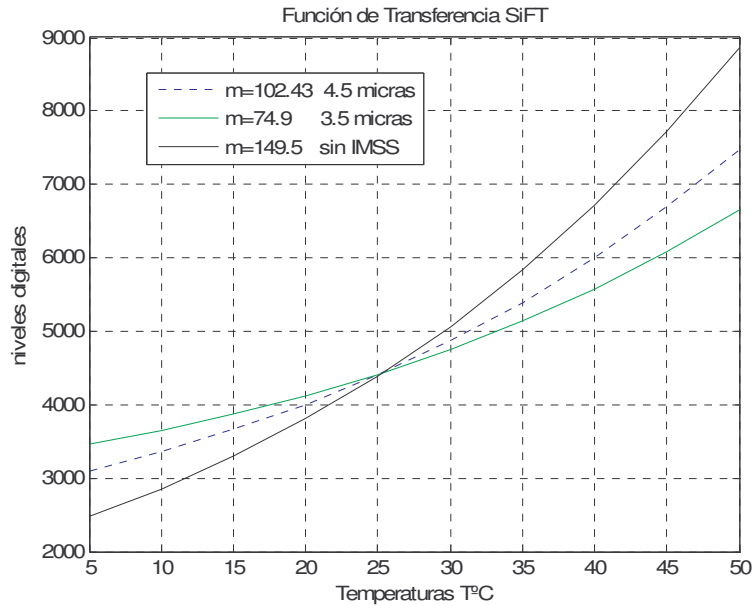


Fig. 3.15: Responsividad en longitudes con diferente grado de desenfoque.

3.3.1.2 MTF

Este apartado, trata de exponer dos métodos prácticos utilizados para la medida de MTF, uno mediante el algoritmo de Fermi, a partir de una colección de imágenes hiperespectrales utilizando una mira cuadrada, y el otro mediante el *slit* del banco_II de pruebas con la herramienta *I-site*. Se dedica por tanto, una sección a presentar dicha herramienta y su funcionalidad básica durante esta medida, y otra, al cálculo teórico previo de la frecuencia de corte, con los parámetros de fabricación de cada uno de los bloques que compone el sistema.

Mencionamos en el capítulo 1, que la MTF es un parámetro fundamental para caracterizar la capacidad para reproducir señales de un sistema de imagen IR, como una función de su frecuencia espacial. Puede usarse para diseñar y predecir las prestaciones del sistema. También se vio cómo la función de transferencia de contraste y la respuesta al *slit* (LSF) pueden ser calculadas a partir de ella o viceversa.

A la hora de evaluar un sistema será importante el test de configuración y una base de datos de las imágenes analizadas con diferentes miras y temperaturas. Comentamos que hay dos formas de determinar la MTF, el método directo, que consiste en medir la respuesta a miras de barras o sinusoidal y el método indirecto a partir de la transformada de Fourier de la LSF.

La medida de la MTF se realizó mediante la técnica de gradiente de borde. Esta técnica permite obtener una MTF sin tener en cuenta los efectos debidos al muestreo de los detectores de la cámara. Es decir, sería la MTF de una cámara con los mismos componentes que la medida, pero donde la distancia entre los detectores del plano focal tendiese a cero (el plano focal sería análogo así al de una cámara de scanning, donde se toman una cantidad enorme de muestras en la dirección considerada en cada caso). En este caso la limitación en la frecuencia de corte vendría impuesta por el tamaño de los detectores.

3.3.1.2.1 Cálculo teórico de la MTF

Se han calculado los parámetros básicos como FOV, NFOV, F#...etc. del sistema cámara +IMSS para diez longitudes de onda consideradas entre el rango de 3.2 μm a 5 μm . Sin embargo, utilizando los datos directamente de catálogo realizaremos los cálculos para $\lambda=4 \mu\text{m}$, cuya información medida experimentalmente viene disponible en el tutorial de la lente.

- Especificaciones técnicas:

	$\lambda=3 \mu\text{m}$	$\lambda=4 \mu\text{m}$	$\lambda=5 \mu\text{m}$
<i>Focal</i>	127mm	102 mm	82 mm
<i>iFOV</i>	297 μrad	372 μrad	463 μrad
<i>FOV</i>		5.3°	
<i>F#</i>		2.5 μm	

640 muestras por línea

Tabla 3.1: Parámetros básicos

- Cálculo de la frecuencia de corte: En primer lugar se pasa el *FOV* a radianes, y posteriormente se calcula el número de muestras en el campo de visión (*FOV*).

$$NFOV_{\lambda=4\mu\text{m}} = 5.3^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 5.3 \cdot 17.5 = 92.75 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 92.8 \text{ mrad}$$

$$\frac{NFOV_{\lambda=4\mu\text{m}}}{iFOV_{\lambda=4\mu\text{m}}} = \frac{92.8 \text{ mrad}}{0.372 \text{ mrad}} = 249.33 \text{ muestras/FOV}$$

Dividiendo el número de muestras por línea de la cámara entre el valor calculado anteriormente debería obtenerse 1, ya que puesto que el *iFOV* depende del tamaño del detector que es fijo, si se aumenta la frecuencia de muestreo, la frecuencia de corte será mayor. (La frecuencia de corte en sistemas de plano focal suele venir determinada por la separación entre píxeles, que además coincide con el *iFOV*. Aquí se presentan los cálculos que propone el manual del software).

$$\frac{\text{muestras/línea}}{\text{muestras/FOV}} * iFOV = \frac{640}{249.33} * 0.372 = 2.57 * 0.372 = 0.955 \text{ mrad}$$

la frecuencia de corte de la MTF que se espera medir:

$$f_C \Big|_{\lambda=4\mu\text{m}} = \frac{1}{0.955} = 1.047 \text{ ciclos/mrad}$$

- Calculamos el valor de la frecuencia de corte de la lente:

$$Lente_c \Big|_{\lambda=4\mu m} = \frac{Focal(mm)}{\lambda(\mu m) * F\#(\mu m)} = \frac{102}{4 * 2.5} = 10.2 \text{ ciclos / mrad}$$

- Calculamos el valor de la MTF del detector:

$$Detector_{Cutoff} = \frac{1}{iFOV} = \frac{1}{0.372} = 2.68 \text{ ciclos / mrad}$$

estos parámetros nos servirán para comprobar si los resultados obtenidos son válidos.

La MTF equivalente del sistema se calcula considerando los bloques en serie que componen el mismo, con sus respectivas MTFs. Puesto que es una medida en el dominio frecuencial, la MTF del conjunto resulta como productos de las aportaciones de cada una de las funciones de transferencia correspondientes. Quedando la MTF total:

$$MTF_{total} = MTF_{lente} * MTF_{detector} \quad (3.2)$$

Deberíamos repetir de forma análoga para las demás longitudes de onda consideradas el cálculo. Se añaden en el apéndice 8.3 las tablas correspondientes con los datos calculados.

3.3.1.2.2 Configuración de la herramienta I-Site

La aplicación I-SITE se encuentra en:

- *C: \ Program Files \ Optikos Corporation \ I-SITE \ i_siteversionnueva.exe* donde hay que seleccionar el fichero de configuración de caracterización de cámaras IR: CIDA_2D_CCIR.mcf

- Focal del colimador = 2995.4 (mm)

- Para caracterizar la cámara de IR, elegimos:

Waveband: IR. (elige entre visible/IR)

Source Unit: Digital MRTD.

Target Unit: DMRTD Turret Unit.

- Rueda de miras: Se selecciona el nombre de la mira y su posición de giro dentro de la rueda, y las distancias al cuerpo negro, y a la zona. Seleccionamos el tipo de mira de forma automática (4-Bar) y las frecuencias a medir.

- En la ventana *Target Plate Editor* se muestran las miras de las que se disponen. Por ejemplo, en la categoría 4-Bars aparecen las miras T7. Es importante el parámetro *Width(mm)* calculado a partir del valor de distancia focal del colimador, que nos indica la frecuencia espacial de las miras. Esta frecuencia es fija, pero su medida variará en función de cada longitud de onda considerada, por tanto hay que modificar el ancho en cada una de las curvas⁹, conforme se desliza la lente hiperespectral.

⁹ Figura 3.18

- En la ventana *Thermal imagen test target controls* se selecciona el valor *Dem. Rad. dT (°C)* que indica la temperatura radiométrica (en valor absoluto) del cuerpo negro, el modo temperaturas permite elegir entre el modo absoluto o diferencial respecto a la rueda de miras.

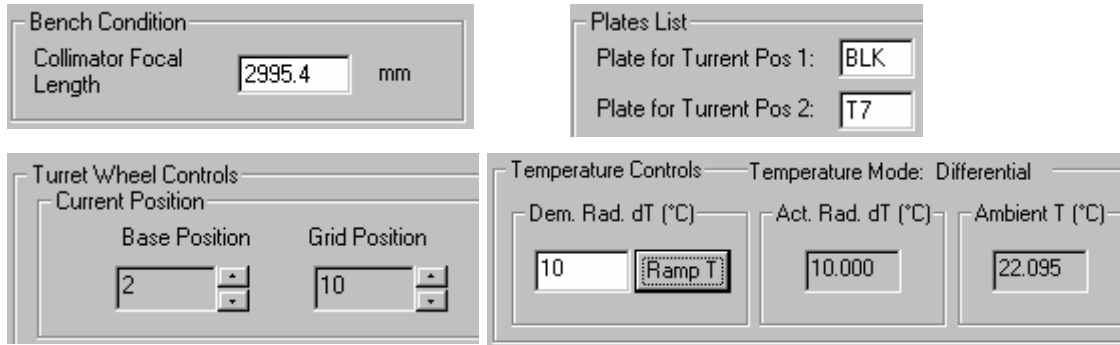


Fig. 3.16: Variables principales, fijadas para todas las λ medidas

- Cada vez que modifiquemos algunos de los parámetros de la señal de video de entrada, es recomendable realizar una calibración *Equivalent Array Length Calibracion*. Esta calibración nos relaciona cuantos bits del *frame grabber* (1024) corresponden con cuantos píxeles de la imagen. Se requiere sobremuestreado (*oversampling*), antes de hacer la calibración espacial del banco.

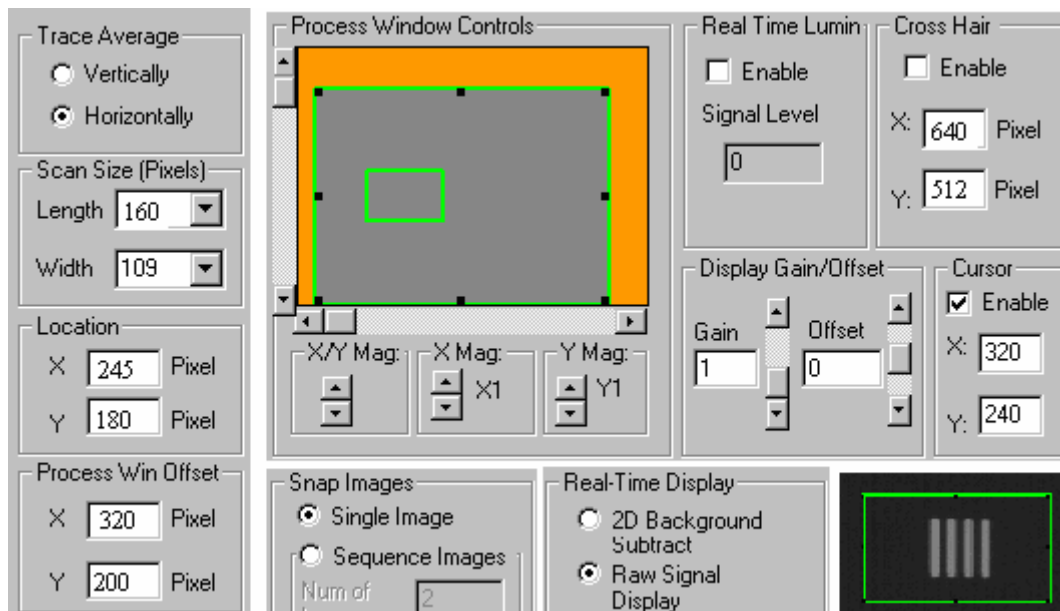


Fig. 3.17: Parámetros configurables para la calibración espacial del banco

- Para el cálculo de la MTF (*Modulation Transfer Function*) se utilizó como mira el *slit*, con la intención de generar una delta como LSF (*Line Spread Function*). (Ver margen inferior derecho en la figura 3.20). Es importante tener un enfoque muy bueno para una medida correcta (*slit* con anchura 1 píxel), y que la anchura del *slit* en mRad sea del orden de la mitad del iFOV. La cámara será configurada para máxima ganancia, aunque lo normal sería reducir la ganancia en caso de saturación. Para discernir señal en todas las longitudes de onda de 3µm. a 5µm., y poder compararlas bajo las mismas características, se tomó esta precaución.

Se requiere seleccionar una mira de 4 barras con la frecuencia espacial más grande posible. El *Bar Pitch* se corresponde con la mira seleccionada.

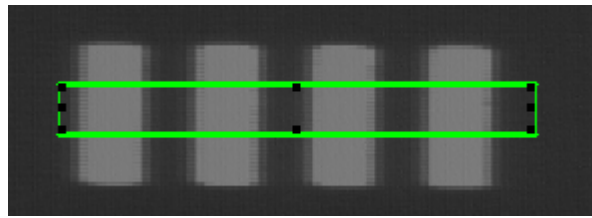


Fig. 3.18: Medida del *BarPitch*

$$Barpitch \approx \frac{new}{1024} * length * \frac{2}{7} \tag{3.3}$$

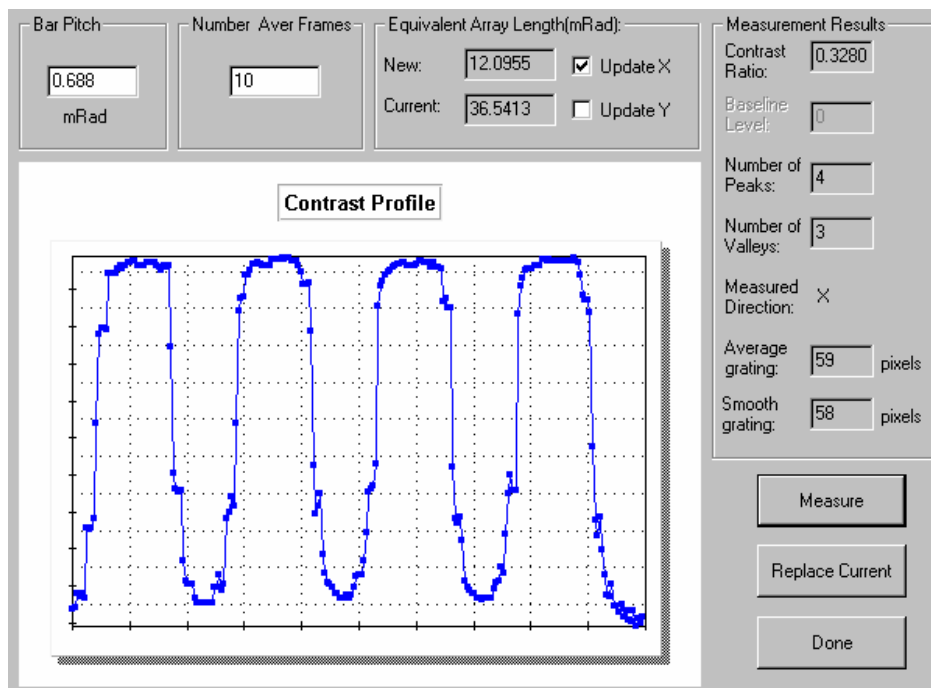


Fig. 3.19: Imagen de las 4 barras y enfoque óptimo. 5µm.

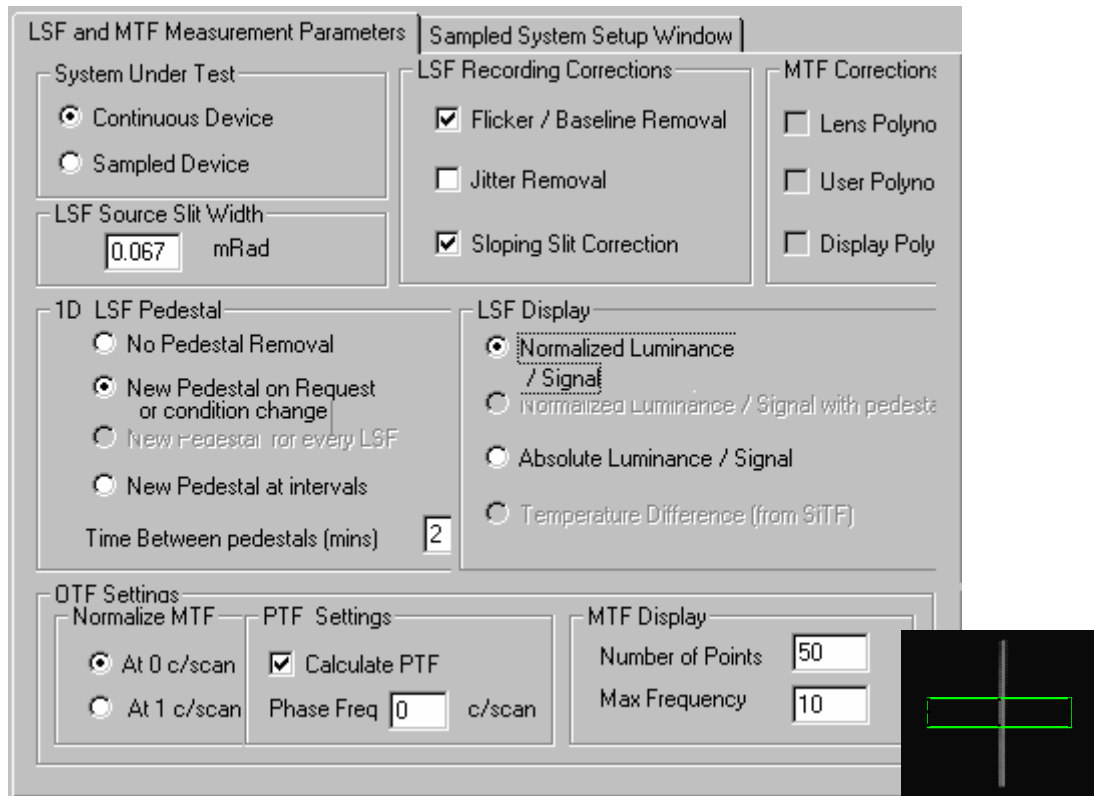


Fig. 3.20: Ventana última de configuración. Imagen del *slit*.

En *MTF Display* seleccionamos 50 puntos y la frecuencia máxima que esperamos obtener, se verá en el apartado siguiente que estos puntos son insuficientes para ver una respuesta suave de las curvas. Al tener pocos puntos en un rango demasiado amplio, la interpolación lineal entre los mismos, da una curva con saltos muy abruptos.

Point scan: la frecuencia de corte viene determinada por la anchura del detector (a , $a=b$ si el *fill factor* es de 100%). Se toma la media de la intensidad de una columna del *array* de detectores en cada posición del *slit*. La LSF se construye al final de la medida.

Full scan: la frecuencia de corte viene dada por b . El *slit* se coloca a diferentes posiciones relativas al *array* de detectores. Se graba la LSF en cada una de las posiciones por las que pasa el *slit*. La LSF final es el promedio de las medidas.

- Seleccionamos los valores de frecuencia en que queremos conocer el valor de la MTF, obteniéndolo para las frecuencias seleccionadas; tanto para temperaturas superiores como inferiores respecto de la temperatura ambiente.

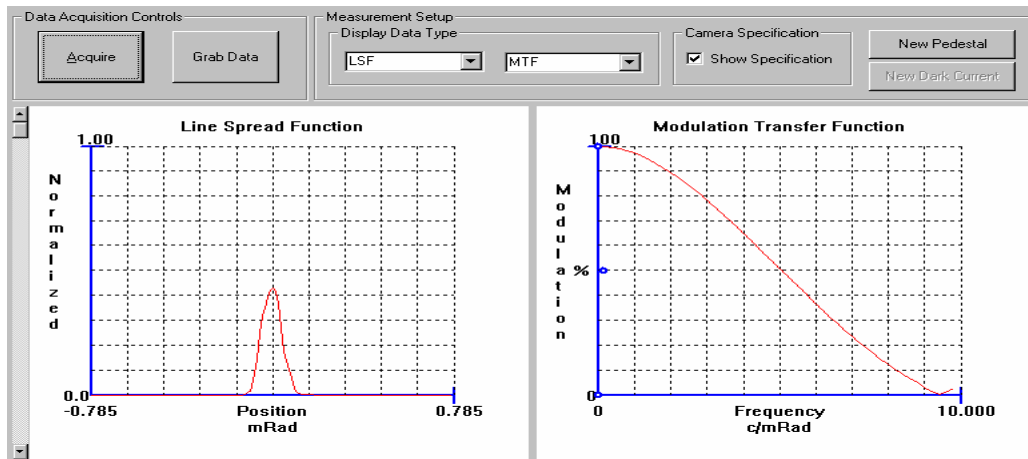


Fig. 3.21: Resultado, LSF y MTF, exportable en formato ASCII.

- En la pestaña principal de la figura 3.20, se distinguen dos métodos para calcular la MTF. Para Cámaras scanning el modo *Continuous Device* y para Cámaras staring el modo *Sampled Device*. Pese a ser nuestro sistema del tipo fijo, *staring*, se obtienen resultados más fiables con la opción correspondiente al continuo. El resultado obtenido para cámaras staring con el modo *Sampled* o *Continuous* no tiene por qué ser igual. Realizamos ambas medidas, ya que la experiencia con esta cámara ha demostrado dar un resultado más realista utilizando el cálculo en modo continuo (*scanning*). Se mostrarán ambas gráficas en los apartados sucesivos.

- Cálculo del ruido NPS¹⁰: Con la mira BLK y seleccionando una zona amplia, se obtiene el valor eficaz de ruido *RMS Noise (mV)*. Se configura eliminando el FPN (*Remove Fixed Pattern Noise*), con 0.1s por *frame* y 50 frecuencias para promediar. La frecuencia máxima que se selecciona es la obtenida al realizar la MTF, y el valor de la NETD se calcula tras la SiFT. El ruido blanco aditivo temporal introduce errores aleatorios y añade una componente continua a la MTF estimada, por ello en presencia de ruido siempre la MTF será mayor.

- Cálculo de la SiTF: se mide con el mismo valor de ganancia, utilizando una mira cuadrada en la que se pueda seleccionar el cuerpo negro, con el modo diferencial de temperatura, determinando temperatura mínima y máxima, así como el número de puntos donde calcular el nivel de señal. El resultado de la SiFT aparece en el campo *Sensitivity (mV/°C)*. A continuación se obtiene el valor de la NETD (°C) tomando el valor eficaz rms calculado en NPS.

- Cálculo del FOV. Se sitúa como mira el *slit*. Moviendo con los controles la plataforma según el eje x hasta que el *slit* se encuentra en uno de los extremos del *display*, se anota la posición del motor y se repite cambiando el sentido del movimiento hasta que el *slit* se encuentre en el otro extremo.

¹⁰ *Noise Power Spectral* – Potencia espectral de ruido.

3.3.1.2.3 MTF en campo ancho vs. campo estrecho.

La medida de la MTF con la lente Janos ensamblada a la cámara se realizó en ambos campos, ancho y estrecho, y con la IMSS para las diferentes longitudes de onda, en el modo *Step* y resolución 0.2 μm .

En la figura 3.22, incluimos las gráficas de MTF para la cámara IR, con la lente IMSS configurada en modo *Step* a una longitud de onda fija de 5 μm , y con la lente *Janos*, para dos medidas de diferente focal, correspondientes a campo ancho y campo estrecho.

Se configuró el sistema de forma análoga con el cálculo de SiFT, considerando en esta ocasión el enfoque a 5 μm con tres parejas de valores de brillo y contraste: (B=-27.73,C=74.76), (B=-26.24,C=44.4), y (B=-26.95,C=53.4).

En la gráfica se muestran los valores de las medidas exteriores.

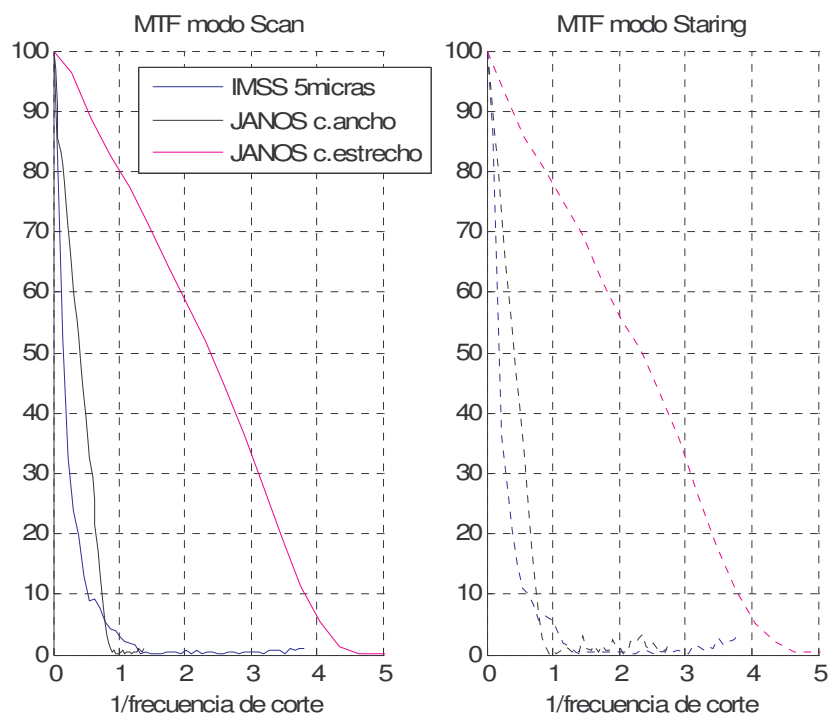


Fig. 3.22: Valor de la MTF para el varios campos *Janos* y 5 μm la IMSS.

La figura muestra las dos opciones de cálculo de MTF según el tipo de cámara IR, no apreciándose una diferencia considerable entre un tipo u otro. Por otra parte, la focal sí tiene repercusión directa en esta medida.

La frecuencia a la que la MTF tiene una máxima diferencia con la fase, es la frecuencia de *Nyquist* asociada al proceso de muestreo.

posición foco campo ancho <i>Janos</i> :	666
posición foco campo estrecho <i>Janos</i> :	355
Frec. Nyquist (ciclos/mrad) :	1.047 ciclos/mrad.

Tabla 3.2: Valores de la frecuencia de *Nyquist*

La MTF con la IMSS a 5 μm . alcanza valores entorno a 0.9 ciclos/mrad. Teniendo una frecuencia de *Nyquist* teórica, en esa dirección de 1.047 ciclos/mrad, podríamos observar efectos debidos al muestreo a partir de $1.047 - (0.9 \cdot 1.047)$ ciclos/mrad, esto es, 1.194 ciclos/mrad.

Generalmente se acepta que para que los efectos del muestreo, aliasing, sean importantes en la calidad de imagen, la MTF a la frecuencia de *Nyquist* debe ser mayor de 0.1. Que suele ser el criterio práctico basándose en la no idealidad de la pendiente de cualquier filtro de reconstrucción.

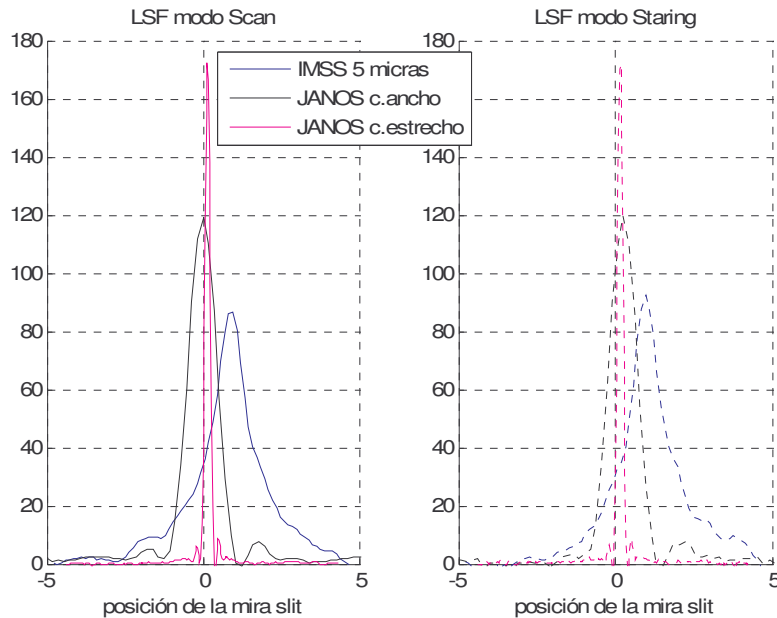


Fig. 3.23: Curvas de LSF, la curva centrada corresponde con el *BarPitch* seleccionado, enfoque actual con campo estrecho.

3.3.1.2.4 MTF para las diferentes longitudes de onda.

La calidad de la imagen que nos proporciona el sistema, está directamente relacionada con la capacidad del mismo para obtener un buen enfoque. La medida de la MTF tanto para la cámara como para el conjunto cámara y lente, nos permite estimar la bondad de los resultados. El problema del enfoque, es que está relacionado con muchos parámetros y limitado a su vez, por los mismos. Variables como la sensibilidad de los detectores, ruido del sistema, resolución, entorno, tamaño del blanco...etc. condicionan la captura y los resultados.

Se considera un buen enfoque, cuando se pueden apreciar claramente contornos bien definidos, cuando se obtiene la salida máxima de señal ante una entrada dada o cuando el sistema puede resolver altas frecuencias espaciales.

La propia naturaleza de los sistemas infrarrojos, y su electrónica de amplificación y ruido, hacen del equipo de medida un sistema no lineal, lo que muchas veces deja a criterio subjetivo del observador el decidir el enfoque óptimo de las imágenes. Comentamos en el capítulo 2, al describir la lente, que la óptica está optimizada para frecuencias entorno a $\lambda=4.2 \mu\text{m}$. El software se encarga de compensar los efectos que provoca la variación de la posición de la lente, siendo el enfoque un parámetro tan subjetivo como el criterio de elección de los parámetros brillo y contraste seleccionados en el proceso.

Los resultados se muestran en las siguientes figuras.

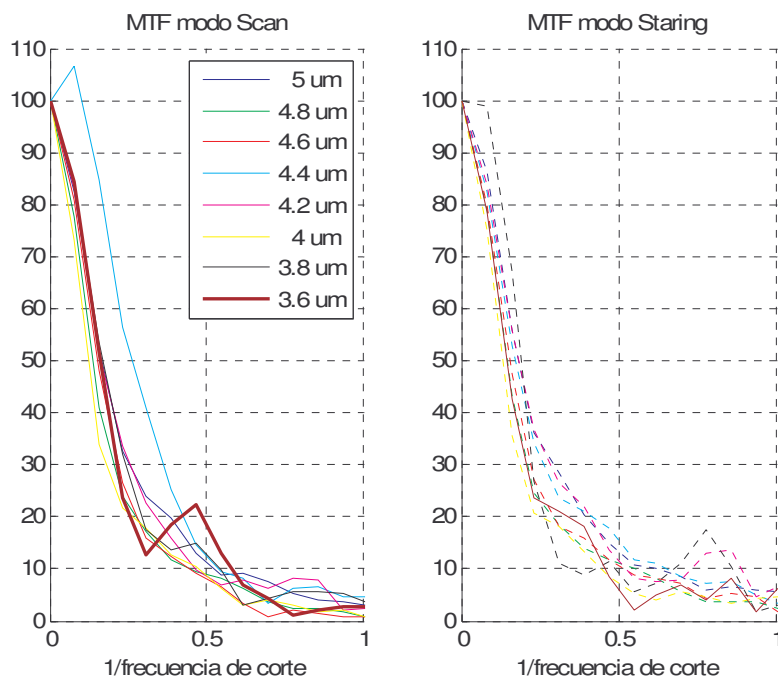


Fig. 3.24: MTF del sistema IMSS, para algunas longitudes de onda.

Para este sistema, se verifica la medida en modo Staring como la más adecuada y que refleja la realidad del mismo, pese a haber comentado al presentar la herramienta que con cámaras anteriores también fijas, se había observado todo lo contrario.

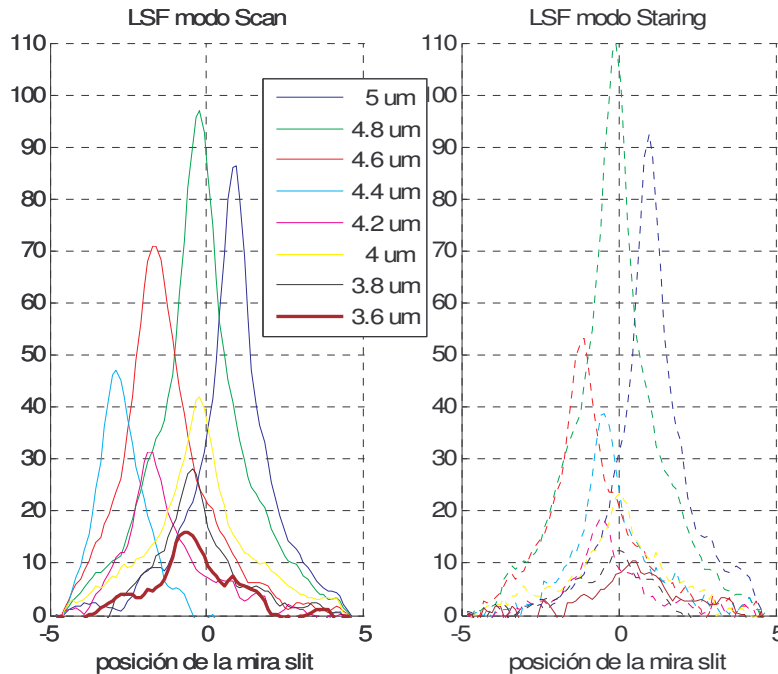


Fig. 3.25: LSF para el rango de longitudes de onda de la IMSS.

La localización de la mira en los cálculos de la LSF (conforme se observa en la figura 3.25), resultó confusa al no aparecer un orden lógico en cuanto a las posiciones relativas de las distintas longitudes de onda. En las anteriores medidas, de intensidad, magnificación, o SiFT aparecían de forma secuencial una gradación entre los valores.

Al igual que en las medidas de ruido, por la propia construcción del sistema cabía esperar una respuesta optimizada entorno a $4.2\mu\text{m}$; para la MTF esperábamos unas LSFs cuya relación con la longitud de onda, siguiese una lógica, acorde con su MTF, tanto para la posición en el slit como el nivel en cada longitud de onda. Es por ello que se repitieron los cálculos con otro programa implementado en *Labview* y que describiremos en el siguiente apartado.

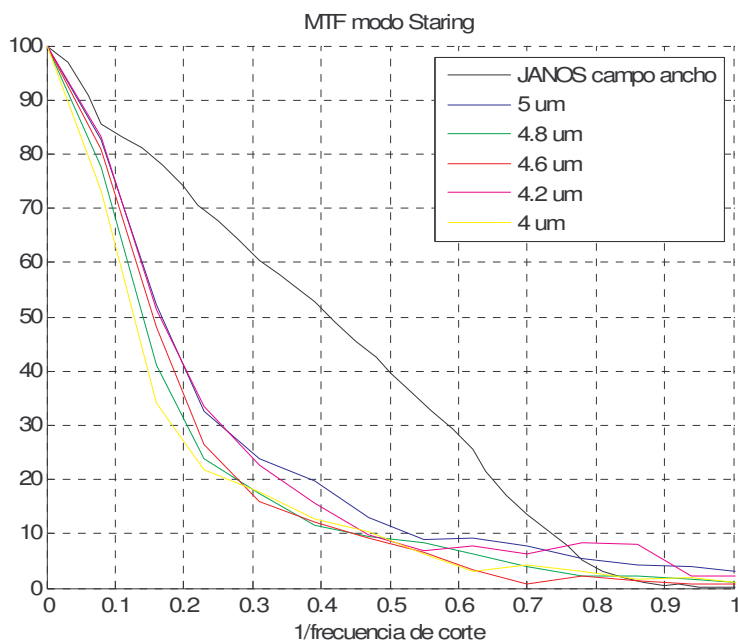


Fig. 3.26: Curvas de MTF obtenidas con el banco_II y la herramienta I-site

Las curvas seleccionadas en 5 longitudes de onda con la IMSS y la lente *Janos* de campo ancho se muestran en la figura 3.26. Se observa mayor MTF para $5\mu\text{m}$. y en $4.2\mu\text{m}$., mientras que cae en $4.8\mu\text{m}$. por debajo de la de $4.6\mu\text{m}$.. Lo que en un principio no era lo esperado, contrastado con la percepción visual de la escena, al variar las longitudes de onda, queda verificado, siendo apreciable a simple vista este efecto de desenfoque.

3.3.1.2.5 MTF a partir del algoritmo de Fermi

El problema de esta medida es su dependencia con el enfoque, ya que es difícil asegurar un enfoque óptimo en todas las longitudes de onda consideradas, además de la necesidad de comparar la respuesta del sistema entre ellas, que implica dejar determinados parámetros fijos.

Recurrimos a este método tras no poder explicar qué estaba pasando con las medidas de LSF y su relación con cada longitud de onda. En el apartado 3.6.1, correspondiente a la conclusión se hará una valoración de ésta medida y como se consigue justificar finalmente los resultados.

Seguidamente presentamos las graficas obtenidas para MTF:

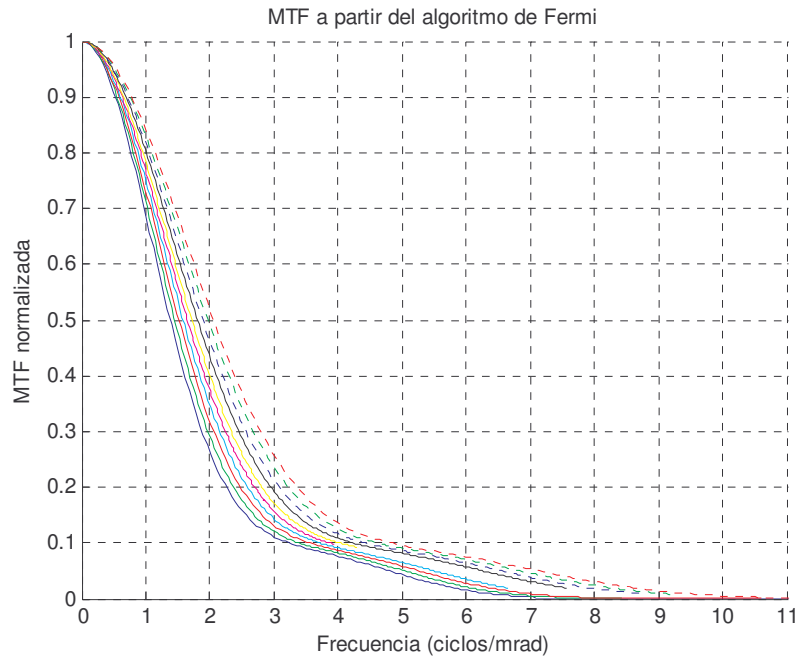


Fig. 3.27: Curvas de MTF obtenidas con el algoritmo de Fermi

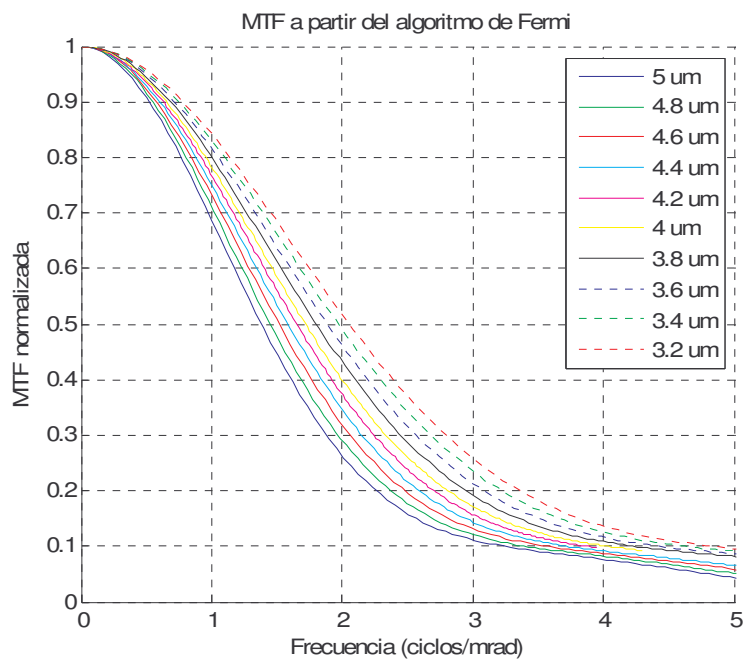


Fig. 3.28: Curvas de MTF obtenidas con el algoritmo de Fermi

En esta ocasión a pesar de tener las curvas un aspecto más atractivo, sin embargo no se corresponden con la realidad de la medida, apareciendo curvas de mayor nivel a menores longitudes de onda. Volveremos sobre este hecho al extraer las conclusiones generales para contrastar los cálculos y justificar el resultado adecuado a nuestro sistema.

3.3.1.3 MRTD, MDTD

Existe una clasificación común para los sistemas de infrarrojos que los divide en sistemas de imágenes y sistemas de visión artificial. Mientras que los sistemas de visión artificial son sistemas asistidos por el *hardware* y *software* diseñados para detectar objetivos, empleando algoritmos de reconocimiento automático de formas; los sistemas de imágenes tienen a un observador como intérprete de la imagen obtenida. Es por eso que esta medida tiene gran relevancia en objetivos y aplicaciones militares principalmente, ya que debe ser capaz el observador de distinguir los blancos, por su propia seguridad.

Cuando la cámara y la lente tienen una MTF mayor que la teórica, las medidas de MRTD y MDTD cumplen ampliamente con las especificaciones necesarias. La repetición metódica de estas medidas en cada longitud de onda no aportaría mayor información que se ha extraído de la MTF dadas las respuestas obtenidas para nuestra aplicación. La MRTD combina ruido y MTF, y es importante en medidas de Detección, Identificación y Reconocimiento.

Se pensó añadir la medida centrando el estudio en $4.2\mu\text{m}$. pero como nuestra aplicación no requiere del reconocimiento ni identificación no hemos incluido estas curvas en la caracterización del sistema, si bien matizamos que suelen ser indispensables pese a su subjetividad en la medida.

En cuanto a las condiciones de la cámara para la prueba, los niveles de brillo y contraste fueron fijados como aquellos cómodos para el observador, limitados principalmente por el monitor que presentaba menor resolución que la ventana del *display* del *software*.

3.3.2 Respuesta del sistema frente al ruido

Se determinó la respuesta del sistema IMSS tanto en longitudes de onda como en energía. El análisis de ruido entra dentro de esta última opción. Para ello una vez acoplado el sistema IMSS a la cámara de IR dividimos el rango espectral de 3 a 5 micras en un número de bandas hiperespectrales predeterminadas.

Se han realizado medidas del ruido de la cámara + la IMSS, y con la lente *Janos* en ambos campos (ancho y estrecho). Para determinar la respuesta en energía se trabajó con el cuerpo negro de 4 pulgadas a diferentes temperaturas. Además posteriormente se ha realizado un estudio más amplio de algunas características del ruido a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, y con diferentes miras.

Se ha prestado principal interés en la medida de NETD, definida como la desviación estándar de la dispersión de temperatura de salida, causada por el ruido del sistema, esta medida puede ser considerada como una buena estimación de las incertidumbres debidas al ruido intrínseco del conjunto cámara + lente hiperespectral.

3.3.2.1 NETD

En el capítulo 1 se describió el parámetro de NETD denominado “sensibilidad térmica”, “resolución térmica” que proporciona información sobre la influencia del ruido en los canales eléctricos, como una diferencia de temperatura de ruido equivalente.

$$NETD = V_n \cdot SiFT \tag{3.3}$$

Se enumeran seguidamente los pasos llevados a cabo en la medida de la misma. En el apéndice se incluyen otros resultados previos de las incertidumbres y el procedimiento de medida, además de los cálculos modificando los parámetros de la cámara como tiempo de integración, brillo, contraste... hasta obtener los resultados óptimos. Las medidas aquí representadas se corresponden con las exteriores.

- Configuración de la cámara IR Phoenix: Como se ha comentado ya en apartados anteriores, tras estabilizarse se fijan los valores de brillo y contraste de acuerdo con las medidas exteriores. Brillo= -25.07% y Contraste= 27.42; y se desactiva el control automático de ganancia.

- Configuración de la lente IMSS: Realizamos esta medida en modo *capture= Step*, considerando 10 longitudes de onda y centro de magnificación $x_c=242$, $y_c=320$.

- Para cada curva se seleccionó la misma ROI. Variándose la temperatura denominada fría: 20°C, 25°C, 30°C y 40°C, y para cada banda hiperespectral correspondiente a 0.2 μm de anchura. Se suele medir solo para unos valores fijos de temperatura e interpolar dentro de un rango. Para cada una de las temperaturas seleccionadas y en cada longitud de onda, se tomaron 10 fotogramas, considerando una variación de 1° entre el fondo y el blanco. Se calculan: la señal media en unidades digitales de fondo y blanco; la caliente y la fría respectivamente; y su desviación típica σ , para cada fotograma, y se obtienen los estadísticos de la medida.

Varianza:
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sigma_k \tag{3.4}$$

Covarianza:
$$\sigma_{\sigma}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\sigma_k - \bar{\sigma})^2 \tag{3.5}$$

- Sobre las medidas se aplica el criterio de rechazo de *Chauvenet*, para comprobar que los valores obtenidos son válidos. ($R=1,95996$ para 10 medidas). Se comprueba que $|\sigma_i - \langle \sigma \rangle| < R \cdot \sigma_{\sigma}$, para todos los datos medidos. Si un valor no cumple la condición, se excluye y se vuelven a calcular los valores de $\sigma_{fría}$ con $K=9$ y $R=1,80274$. Si después algún valor sigue sin cumplir el criterio se repite la medida.

Para cada fotograma:

$$|\sigma_i - \langle \sigma \rangle| \longrightarrow R \cdot \sigma_{\sigma} \longrightarrow |\sigma_i - \langle \sigma \rangle| < R \cdot \sigma_{\sigma} \tag{3.6}$$

- Una de las consideraciones para la medición fue mantener la ROI¹¹, pese a la dependencia de la magnificación con la longitud de onda. Se seleccionó la misma Región de interés para todas las medidas, tomando un numero de pixel horizontal de 134 y vertical de 130. El número total de detectores digitalizados M será:

$$M = C \times F = 17420$$

- A continuación se calcula el incremento de temperatura efectiva y la estimación del valor de la NETD. Los cálculos de incertidumbre y su procedimiento se incluyen en el apéndice 8.1.

$$\Delta T_{efectiva} \longrightarrow NETD = \frac{\overline{\sigma}_{fria} \cdot \Delta T_{efectiva}}{V_{cal} - V_{fria}} \quad (3.7)$$

- De los ficheros generados para cada temperatura, y cada longitud de onda considerada, extraemos los valores absolutos de NETD, y las ecuaciones consideradas para el cálculo.

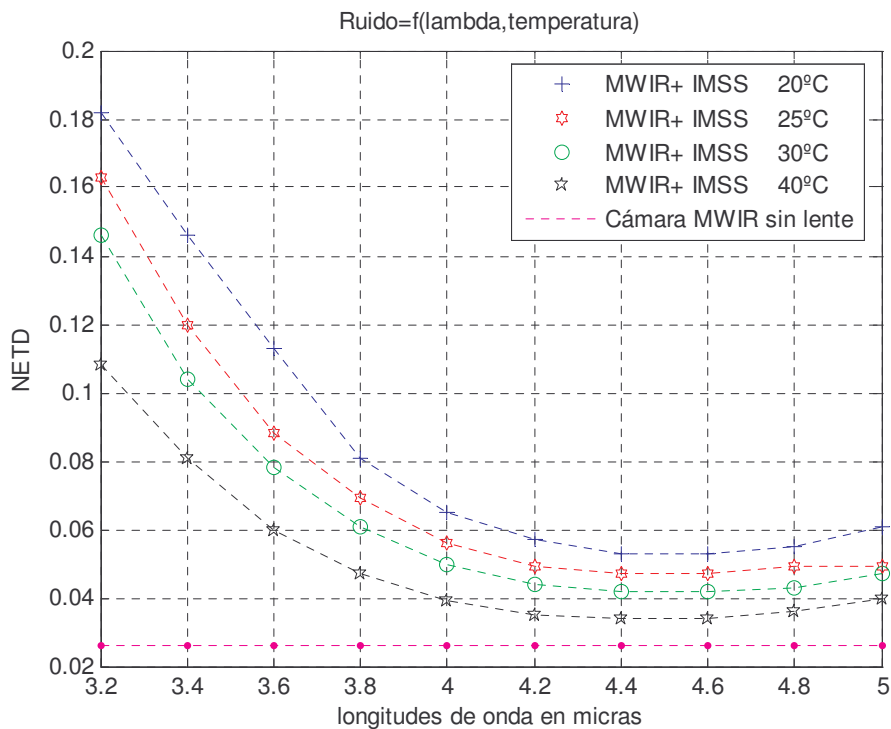


Fig. 3.29: NETD con Brillo= -25.07% y Contraste= 27.42

De la gráfica se desprende un menor ruido en las longitudes de onda de 4.4μm y 4.6μm. El ruido para longitudes de onda por debajo de las 4 μm a 5 μm es más elevado, resultando casi constante en el rango de 4 μm a 5 μm. Debemos recordar sin embargo que la NETD es función del número de fotones que le llegan a los detectores y por tanto dependerá también de la temperatura del objeto. Observamos también cómo éste disminuye conforme aumentamos la temperatura, aproximándose al ruido de la cámara MWIR + la lente Janos.

¹¹ Región de interés

3.3.2.2 FPN

En principio, el problema fundamental es que cada detector es diferente. Tiene su propio amplificador, y cada par detector/ amplificador tiene a su vez una diferente ganancia y nivel de *offset*. Estas variaciones entre detectores dan lugar al denominado ruido fijo o FPN¹².

Con un nivel de contraste=27.42, y variándolo para no saturar en cada caso, se han analizado fotogramas a incrementos de 1 ° C. con la cámara en configuración cuerpo negro + cámara IR, y en configuración cuerpo negro + colimador + lente IMSS; haciendo un análisis del ruido temporal y espacial, de baja y alta frecuencia y el ruido tridimensional. El programa IRvista.exe, proporciona tanto la imagen del ruido como su descomposición espectral.

Los efectos de muestreo no son los únicos que van a poder verse sobre la pantalla del monitor. En principio, los valores de resolución del monitor no tienen nada que ver con el ruido de la cámara. Sin embargo, cuando el ruido no es completamente blanco y aleatorio espacialmente, puede exhibir cierta estructura en frecuencias. Esta estructura espacial aparece superpuesta a la verdadera modulación que introducen los factores resolutivos de la cámara, empeorando la calidad de imagen.

3.4 Calibrado del sistema

3.4.1 Caracterización de la variación del tamaño del objeto en función de la banda seleccionada. Corrección de la magnificación.

Dado que el sistema cambia la distancia focal para cada longitud de onda seleccionada, es necesario caracterizar la dependencia del tamaño del blanco que vemos en la cámara en función de la longitud de onda y correlarlo con el tamaño real del blanco. Para ello se utilizará el mismo sistema experimental que en el apartado anterior, pero colocando entre el cuerpo negro y el espejo del colimador una mira de tamaño conocido.

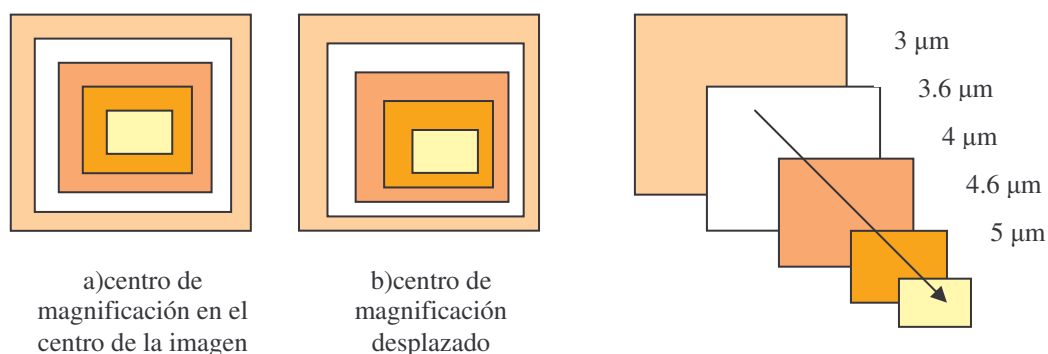


Fig. 3.30: Diagrama de los diferentes dimensionados con la longitud de onda.

¹² Fixed Pattern Noise

3.4.2 Definición del Centro de Magnificación

Definimos el concepto de centro de magnificación, a través de un diagrama de rayos que correspondería a una lente simple; en nuestro caso válido ya que la lente IMSS, describimos que se comportaba como tal.

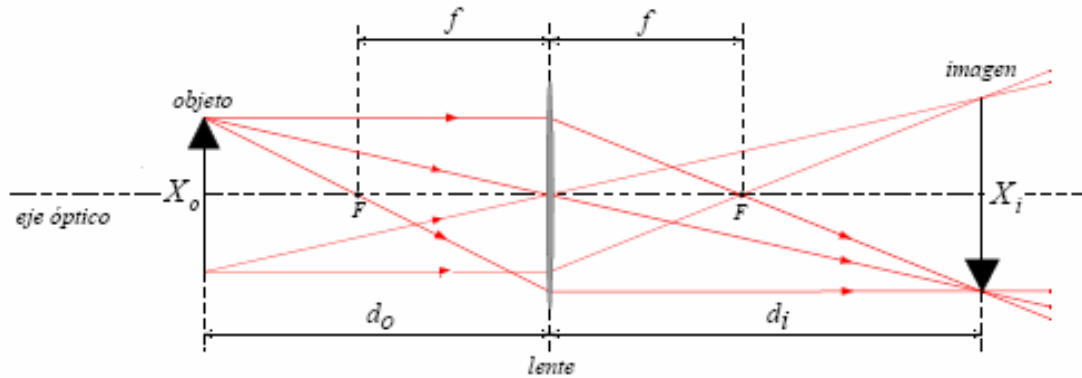


Fig. 3.31: Diagrama de rayos de la lente simple

En el centro de magnificación del sistema, la relación entre la magnificación debe ser igual al cociente entre los tamaños del objeto y su imagen.

$$M = \frac{d_i}{d_o} = \frac{X_i}{X_o} \tag{3.8}$$

Para determinar el centro de magnificación, se buscó el punto de radiación máxima para cada longitud de onda, de forma que se pudiese corregir el desplazamiento de la imagen a la vez que se corrige su variación de tamaño. Tras estimar este centro para la cámara concreta que utiliza el sistema en este proyecto, la Phoenix de Indigo; se modificó el fichero de calibración con los nuevos valores de centro de magnificación y parámetros correspondientes a la cámara, con el fin de que el programa HypatII, de procesado de la lente; los considerara en su tratamiento de las imágenes.

Al obtener el píxel de máxima intensidad para el rango de longitudes de onda de 3µm a 5 µm, con la configuración del cuerpo negro directamente enfrenteado al sistema, representamos los ejes vertical y horizontal, correspondientes a la matriz FPA. Se comprueba cómo este centro se va desplazando con diferentes curvas en cada uno de los ejes vertical y el horizontal, y que corregiremos por software. Ampliaremos este punto en el apartado 3.4.5, tras haber introducido el concepto de medición de anchuras a partir de miras de calibrado.

$\lambda(\mu\text{m})$	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
y	338	334	331	323	321	323	323	323	316	310
x	319	313	313	318	324	318	318	324	335	318
I _{x,y}	1.087	1.221	1.316	1.391	1.445	1.544	1.645	1.7564	1.8395	1.9021

Tabla 3.3: Valores de los máximos de intensidad y píxel correspondiente.

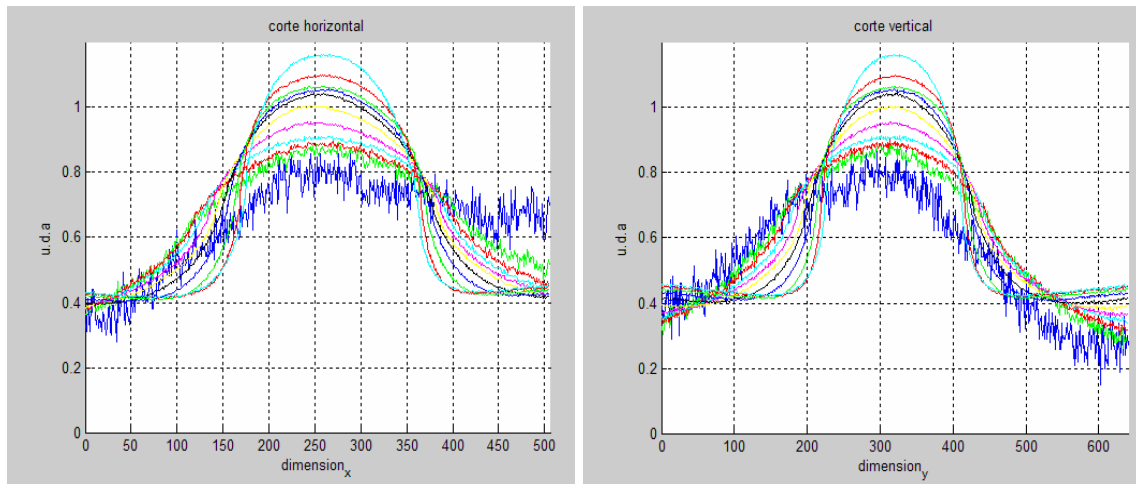


Fig. 3.32: Cortes transversales al máximo de radiación.

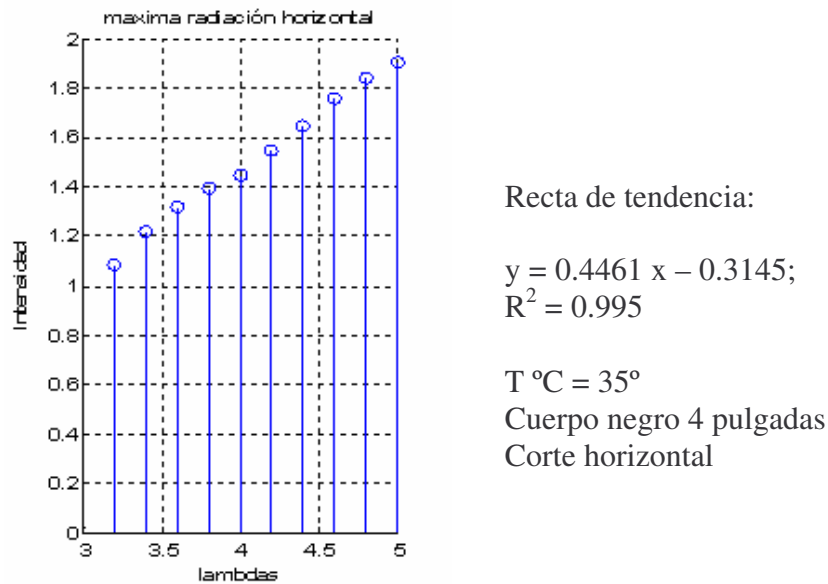


Fig. 3.33: Intensidad máxima variable con la longitud de onda.

Un primer intento de comprender los diferentes niveles del sistema en el eje horizontal, fue pensar que la lente tenía un comportamiento completamente distinto en las dos dimensiones, hecho que posteriormente quedó constatado al caracterizar la respuesta de la lente IMSS en longitud de onda y energía. Cabe pensar, que el software considera correcciones particularizadas para las longitudes de onda y la posición de píxel. Se procedió a buscar el centro a la vez que se estimaba la magnificación en cada dimensión espacial.

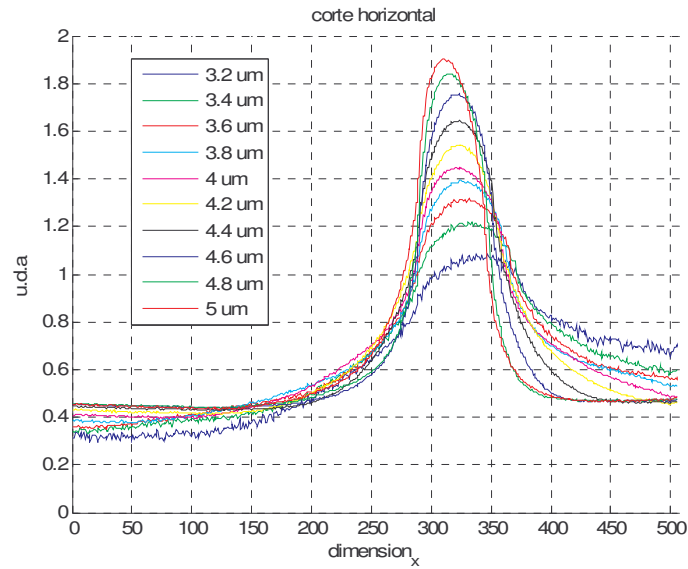


Fig. 3.34: Corte horizontal. Desplazamiento del máximo sobre imagen girada.

3.4.3 Corrección de la Magnificación espectral a partir de miras

Para calcular la magnificación así como el desplazamiento del máximo en la matriz de detectores, se utilizaron dos miras sobre el cuerpo negro en la configuración cámara + lente IMSS + colimador + cuerpo negro; con el banco_I de pruebas.

La figura siguiente ilustra los diferentes tamaños con los que se visualiza la mira con enfoque óptimo para cada longitud de onda. Se utilizaron varias temperaturas del cuerpo negro con el fin de obtener una curva de desplazamiento a diferentes niveles de intensidad.

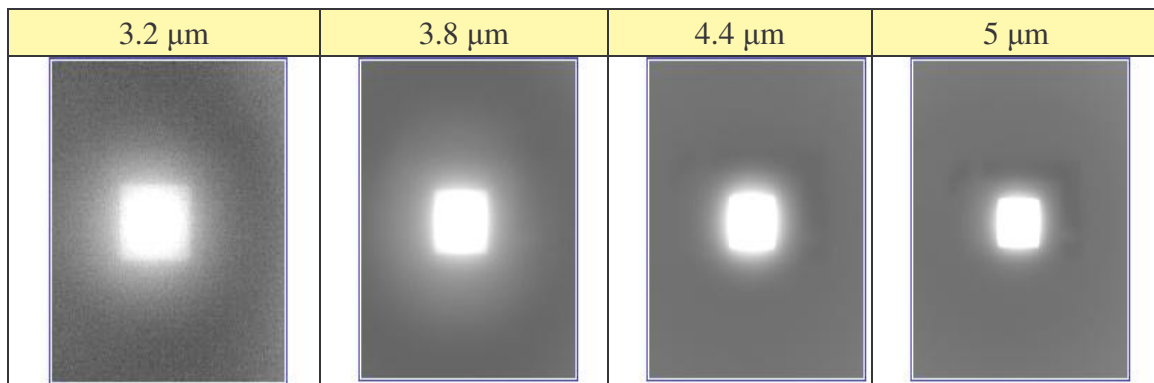


Fig. 3.35: Imágenes infrarrojas, mira cuadrada.

3.4.3.1 Determinación del escalado y desplazamiento del centro de magnificación con la longitud de onda.

Se incluyen los resultados de varias miras con diferentes dimensiones, temperaturas y distintos cuerpos negros. Para poder trabajar con todos los datos, se ha optado por utilizar valores normalizados sobre una longitud de onda; y sobre éstos calcular porcentajes sobre el máximo de señal.

3.4.3.1.1 Mira rectangular, cuerpo negro 4 pulgadas

En este apartado representaremos algunas de las curvas de diversas combinaciones de parámetros, donde se calcularon los máximos, la normalización y la medida al 50% y 80% de los mismos para determinar el número de píxeles que ocupaban en 4 subbandas hiperespectrales y su relación con las dimensiones reales de la mira, con el fin de obtener una relación directa con la magnificación del sistema.

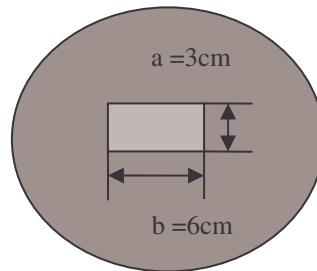


Fig. 3.36: Dimensiones de la mira rectangular y orientación en la imagen final

Al observar que al variar la temperatura podía tener respuesta diferente, repetimos las medidas para distintas temperaturas del cuerpo negro. El siguiente apartado incluye todos los datos de anchuras de la mira, para el cuerpo negro de 2 pulgadas, donde se buscaba ver si el aumento era constante en las dos dimensiones sin necesidad de corregir la dependencia con el tamaño de la apertura.

BB4 T40° C máximos

$\lambda(\mu\text{m})$	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
Píxel x	498	338	357	325	326	317	326	321	316	312
Píxel y	614	320	320	315	320	320	320	324	320	322
nivel	0.957	1.087	1.091	1.276	1.383	1.443	1.543	1.642	1.728	1.8284

Tabla 3.4 : Valores de la pareja de píxeles con el máximo y nivel de intensidad

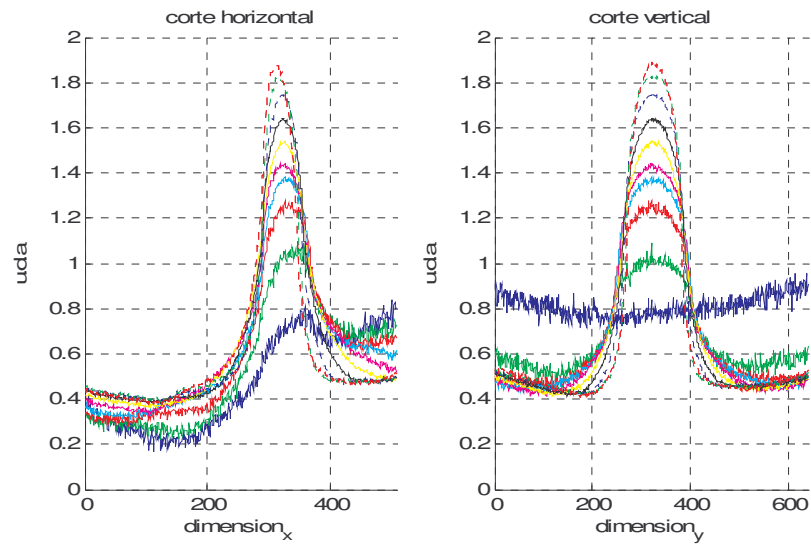


Fig. 3.37: Cuerpo negro 4 pulgadas, 40 °C.

BB4 T50°C

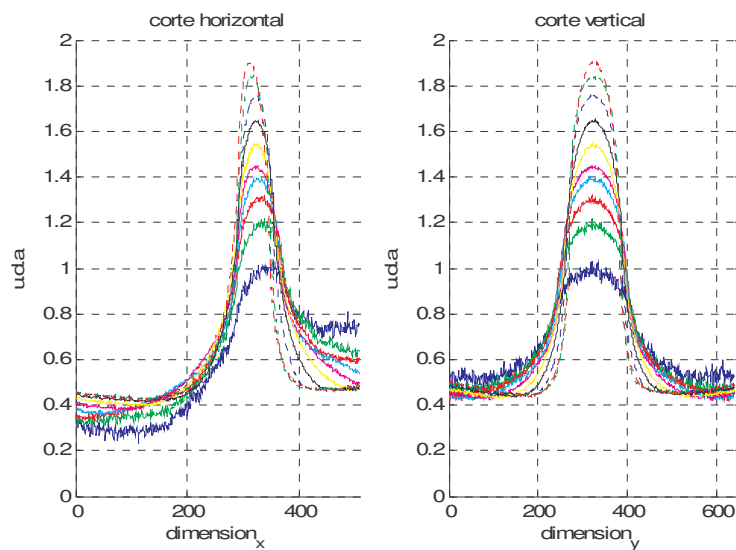


Fig. 3.38: Cuerpo negro 4 pulgadas, 50 °C.

$\lambda(\mu\text{m})$	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
Pixel x	352	337	320	324	324	326	321	324	317	309
Pixel y	320	320	320	317	317	320	327	317	320	328
nivel	1.033	1.217	1.318	1.395	1.448	1.544	1.645	1.756	1.845	1.901

Tabla 3.5: Valores de la pareja de píxeles con el máximo y nivel de intensidad

BB4 T60°

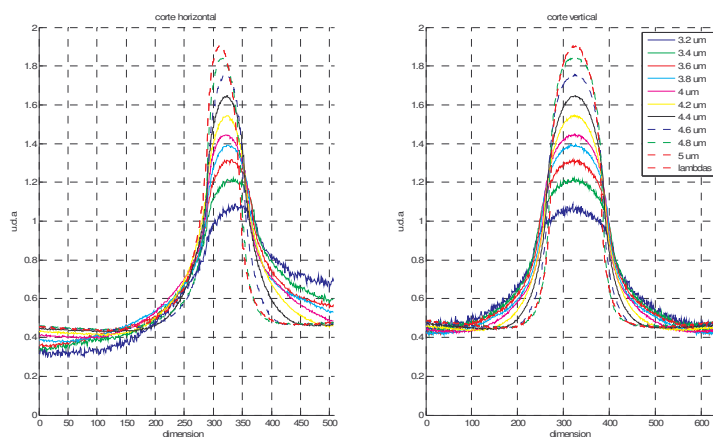


Fig. 3.39: Cuerpo negro 4 pulgadas, 60 ° C.

$\lambda(\mu\text{m})$	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
pixelx	338	334	331	323	321	323	323	323	316	310
pixely	320	323	320	327	325	323	320	320	321	327
Nivel	1.0874	1.223	1.3167	1.3951	1.4478	1.5454	1.6455	1.7564	1.8432	1.9033

Tabla 3.6: Valores máximo y nivel de intensidad, 60 ° C.

A grosso modo, con esta medida se corroboró lo que a simple vista se observaba en el monitor, al capturar la colección de imágenes hiperespectrales. En primer lugar, la intensidad es mayor en longitudes de onda mayores. Este efecto está directamente relacionado con el propio comportamiento del cuerpo negro que emite mayor radiación a longitudes de onda más altas, a las temperaturas que estamos trabajando. Depende de la temperatura del cuerpo negro y de la longitud de onda considerada, al aumentar el número de fotones, aumenta por tanto la salida del detector, al menos en este rango de $3\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$ (figura 3.3). Por otro lado, del cálculo de la anchura de la mira se desprende, en términos de píxeles de la matriz de detectores, que para longitudes de onda menores, es mayor el tamaño. Este hecho también tiene una explicación física derivada de la relación entre el aumento de la magnificación óptica respecto al tamaño de la longitud focal.

Sobre la imagen en infrarrojo, se midieron los bordes de la mira, variando en cada caso brillo y contraste para distinguirlos sobre el fondo de forma óptima.

$\lambda(\mu\text{m})$	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
anchura_h	611.29	491.93	295.16	214.51	175.80	156.45	137.09	125.95	114.51
anchura_v	293.54	214.51	183.87	162.90	148.38	135.48	122.58	116.12	109.67

Tabla 3.7: Píxeles que ocupa la abertura en la imagen IR.

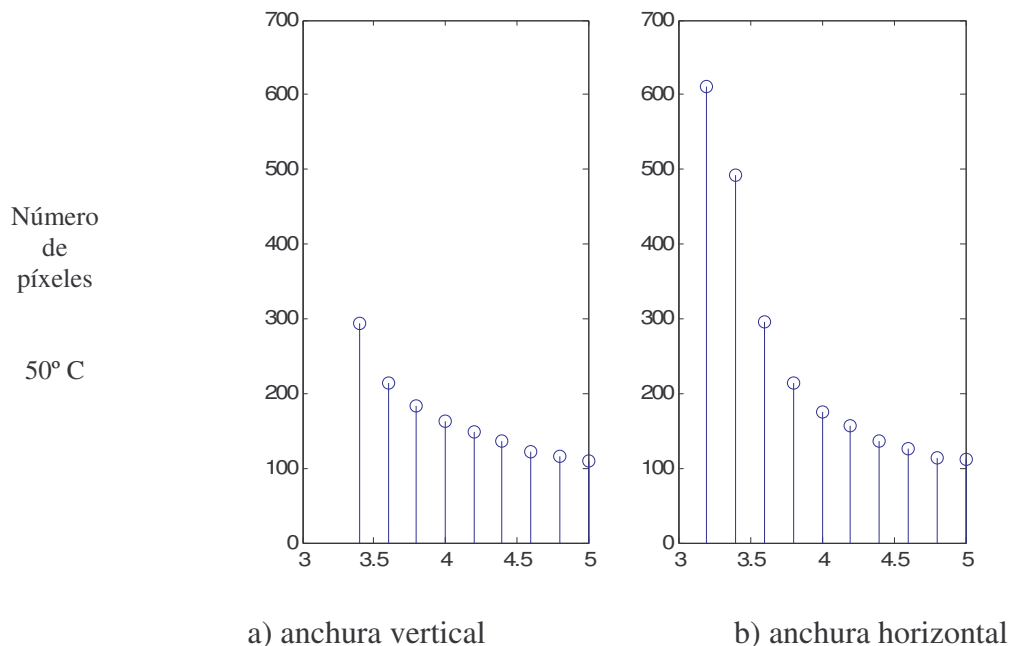


Fig. 3.40: anchuras medidas sobre los bordes de la mira, en IR.

Para longitudes de onda superiores a $3.8\mu\text{m}$ resultaba fácil visualmente determinar los bordes de la abertura, sin embargo en la parte baja del rango, la medida resultó ser realmente arbitraria.

Por ello se implementó una forma de poder comparar el efecto de la magnificación en todas las longitudes de onda.

La rutina que se ha programado, **anchuras.m**, da como salida las gráficas correspondientes a las figuras 3.37, 3.38 y 3.39 y sus valores de intensidad y la pareja de píxeles asociada, además permite eliminar el pedestal de cada curva y sobre el porcentaje deseado del máximo, medir la distancia en píxeles entre los puntos de igual intensidad.

Tras aplicar la función a varias combinaciones de temperaturas del cuerpo negro, y con diversas modificaciones respectivas entre el brillo y el contraste, se ha escogido la temperatura de 50°C ya que se distingue perfectamente el cuerpo negro, con la pareja de valores de brillo y contraste con la que se realizaron las medidas exteriores.

Obtuvimos las curvas de intensidad y anchuras, con porcentajes sobre el cuerpo negro de 4 pulgadas, y con la mira rectangular de 3 cm x 6 cm.

La siguiente tabla contiene todos los vectores de datos que se obtienen como parámetros de salida de la función **calcula_anchuras.m**, habiendo introducido como parámetros de entrada: el fichero *.bin con la colección de imágenes hiperespectrales, el valor $BB=4$, (*Black body*), $T=50^\circ$, y $\text{porcen}=0.5$, $\text{porcen1}=0.8$; así como cada pedestal marcado sobre la curva correspondiente a cada longitud de onda.

λ	Máx	Máximo vertical sin pedestal	Máximo horizontal sin pedestal	Anchura vertical 80%	Anchura vertical 50%	Anchura horizontal 80%	Anchura horizontal 50%
3.2	0.9929	0.4656	0.2575	133.8710	180.6452	56.4516	83.8710
3.4	1.1869	0.7019	0.5150	130.6452	169.3548	62.9032	87.0968
3.6	1.2998	0.8360	0.6843	122.5806	158.0645	62.9032	83.8710
3.8	1.3915	0.9630	0.8007	120.9677	153.2259	58.0645	80.6452
4	1.4444	1.0053	0.8818	116.1290	143.5484	59.6774	77.4194
4.2	1.5326	1.0935	1.0194	101.6129	138.7097	53.2258	80.6452
4.4	1.6455	1.1958	1.1746	100.0000	127.4194	53.2258	72.5806
4.6	1.7513	1.2981	1.2804	96.7742	120.9677	47.9839	64.5161
4.8	1.8395	1.3862	1.3686	91.9355	114.5161	43.7500	61.2903
5	1.9030	1.4497	1.4321	83.8710	109.6774	40.9274	59.6774

Tabla 3.8: Parámetros de salida sobre el fichero BB4T50.bin

Representando los valores obtenidos tanto en la vertical como en la horizontal con criterio del 50% y 80%; podemos caracterizar el comportamiento de la magnificación mediante una recta de pendiente descendente y ordenada en parte dependiente de la temperatura/ radiación del cuerpo.

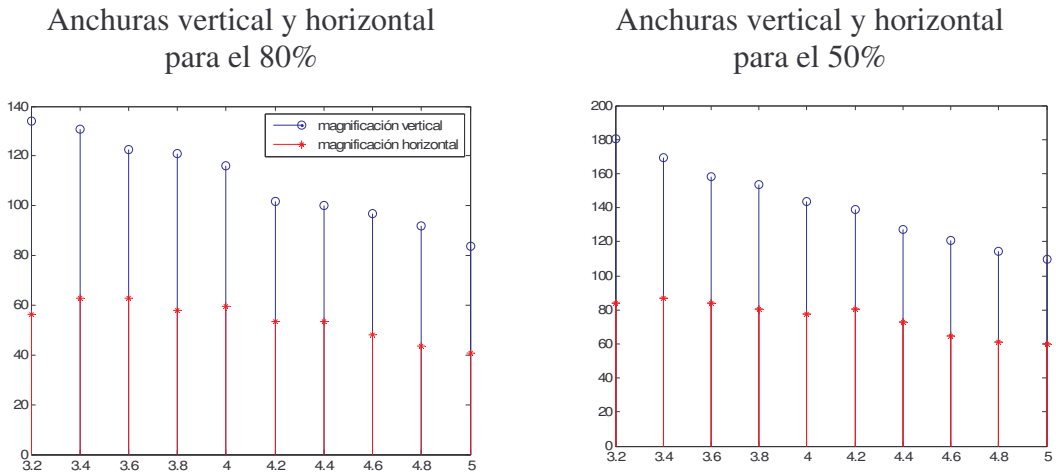


Fig. 3.41: Magnificaciones calculadas sobre porcentaje del máximo.

En el apéndice se han añadido estos datos para el 80%, normalizados a los valores verticales por 6 y los horizontales por 3, dimensiones reales de la mira, y ajustados mediante una recta. Para el 50% resultan más lineales.

En el apartado siguiente determinaremos las rectas de tendencia de la magnificación, y el centro de magnificación para cada temperatura.

3.4.3.1.2 BB 2 pulgadas, temperatura óptima 50°

Repetimos las medidas anteriormente descritas cambiando el cuerpo negro por el de 2 pulgadas. Se comentó en el capítulo 1, la presencia de puntos calientes en la escena al trabajar con este cuerpo negro. Estos puntos, como consecuencia de reflejos y por la propia construcción, alcanzaban temperaturas aparentes, superiores al máximo de radiación buscado, por lo que la aplicación directa del algoritmo no resultó viable, teniéndose que modificar para seleccionar únicamente la zona con cuerpo negro.

BB2T50

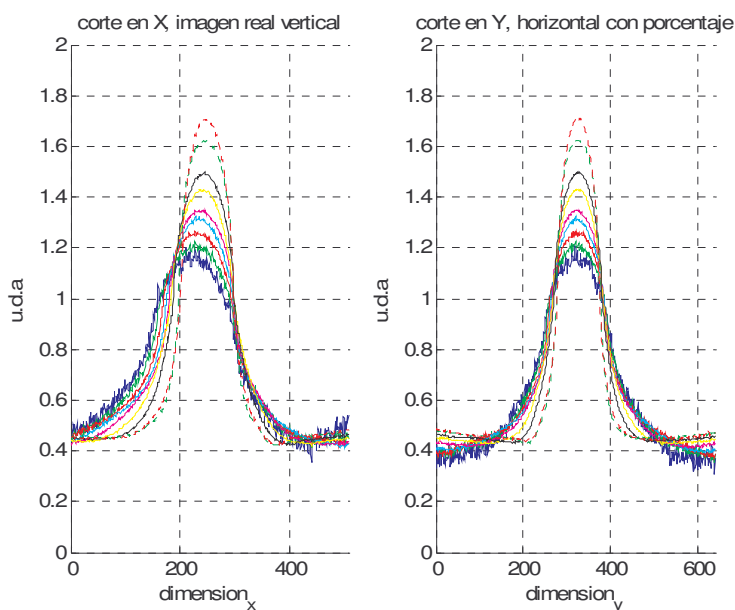


Fig. 3.42: Cuerpo negro 2 pulgadas, 50 ° C.

λ	Anchura vertical 80%	Anchura vertical 50%	Anchura horizontal 80%	Anchura horizontal 50%	max	Píxel v	Píxel h
3.2	117.7419	169.3548	116.1290	167.7419	1.1550	217.8235	321.7021
3.4	109.6774	153.2258	111.2903	161.2903	1.2135	228.6471	321.7021
3.6	106.4516	140.3226	108.0645	146.7742	1.2544	228.6471	321.7021
3.8	98.3871	135.4839	101.6129	129.0323	1.3070	228.6471	321.7021
4	93.5484	125.8065	95.1613	129.0323	1.3538	236.7641	321.7021
4.2	85.4839	122.5806	80.6452	119.3548	1.4240	236.7647	328.5106
4.4	85.4839	116.1290	85.4839	114.5161	1.4942	242.1765	328.5106
4.8	69.3548	95.1613	72.5806	96.7742	1.6170	242.1765	325.1064
5	75.8065	98.3871	74.1935	93.5484	1.7105	242.1765	325.1064

Tabla 3.9: Parámetros de salida sobre el fichero BB2T50.bin

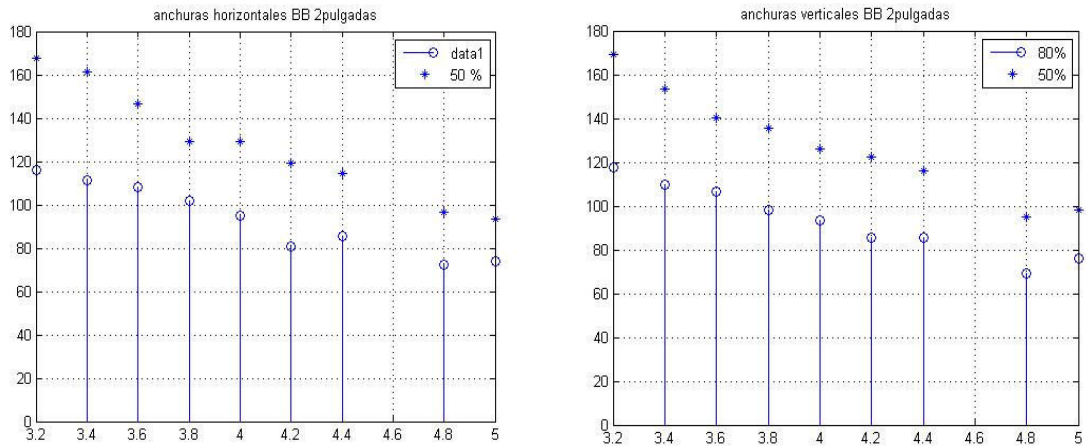


Fig. 3.43: Magnificaciones calculadas sobre porcentaje del máximo.

3.4.3.2 Determinación de las curvas de tendencia

Se ha dedicado este apartado a presentar las diferentes curvas de tendencia de los cálculos realizados hasta el momento. Se muestran las rectas con las que podemos aproximar los resultados obtenidos, con el fin de interpolar medidas posteriores sobre estas pruebas.

3.4.3.2.1 Parámetros Físicos del sistema

Presentamos a continuación algunos de los parámetros necesarios para determinar algunas de las relaciones entre magnitudes físicas que permiten caracterizar el sistema infrarrojo en condiciones de longitud de onda y energía. Muchos de estos parámetros han sido explicados en capítulos anteriores, así como algunas de las ecuaciones que se listan.

λ (μm)	focal(mm)	F _#	diámetro lente (cm)	NA	FOV (proporcional a)	DOF (Rayleigh) (μm)
5	82	2,01		0,25	1,220	40,39
4	102	2,50	4,08	0,20	0,980	50,00
3	127	3,11		0,16	0,787	58,14

Tabla 3.10: Parámetros proporcionados por el fabricante

salto de la lente (μm)	Aumentos (proporcional a la distancia focal)	energía que llega (efecto de la variación de los aumentos)	Energía normalizada a 60° y en 3.2 μm
93,75	1,00	1,00	13,86
	1,24	0,80	3,92
	1,55	0,65	0,36

Tabla 3.11: Parámetros cotejados con la relación radiación vs λ .

3.4.3.2.1.1 Cálculos FOV

Presentamos los valores y curvas correspondientes al campo de visión FOV, por su importancia en la caracterización del sistema.

Las ecuaciones del campo de visión en ambas dimensiones, horizontal y vertical; y considerando las unidades en radianes y en estereorradianes son:

$$\left. \begin{aligned} FOV_h(rad) &= \frac{n^\circ \text{ elementos}_h \cdot \text{pitch}_h(mm)}{f(mm)} \\ FOV_v(rad) &= \frac{n^\circ \text{ elementos}_v \cdot \text{pitch}_v(mm)}{f(mm)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow FOV(sr) = FOV_h(rad) \cdot FOV_v(rad) \quad (3.9)$$

sustituyendo algunos valores numéricos y dejando en función únicamente de la focal:

$$\left. \begin{aligned} FOV_h(^\circ) &= \frac{916.732}{f(mm)}; & FOV_h(rad) &= \frac{16}{f(mm)} \\ FOV_v(^\circ) &= \frac{733.386}{f(mm)}; & FOV_v(rad) &= \frac{12.8}{f(mm)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow FOV(sr) = \frac{204.8}{f^2(mm)} \quad (3.10)$$

	focal (mm)	FOVh (°)	FOVv (°)
Cámara IR Phoenix	13	63,2	52,4
	25	35,5	28,7
	50	18,2	14,6
	60	15,2	12,2
	100	9,1	7,3
	180	5,1	4,1
	250	3,7	2,9
	500	1,8	1,5

Pitch LF (mm)	0,025	0,025
Elementos (h,v)	640	512
Área detector (mm ²)	204,800	
Factor forma	1,25d:d	

Tabla 3.12: Datos extraídos del catálogo de Indigo

	focal (mm)	FOV (sr)	d (rad)	FOVh (°)	FOVv (°)
Cámara IR Phoenix	13	1,212E+00	0,98	70,5	56,4
	25	3,277E-01	0,51	36,7	29,3
	50	8,192E-02	0,26	18,3	14,7
	60	5,689E-02	0,21	15,3	12,2
	100	2,048E-02	0,13	9,2	7,3
	180	6,321E-03	0,07	5,1	4,1
	250	3,277E-03	0,05	3,7	2,9
	500	8,192E-04	0,03	1,8	1,5
IMSS	5μm	82	3,046E-02	0,16	11,2
	4μm	102	1,968E-02	0,13	9,0
	3μm	127	1,270E-02	0,10	7,2

Tabla 3.13: Parámetros calculados

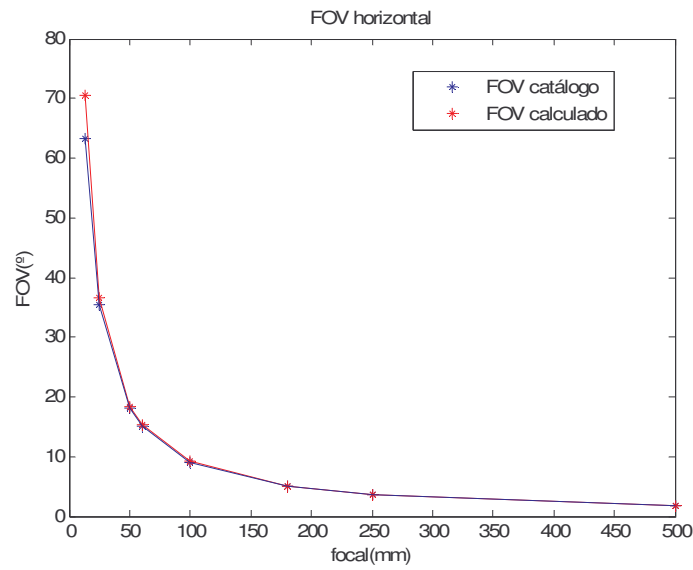


Fig. 3.44: Campo de visión horizontal, fabricante y calculado.

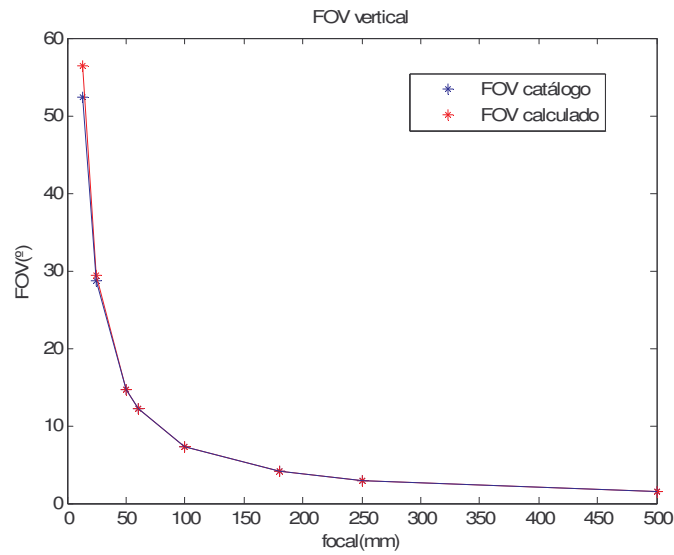


Fig. 3.45: Campo de visión vertical, fabricante y calculado.

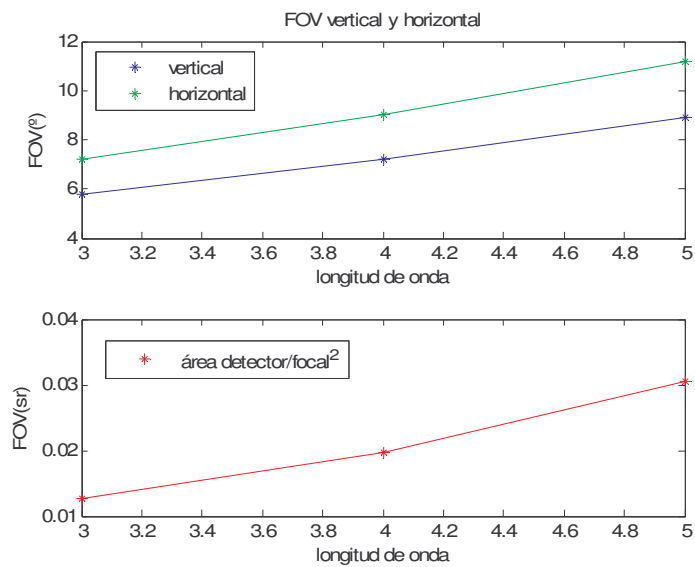


Fig. 3.46: Campos de visión para el sistema cámara + lente IMSS

Por otra parte, también se ha determinado el campo de visión instantáneo, IFOV. Es un parámetro que está en función del tamaño del detector + sistema. Conociendo el FOV se divide por el número de detectores para obtener el iFOV, de la misma forma el iFOV que aparece en las especificaciones es para un array determinado.

$$IFOV_h(rad) = \frac{pitch_h(mm)}{f(mm)} = \frac{25}{f(mm)}; \quad IFOV_v(rad) = \frac{pitch_v(mm)}{f(mm)} = \frac{25}{f(mm)}; \quad (3.12)$$

$$MAX_{RESOLUCIÓN}(cy/mrad) = \left(\frac{1}{2} \cdot pitch(\mu m)\right) \cdot f(mm) \quad (3.13)$$

		focal(mm)	IFOVv (mrad)	Max res (cy/mrad)
Cámara IR Phoenix		13	1,923	0,260
		25	1,000	0,500
		50	0,500	1,000
		60	0,417	1,200
		100	0,250	2,000
		180	0,139	3,600
		250	0,100	5,000
IMSS	5μm	0,30	0,305	1,640
	4μm	0,25	0,245	2,040
	3μm	0,20	0,197	2,540

Tabla 3.14: Campo de visión instantáneo dependiente de la focal del sistema

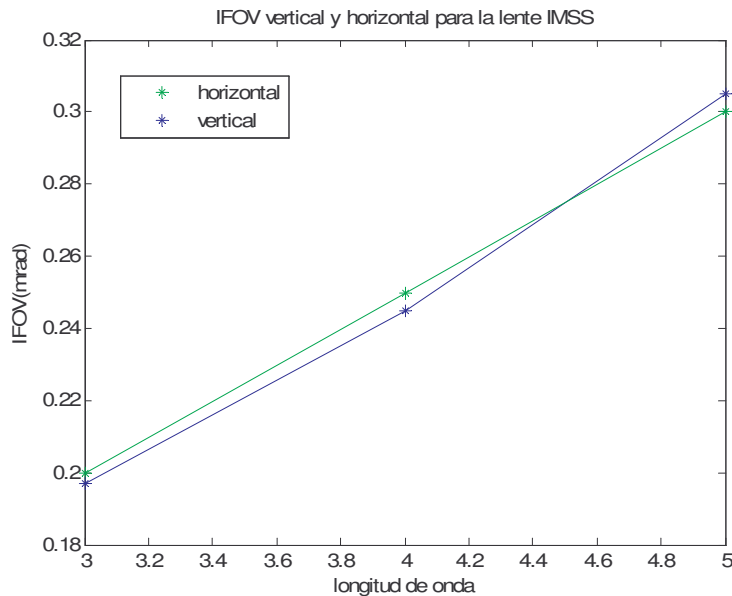


Fig. 3.47: Campo de visión instantáneo para el sistema completo

Por último añadimos dos parámetros físicos del sistema infrarrojo, directamente relacionados con su campo de visión, el alto y el ancho subtendido, en función de la distancia d(m).

$$Alto_{subtendido}(m) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{FOV_v(^{\circ}) \cdot \pi}{360^{\circ}}\right) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{FOV_v(rad)}{2}\right) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{6.4}{f(mm)}\right) \quad (3.14)$$

		Alto subtendido a (m)		
		focal(mm)	23	100
Cámara IR Phoenix		13	24,6724	107,271
		25	2,0402	52,349
		50	5,9204	25,741
		60	4,9254	21,415
		100	2,9480	12,818
		180	1,6362	7,114
		250	1,1779	5,121
		500	0,5888	2,560
IMSS	5 μ m	82	3,5976	15,642
	4 μ m	102	2,8901	12,566
	3 μ m	127	2,3201	10,087

Tabla 3.15: Valores de alto subtendido con el sistema completo

Se ha calculado para las dos distancias a las que se hicieron las pruebas exteriores y se dispone de una amplia colección de datos recopilados sobre los que se basan los capítulos siguientes.

$$Ancho_{subtendido}(m) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{FOV_h(^{\circ}) \cdot \pi}{360^{\circ}}\right) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{FOV_h(rad)}{2}\right) = 2 \cdot d \cdot tg\left(\frac{8}{f(mm)}\right) \quad (3.15)$$

		Ancho subtendido a (m)		
		focal(mm)	23	100
Cámara IR Phoenix		13	32,5204	141,393
		25	15,2439	66,278
		50	7,4235	32,276
		60	6,1699	26,826
		100	3,6879	16,034
		180	2,0458	8,895
		250	1,4725	6,402
		500	0,7361	3,200
IMSS	5 μ m	82	4,5021	19,574
	4 μ m	102	3,6153	15,719
	3 μ m	127	2,9015	12,615

Tabla 3.16: Valores de alto subtendido con el sistema completo

3.4.3.2.2 Curvas de tendencia en términos de magnificación.

Visualmente en la colección de imágenes hiperespectrales, se pudo apreciar cómo la magnificación en horizontal y en vertical era diferente. Sobre las imágenes exteriores se han sacado las rectas de desplazamiento y magnificación en ambas dimensiones en varios puntos de cada imagen.

Con esto quedó demostrado que existen diferentes pendientes de desplazamiento en ambas dimensiones, así como una dependencia de la posición del píxel dentro del FPA. Este último efecto que atribuimos al fenómeno físico de la distorsión de la propia lente, limita el comportamiento lineal del sistema a la zona central del mismo.

A continuación diferenciamos las rectas de interpolación calculadas de forma "manual" midiendo sobre cada imagen, como se comentó para la figura 3.50; y las medidas mediante el algoritmo programado, que trabaja con un porcentaje de los valores normalizados.

3.4.3.2.2.1 Determinación de la magnificación de forma manual.

Se han interpolado las muestras medidas en la imagen exterior de las placas de referencia a 23m, con polinomios de diferentes grados. En la tabla 3.12 están listadas sus expresiones. Para la dimensión horizontal el más aproximado es el de grado 3, ajustándose prácticamente a todos los puntos, mientras que para la dimensión vertical, el de grado 4 es el óptimo.

λ (μm)	3.2 μm	3.4 μm	3.6 μm	3.8 μm	4 μm	4.2 μm	4.4 μm	4.6 μm	4.8 μm	5 μm
x==b	6.8	5.9	5.5	5	5	4.7	4.6	4.6	4.6	4.3
y==a	8.6	8.1	7.2	6.9	6.8	6	5.6	5.6	5.3	5

Tabla 3.17: Medida de la mira rectangular calculada sobre la imagen

			Polinomios de interpolación	
λ (μm)	Anchura H	Anchura V	H	$y = 307,56x^2 - 2871,7x + 6812,1$ R2 = 0,9744
				$y = -191,04x^3 + 2714,6x^2 - 12891x + 20587$ R2 = 0,9876
			V	$y = 84,216x^2 - 805,8x + 2041,6$ R2 = 0,9638
				$y = -88,584x^3 + 1200,4x^2 - 5451,8x + 8429$ R2 = 0,9896
				$y = 125,11x^4 - 2190,5x^3 + 14360x^2 - 41839x + 45916$ R2 = 0,9981

Tabla 3.18: Anchura en píxeles y polinomios de interpolación.

3.4.3.2.2.2 Determinación de la magnificación a partir de un algoritmo.

Con el fin de comparar los datos correspondientes a otras temperaturas del cuerpo negro, se ha trabajado con valores normalizados en intensidad, y posteriormente se ha normalizado respecto a la longitud de onda "perceptible" más baja del rango.

Con la intención de comparar las pendientes de los datos en la dimensión horizontal y la vertical, se muestra la constelación de puntos correspondientes a los fotogramas seleccionadas para bandas hiperespectrales de 0.2 μm de anchura, además de su interpolación con rectas. El objetivo principal es la de determinar tanto la magnificación como el desplazamiento del blanco detectado, para corregirlo procesando los datos, así como comprobar la viabilidad de extrapolar estos resultados a otros píxeles de la matriz de detectores.

Las rectas de aproximación minimizan la desviación típica entre los datos, presentándose en las siguientes figuras sobre los mismos.

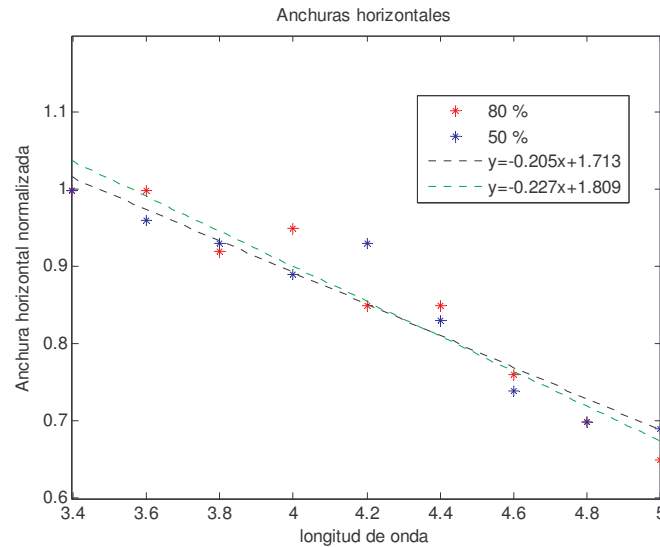


Fig. 3.48: Rectas de tendencia aproximadas a las muestras de anchura horizontal

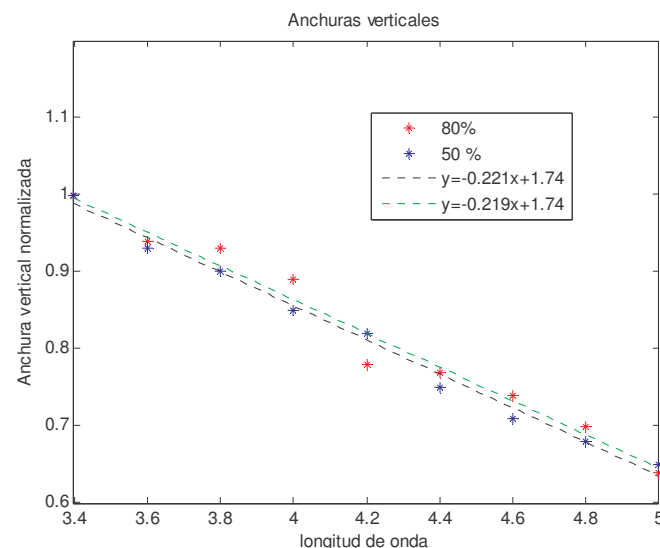


Fig. 3.49: Rectas de tendencia aproximadas a las muestras de anchuras verticales

λ	Máx	Máx V sin offset	Máx H sin offset	V 80%	V 50%	H 80%	H 50%	H _N 80%	H _N 50%	V _N 80%	V _N 50%
3,2	0,9929	0,4656	0,2575	133,871	180,6452	56,4516	83,871				
3,4	1,1869	0,7019	0,515	130,6452	169,3548	62,9032	87,0968	1,00	1,00	1,00	1,00
3,6	1,2998	0,836	0,6843	122,5806	158,0645	62,9032	83,871	1,00	0,96	0,94	0,93
3,8	1,3915	0,963	0,8007	120,9677	153,2259	58,0645	80,6452	0,92	0,93	0,93	0,90
4	1,4444	1,0053	0,8818	116,129	143,5484	59,6774	77,4194	0,95	0,89	0,89	0,85
4,2	1,5326	1,0935	1,0194	101,6129	138,7097	53,2258	80,6452	0,85	0,93	0,78	0,82
4,4	1,6455	1,1958	1,1746	100	127,4194	53,2258	72,5806	0,85	0,83	0,77	0,75
4,6	1,7513	1,2981	1,2804	96,7742	120,9677	47,9839	64,5161	0,76	0,74	0,74	0,71
4,8	1,8395	1,3862	1,3686	91,9355	114,5161	43,75	61,2903	0,70	0,70	0,70	0,68
5	1,903	1,4497	1,4321	83,871	109,6774	40,9274	59,6774	0,65	0,69	0,64	0,65

Tabla 3.19: Máximos, anchuras y anchuras normalizadas en 3.4 μm .

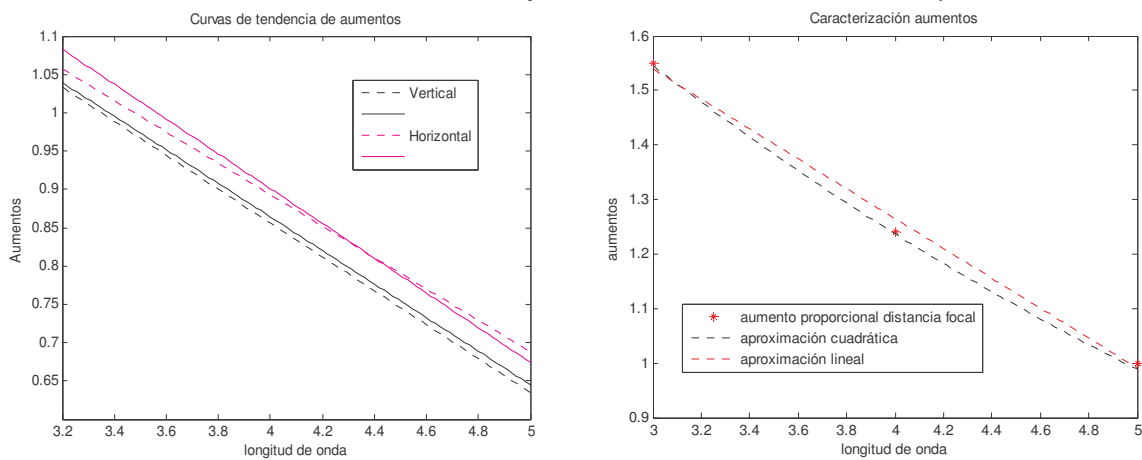


Fig. 3.50: Ajustes y Aumento proporcional a la distancia focal

Las figuras 3.49 y 3.50, se refieren a los aumentos calculados de forma teórica con los parámetros dados por el fabricante y que considera el software hypatt.exe y las curvas obtenidas en las medidas exteriores.

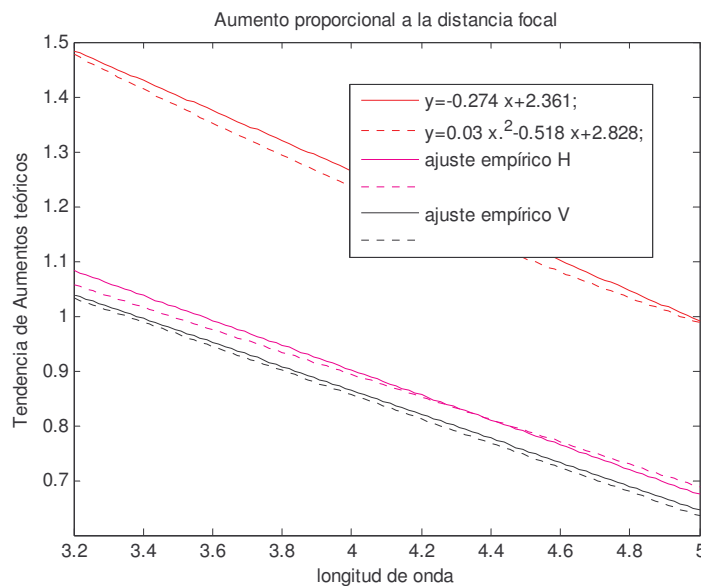


Fig. 3.51: Aumento proporcional a la distancia focal

Resulta interesante ver en cuanto a magnificación que las pendientes de los datos son similares entorno a un valor = -0.2 (curva roja), sin embargo en el eje de ordenadas hay una variación cercana a 0.4, probablemente relacionada con el pedestal que suprimimos.

Las ecuaciones de las rectas de interpolación quedan resumidas en la siguiente tabla, y los valores medios de magnificación en cada dimensión.

V (medio)	H (medio)	
0,220	0,217	
Anchura vertical	yv = -0.221x + 1.740;	
	yv1 = -0.219x + 1.740	
Anchura horizontal	yh = -0.205x + 1.713;	
	yh1 = -0.227x + 1.809	
Ajuste teórico		
lineal	y = -0.274 x + 2.361;	R ² = 0,9959
cuadrático	y = 0.0305x ² - 0.518x + 2.828;	R ² = 1

Tabla 3.20: Ecuaciones sobre la diferente magnificación en las 2 dimensiones

3.4.3.2.3 Tendencia en términos de intensidad.

Para el cuerpo negro de 4 pulgadas, presentamos las curvas obtenidas a diferentes temperaturas, en el apartado 3.4.3.1.1. Para estudiar el comportamiento del sistema en Energía, se calcularon los niveles de radiación detectados. La gráfica siguiente muestra esos máximos de intensidad en el centro de la mira, observándose cómo en algunas longitudes de onda, la radiación detectada es la misma pese a pertenecer a temperaturas diferentes. Este hecho no afecta a los valores presentados ya que han sido normalizados, pero nos obligó a recalibrar el sistema, modificando el máximo de radiación de los detectores que partía de 40°C y que a temperaturas superiores entraba en el margen de saturación.

La emisión del cuerpo negro vino determinada por su Emitancia Radiante Espectral, dada por la expresión:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \quad \text{W.cm-2 mm-1} \quad (3.16)$$

C1=3.7418 104 W mm ⁴ cm ⁻²
C2 = 1.4387 104 mm K.
T1=333K=60° C
T2=323K=50° C

Tabla.3.21: Valores de emitancia radiante calculados

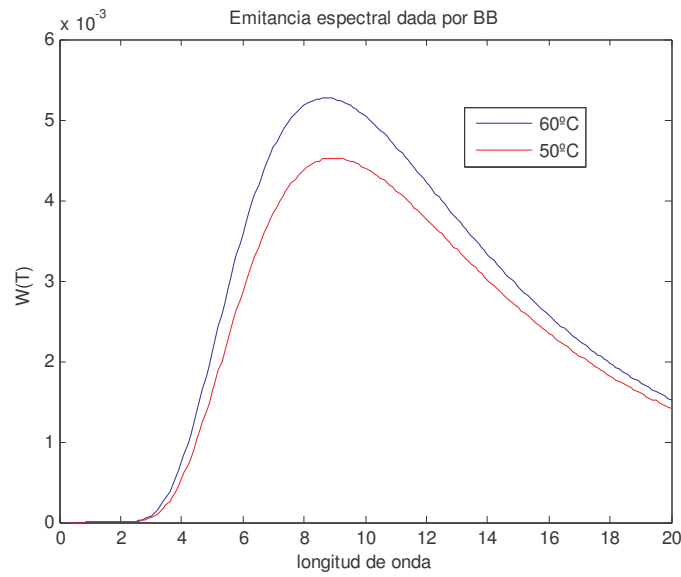


Fig.3.52: Curvas de emitancia para el cuerpo negro para 2 temperaturas.

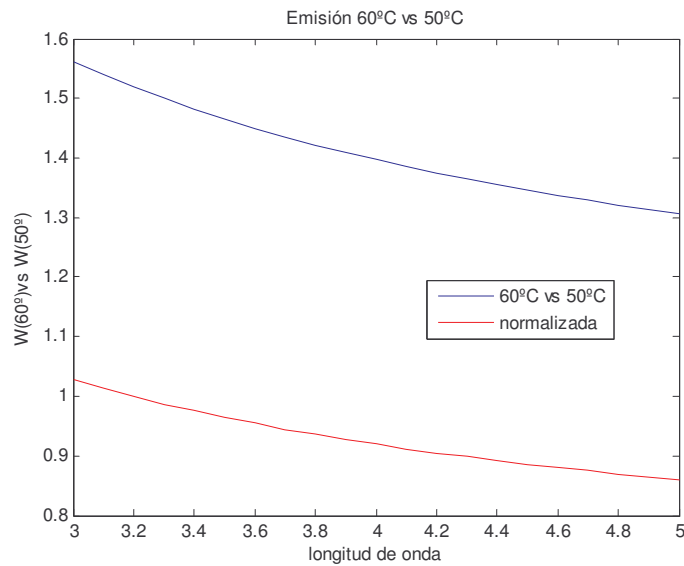


Fig. 3.53: Emisión W (60°C) vs /W (50°C), y cociente normalizado

$\lambda(\mu\text{m})$	normalizada (60°C)	60°C vs 50°C	normalizada
3	0,56	1,562	1,028
3,2	1,00	1,519	1,000
3,4	1,63	1,482	0,976
3,6	2,49	1,450	0,955
3,8	3,57	1,422	0,936
4	4,88	1,397	0,920
4,2	6,39	1,375	0,905
4,4	8,08	1,355	0,892
4,6	9,92	1,337	0,881
4,8	11,86	1,321	0,870
5	13,86	1,307	0,860

Tabla 3.22: Valores calculados con la ecuación dada por la ley de Planck.

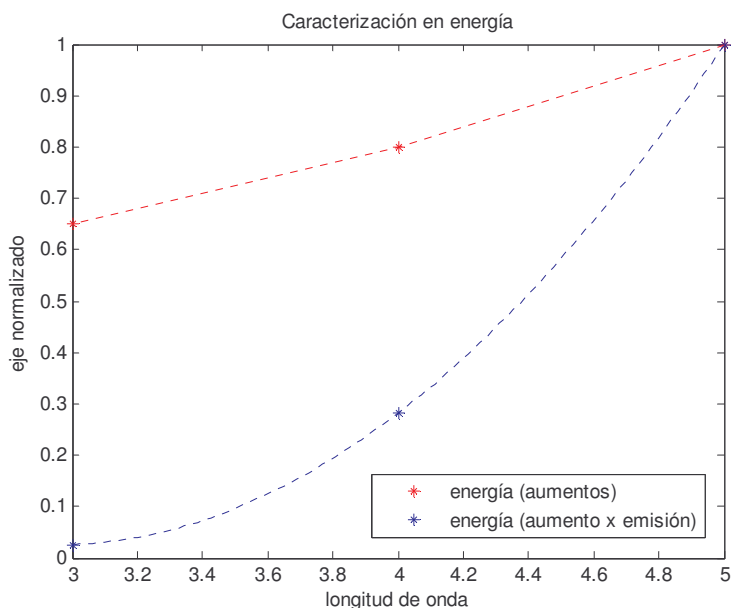


Fig. 3.54: Caracterización en energía. Energía con los aumentos y energía con aumento y emisión.

$$y = 0,2302x^2 - 1,355x + 2,019$$

$$R^2 = 1$$

Tabla 3.23. Ecuación de la energía considerando los aumentos y la emisión.

3.4.3.2.4 Desenfoque y otros

λ (μm)	max (60°C)	Delta	normalizada	max (50°C)	delta	normalizada	delta60 /delta50
3,2	1,0874	0,6374	1,00	1,0336	0,56	1,00	1,131
3,4	1,2235	0,7735	1,21	1,2176	0,75	1,33	1,035
3,6	1,3167	0,8667	1,36	1,3182	0,85	1,50	1,022
3,8	1,3951	0,9451	1,48	1,3952	0,93	1,64	1,022
4	1,4478	0,9978	1,57	1,4484	0,98	1,74	1,020
4,2	1,5454	1,0954	1,72	1,5443	1,07	1,91	1,020
4,4	1,6455	1,1955	1,88	1,6452	1,18	2,09	1,017
4,6	1,7564	1,3064	2,05	1,7565	1,29	2,28	1,015
4,8	1,8432	1,3932	2,19	1,8452	1,38	2,44	1,013
5	1,9033	1,4533	2,28	1,9019	1,43	2,54	1,015

Tabla 3.24: Desenfoque

Muestras normalizadas a 60°	$y = -0,0719x^2 + 1,4095x - 2,6998$	$R^2 = 0,9906$
Muestras normalizadas a 50°	$y = -0,0134x^2 + 0,81x - 1,4184$	$R^2 = 0,995$

Tabla 3.25: Ecuaciones de ajuste sobre los aumentos teóricos.

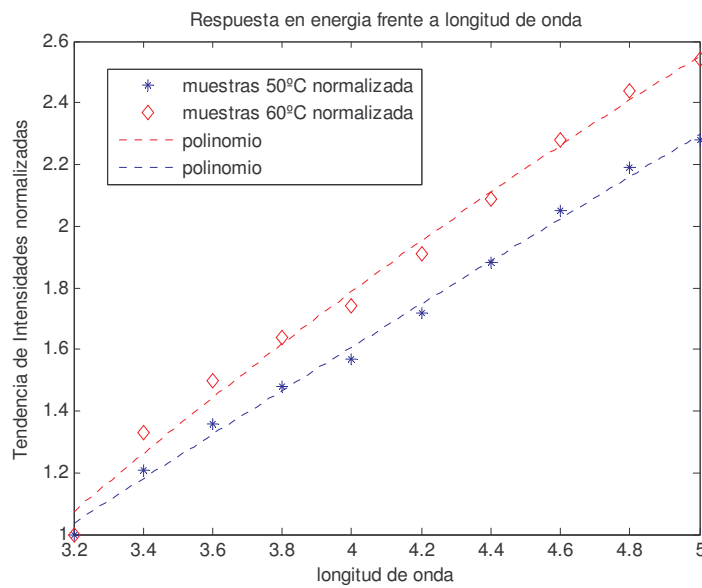


Fig. 3.55: Muestras y polinomios de interpolación de grado 2, para cada grupo.

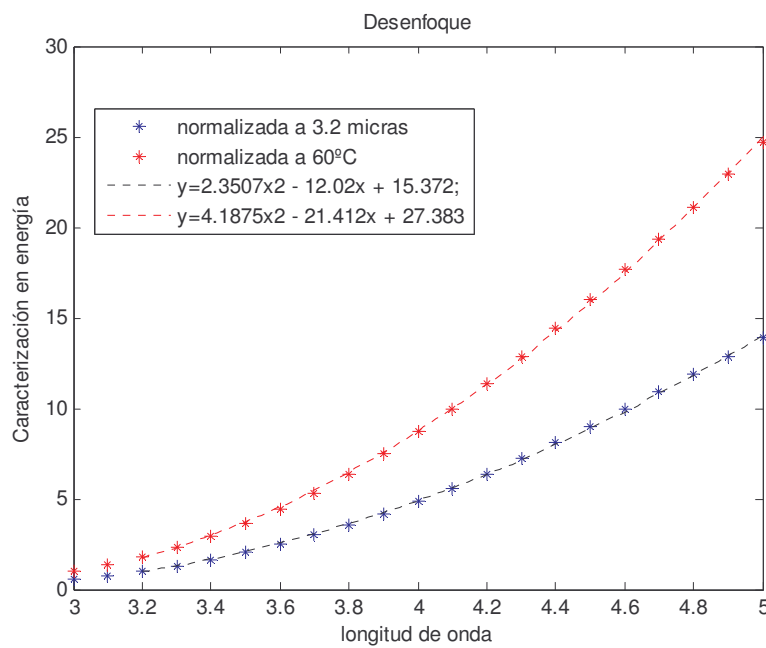


Fig. 3.56: Desenfoque

Normalizada a 60° C	$y = 2,3507x^2 - 12,02x + 15,372$	$R^2 = 0,9997$
Normalizada a 3.2 μm	$y = 4,1875x^2 - 21,412x + 27,383$	$R^2 = 0,9997$

Tabla 3.26: Ecuaciones polinómicas de interpolación sobre los datos

3.4.4 Estimación de la Difracción a partir de una mira rectangular

El Análisis de Fourier es una potente herramienta para el estudio de señales. Se divide a su vez en dos: El Desarrollo en Serie de Fourier DSF para señales periódicas y la Transformada de Fourier TF para señales no periódicas.

DSF:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot e^{+j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n}, \quad N: \text{ periodo de la señal} \quad (3.16)$$

Coefficientes:

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n} \quad (3.17)$$

Se puede calcular la salida de un sistema cuando su entrada es una señal periódica, en función del desarrollo en serie de Fourier de la misma, y la respuesta en frecuencia del sistema:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} H\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k\right) a_k \cdot e^{+j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n} \quad (3.18)$$

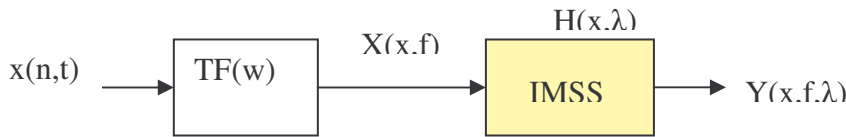


Fig. 3.57: Diagrama de bloques del sistema en el dominio espectral

De esta forma hemos modelado nuestro sistema, tras medir la MTF que caracteriza la respuesta en frecuencia del conjunto cámara IR + lente. Consideramos como señal de entrada, la dada por la mira rectangular que transformamos a su dominio frecuencial para multiplicar con la respectiva MTF equivalente. Esta $H(x,\lambda)$ es el producto de la respuesta del sistema, y la difracción de la lente ante una mira cuadrada y su desenfoque.

Antes de presentar las ecuaciones que caracterizan la respuesta a la mira cuadrada, haremos algunas consideraciones sobre el tratamiento de nuestros datos. Ya que las imágenes y diferentes señales han sido manipuladas con Matlab y sus funciones, mencionaremos las necesarias para este proceso. El cálculo de la DFT *Discrete Fourier Transform*, se ha sustituido por la FFT *Fast Fourier Transform* por sus ventajas en las técnicas computacionales y su eficiencia.

Cuando se opera con $2 \cdot N$ muestras correspondientes a valores reales, la DFT es una función compleja con componentes reales e imaginarias, cada una de ellas de $2 \cdot N$ muestras. La MTF desde 0 a $N-1$ es simétrica y duplicada desde $n=N$ hasta $n=2 \cdot N-1$ y solo se representan N puntos. Posteriormente la amplitud se normaliza y la n -ésima muestra corresponde al módulo del complejo que compone la Transformada discreta de Fourier:

$$MTF(n) = \sqrt{\Re^2(n) + \Im^2(n)} \quad n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.19)$$

La frecuencia espacial asociada con la n -ésima muestra está relacionada con la frecuencia de muestreo f_s y el número de muestras digitalizadas corresponden a la expresión dada por:

$$f_x = n \cdot \frac{f_s}{2 \cdot N} \quad n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.20)$$

La resolución frecuencial Δf se expresa como:

$$\Delta f = \frac{f_s}{2 \cdot N} \quad f_{MAX} = \frac{f_s}{N} \quad (3.21)$$

La frecuencia máxima que puede ser reconstruida, como mencionamos al calcular la MTF viene determinada por el criterio de Nyquist, siendo dependiente de los equipos de test y de la metodología de medida, y no influye tanto en el sistema infrarrojo como en su procesamiento posterior.

Conocida la MTF de un sistema, se puede estimar la imagen que nos proporcionaría el mismo sobre un objeto arbitrario, a partir de sus frecuencias espaciales haciendo su transformada de Fourier. Multiplicando estas componentes por la MTF calculada a esa frecuencia, y posteriormente realizando la transformada inversa.

El test típico en la MTF vimos que suele ser una mira de 4 barras, aunque en este apartado realizaremos el cálculo sobre una abertura rectangular, y luego extenderemos el estudio a las referencias con placas a diferentes temperaturas.

Modelamos un pulso cuadrado y realizamos su transformada de Fourier, así como la corrección con la MTF calculada a una determinada longitud de onda, con la finalidad de cotejarla con la respuesta obtenida con el sistema hiperespectral a partir la mira rectangular sobre el cuerpo negro.

Una onda cuadrada unidimensional cuando se transforma en serie de Fourier contiene únicamente armónicos pares de la forma:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot x}{X_0}\right) \quad (3.22)$$

Siendo X_0 el periodo de la señal cuadrada. La frecuencia fundamental f_0 es $1/X_0$. Y haciendo la transformada de Fourier se obtienen las frecuencias espaciales discretas $1/X_0, 3/X_0, 5/X_0, \dots$ con sus amplitudes respectivas $4/\pi, 4/3 \cdot \pi, 4/5 \cdot \pi, \dots$

3.4.4.1 Efecto de la difracción en la MTF del sistema.

Para un sistema óptico circular ideal, la ecuación de su función de transferencia óptica OTF viene limitada por la difracción de la lente de la forma:

$$OTF_{diff}(f_x) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\cos^{-1}\left(\frac{f_x}{f_c}\right) - \left(\frac{f_x}{f_c}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_x}{f_c}\right)^2} \right] \quad (3.23)$$

donde $f_x \leq f_c$,

f_c = frecuencia de corte óptica.

La OTF por ser siempre positiva, se conoce como MTF, y determinará la respuesta del sistema ante cualquier entrada. Si multiplicamos la MTF óptica con las amplitudes de la señal cuadrada para cada frecuencia espacial y realizamos la transformada inversa de Fourier tenemos la imagen resultante.

$$I(f_x) = MTF_{diff}(f_x) \cdot F(x, f)$$

$$i(x) = MTF_{diff}(f_0) \left[\frac{4}{\pi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_0) \right] + MTF_{diff}(3 \cdot f_0) \left[\frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \sin(2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot n \cdot f_0) \right] \dots \quad (3.24)$$

Para $f_0 > f_c/3$, sólo se obtendría el periodo fundamental, mostrándose la onda cuadrada como un seno y conforme la f_0 decrece, la imagen se parece más a la onda original. La frecuencia de corte óptica es función de la longitud de onda, y a su vez la MTF_{diff} es función del cociente f_x/f_0

$$f_c \text{ (cycles / mrad)} = \frac{D_0 \text{ (mm)}}{\lambda \text{ (\mu m)}} \quad (3.25)$$

Estos cálculos son válidos únicamente para radiación monocromática ya que cada longitud de onda presenta una frecuencia de corte, o lo que es lo mismo, para cada longitud de onda el sistema presenta una MTF_{diff} diferente. Para una lente ideal la difracción crea patrones que consisten en una serie de anillos concéntricos con más brillo, lo que se denomina disco *Airy*. Matemáticamente se describe como una función de *Bessel*, y en ocasiones se aproxima con una función Gausiana.

La mayoría de los sistemas infrarrojos corrigen este hecho haciendo un promedio con el fin de obtener una MTF policromática. Mencionaremos las ecuaciones para la aproximación, pero por la propia naturaleza hiperespectral de nuestro sistema, mantendremos una MTF correspondiente a cada longitud de onda.

Aproximación policromática:

$$\lambda_{promedio} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot \tau_{lente}(\lambda) \cdot R_d \cdot M_e(\lambda, \Delta T) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{lente}(\lambda) \cdot R_d \cdot M_e(\lambda, \Delta T) \cdot d\lambda} \approx \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (3.26)$$

$$MTF_{diff}(f_x) \approx 1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f_x}{f_c}$$

Para una apertura rectangular se puede aproximar la MTF que causa la difracción:

$$MTF_{diff}(f_x) \approx 1 - \frac{f_x}{f_c}, \quad f_c = \frac{D}{\lambda} \quad (3.27)$$

para $f < f_c$.

3.4.4.2 Efecto del desenfoque en la MTF del sistema.

La MTF que causa el desenfoque se aproxima mediante la siguiente función:

$$MTF_{desenfoque} = \left(1 - \frac{f_x}{f_c} \right) \cdot \sin c \left[8 \cdot W_{pp} \cdot \frac{f_x}{f_c} \left(1 - \frac{f_x}{f_c} \right) \right] \quad (3.28)$$

W_{pp} es la onda de error estimado a partir de la focal y los desplazamientos del punto al plano imagen x_1 y al objeto x_2 . x_1 es el error de localización para un sistema enfocado al infinito cuando el objeto está en la posición x_2+fl . Las ecuaciones que relacionan estos parámetros se muestran a continuación:

$$x_1 = \frac{(fl)^2}{x_2}; \quad x_1 \approx \frac{(fl)^2}{H}$$

Apertura numérica: $NA = \frac{1}{2 \cdot F}$; (3.29)

$$W_{pp} \approx \frac{x_1(NA)}{2 \cdot \lambda} = \frac{(fl)^2}{8 \cdot H \cdot \lambda \cdot F^2}$$

$$MTF_{desenfoque} = \left(1 - \frac{f_x}{f_c}\right) \cdot \text{sinc} \left[\frac{(fl)^2}{H \cdot \lambda \cdot F^2} \cdot \frac{f_x}{f_c} \left(1 - \frac{f_x}{f_c}\right) \right] \quad (3.30)$$

Quedando el desenfoque para cada longitud de onda, en función de la frecuencia de corte, de la focal del sistema, del número de onda y de la altitud, parámetro H presente en tablas prefijadas altitud/acimut sistemas de escaneado, y para sistemas *staring* o fijos como es nuestro caso, que dependen del ancho subtendido HFOV.

Sabiendo además la MTF del detector de la forma:

$$MTF_{detector} = \text{sinc}(\alpha \cdot f_x) = \frac{\sin(\pi \cdot \alpha \cdot f_x)}{\pi \cdot \alpha \cdot f_x}; \quad \alpha = \frac{d(\text{detector})}{fl(\text{focal})} \quad (3.31)$$

Considerando ambos efectos sobre la mira rectangular la MTF equivalente:

$$MTF_{IMSS} = MTF_{detector} \cdot MTF_{diff} \cdot MTF_{desenfoque} \quad (3.32)$$

3.4.4.3 Resultados para la mira rectangular.

Presentamos, la señal medida sobre la imagen, tomada en el centro de la mira, y que correspondería con la curva de difracción empírica. Luego presentamos la señal cuadrada creada y su transformada en el dominio frecuencial para la longitud de onda fija de $\lambda=4.6 \mu\text{m}$.

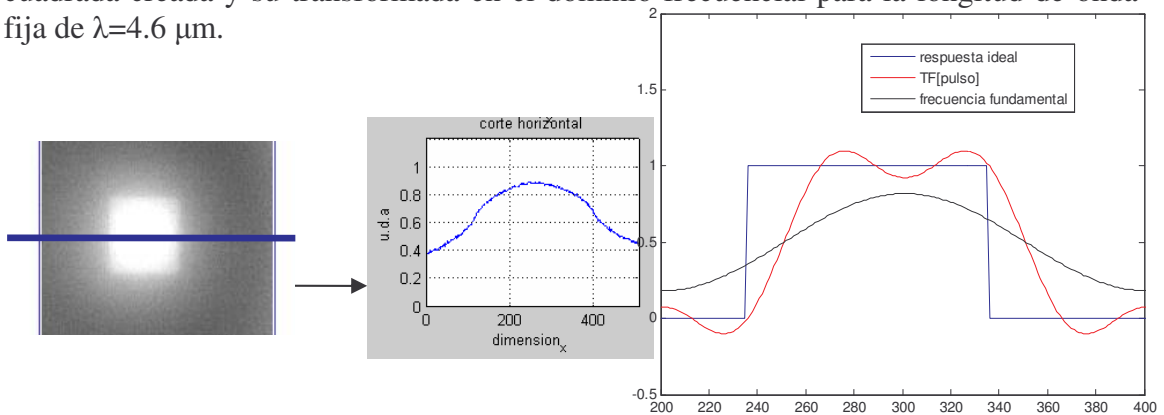


Fig. 3.58: Frecuencia fundamental y transformada de Fourier sobre un pulso.

3.4.5 Corrección del centrado/alineación de la imagen

Se modificó el fichero de calibración de la lente y se estudió su efecto en el desplazamiento del centro de magnificación.

El procedimiento seguido en esta corrección es parecido al realizado en la determinación de SiFT, y NETD. Aunque estas medidas se hicieron tras haber modificado el fichero de calibración con el centro teórico calculado, se han explicado anteriormente por guardar coherencia con el orden establecido en el capítulo 1.

- Configuración de la cámara IR Phoenix: Tras permanecer 30 minutos desde su arranque hasta poder considerarla estabilizada, se procede al calibrado de brillo y contraste. Partiendo del ajuste lineal, se eligió de forma manual el brillo y contraste de forma que coincidieran con los considerados en las medidas exteriores. Brillo= -25.07% y Contraste= 27.42; y se desactiva el control automático de ganancia para mantener fijos estos valores.

- Configuración de la lente IMSS: Realizamos esta medida en modo *capture= Step*, considerando 4 longitudes de onda, con los parámetros *Step Resolution=8* y *Number of frames=61*. Lo que da una colección de 106 *frames*. Mientras que la cámara IR necesita estabilizarse, la lente al no estar refrigerada tiene un peor comportamiento conforme se calienta, hecho que añade ruido a las medidas. Motivo por el que fue encendida en el momento de la captura.

- El paso siguiente para esta medida fue comparar las diferentes intensidades tras variar en el fichero de calibración las variables "x", "y" correspondientes al centro de magnificación. Con diferentes variaciones de la posición en vertical y horizontal, con las miras y sin ellas, se buscó mediante software sobre las imágenes del cuerpo negro a 40° de temperatura, el máximo en la imagen, para estudiar cómo afectaba a su desplazamiento y al nivel de intensidad la modificación del fichero.

- La otra opción fue mover el sistema de forma longitudinal y en vertical con el fin de encontrar el centro óptico. Se anotaron las diferentes posiciones del banco, y de la plataforma de seguimiento, tanto sus ángulos de acimut, axiales y de giro, para las mismas longitudes de onda consideradas en c.) . Sin embargo, no se han añadido estos resultados ya que resultaron inviables, debido principalmente a que la óptica no se comporta igual en toda la ventana, a la vez que aparece el efecto narciso y falsea toda la medición en los bordes de la imagen. A este hecho sobre la imagen, se añadió el error de medición de la desalineación provocada por el movimiento del sistema.

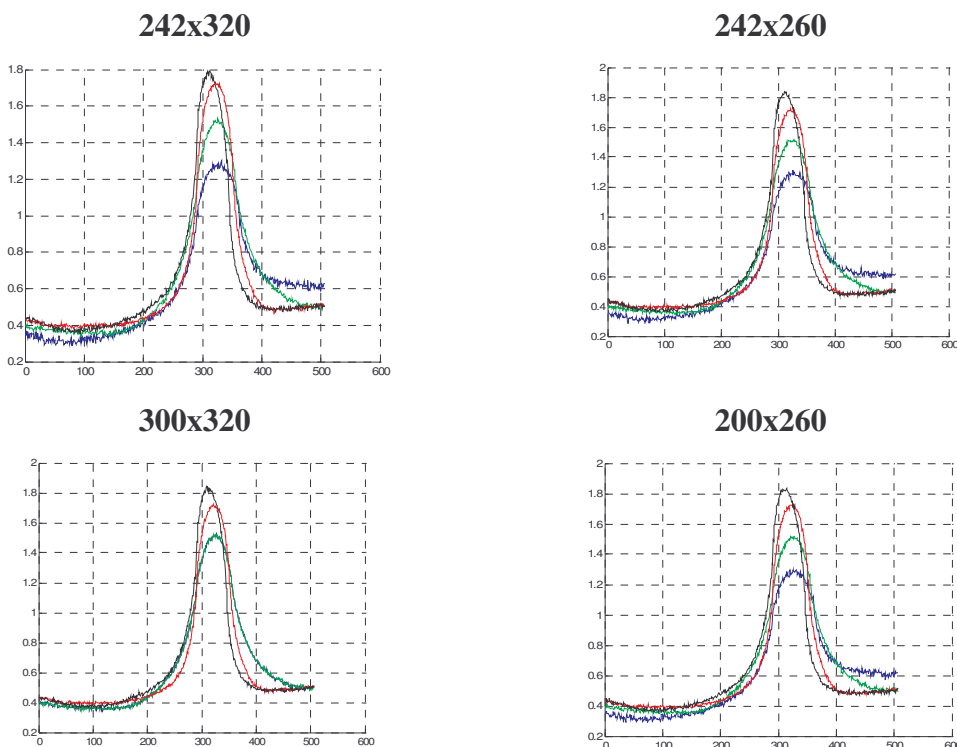


Fig. 3.59: Cortes horizontales en 3.8µm, 4.2µm, 4.6µm y 5µm.

Se han escogido algunas longitudes de onda dentro del rango, y unas pocas combinaciones que se probaron en el calibrado. Si bien el efecto en la lente variaba, el posterior procesado con el fichero modificado presentó dificultades para tratar las imágenes. Se eligió una pareja de valores guardando la misma proporción con las dimensiones de la matriz de píxeles para la que estaba calibrado el sistema. La corrección de magnificación y desplazamiento se hicieron procesando las imágenes de acuerdo con la recta que describe el centro de magnificación y su escalado vertical y horizontal dependientes de la longitud de onda.

		3.8	4.2	4.6	5
242x320 ¹³	Media	4,63E+07	4,63E+07	4,60E+07	4,56E+07
	Sigma	941.511	942.278	1.182.701	938.436
	máximo	5.649.063	5.653.667	7.096.205	5.630.615
242x260	Media	4,69E+07	4,65E+07	4,61E+07	4,58E+07
	Sigma	584.706	937.776	1.178.412	938.025
	máximo	3.508.235	5.626.655	7.070.471	5.628.153
300x320	Media	4,68E+07	4,64E+07	4,61E+07	4,57E+07
	Sigma	586.029	937.165	1.180.185	936.649
	máximo	3.516.174	5.622.989	7.081.107	5.619.893
200x260	Media	4,70E+07	4,66E+07	4,62E+07	4,59E+07
	Sigma	582.835	933.553	1.176.522	935.736
	máximo	3.497.007	5.601.318	7.059.134	5.614.414

Tabla 3.27: Variación del centro de magnificación en el fichero de calibración

¹³ Excel multiplica por 10 la anchura en píxeles, tener en cuenta.

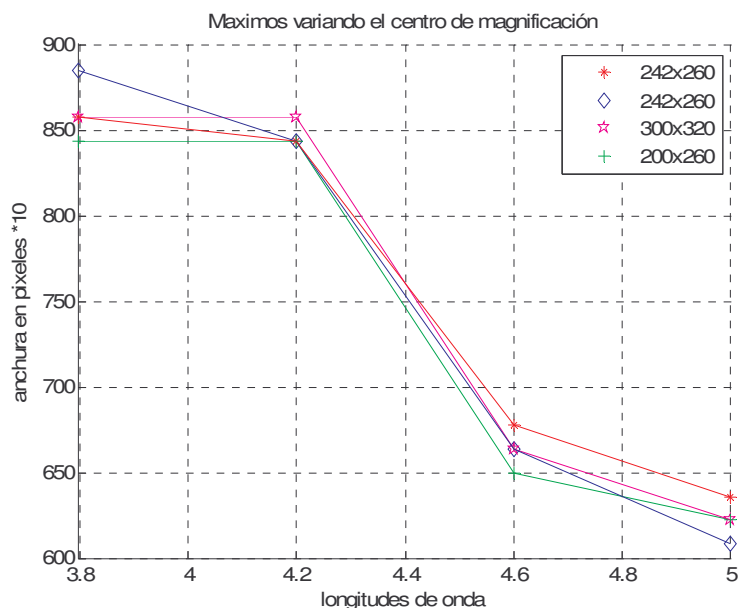


Fig. 3.60: Influencia del centro de magnificación a diferentes longitudes de onda.

	3.8	4.2	4.6	5
242x320	85,7143	84,3318	67,7419	63,5945
242x260	88,4793	84,3318	66,3594	60,8295
300x320	85,7143	85,7143	66,3594	62,2120
200x260	84,3318	84,3318	64,9771	62,2122

Tabla 3.28: Anchuras al 50%

En las conclusiones haremos una valoración sobre este método que si bien no nos dio buenos resultados, nos ratificó que era posible controlar la captura a través del fichero de calibración.

3.4.6 Corrección de la magnificación para las imágenes exteriores.

Este apartado fue íntegramente realizado con el programa de visión que incluye la herramienta de *Labview*. En puntos anteriores, las imágenes capturadas han sido tratadas con el software de la cámara IRvista.exe, programando las funciones con Matlab¹⁴, para los cálculos de intensidades y magnificación.

Para la corrección de magnificación como se ha visto hasta ahora, es necesario obtener las curvas I/λ (intensidad frente a longitud de onda) y tamaño/ λ . Se consideraron las referencias y el cuerpo negro de 4 pulgadas, y se le dedicó especial interés a la placa más caliente T_4 , ubicada entorno al píxel $x=350$.

Antes de presentar las tablas de datos, se han incluido las Fig. 3.61 y Fig. 3.62. La primera es la imagen en bruto capturada con 14 bits, a la longitud de onda de mejor resolución en cuanto a contraste que es entorno a $5\mu\text{m}$. Aparece señalado el contorno para cada longitud de onda de la placa T_4 , y el cuerpo negro en dos longitudes de onda.

¹⁴ Funciones descritas en el capítulo 5 dedicado al software implementado

Se configuró un *script* para aplicar la misma función de promediado sobre las placas en diferentes colecciones de imágenes y poder compararlas.

La figura 3.63 es sobre la misma imagen, sin aplicar el *script* de dimensiones pero aplicando un nuevo *script* de conversión a 8 bits, que además contempla el ecualizado y el giro de la imagen.

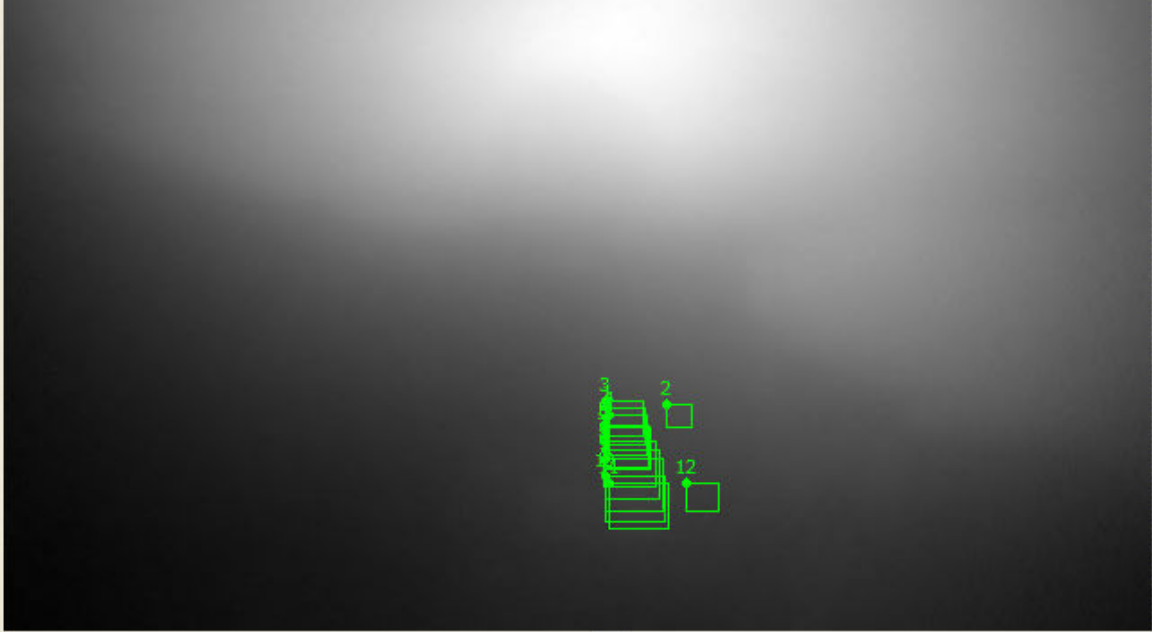


Fig. 3.61: Imagen IR en 14 bits y *script* de dimensiones sobre T4 y BB4.



Fig. 3.62: Imagen IR convertida a 8 bits.

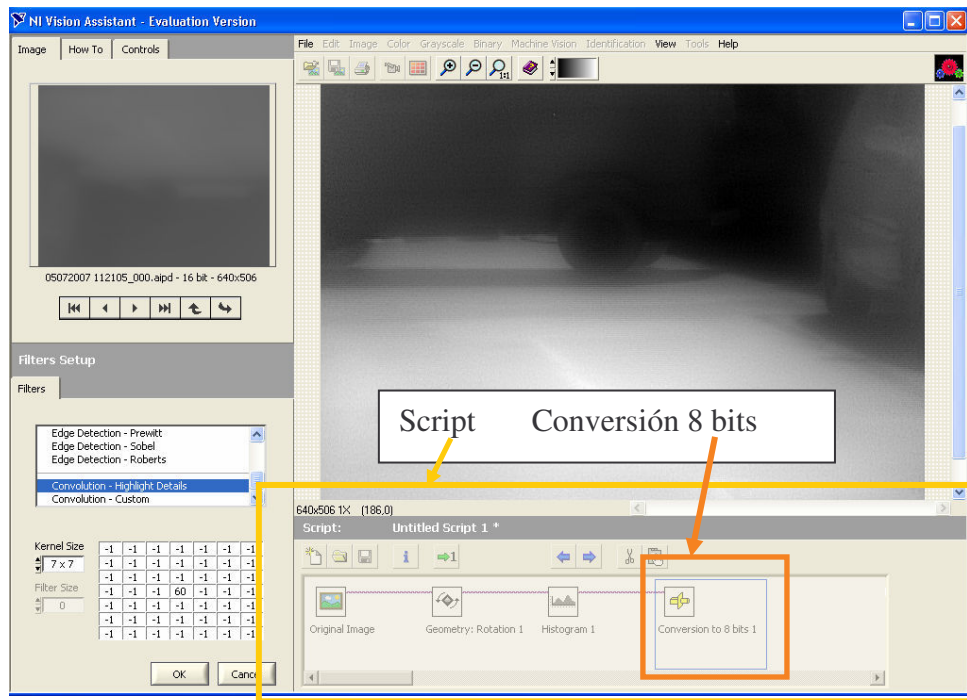


Fig. 3.63: Script y pantalla del Toolbox de Visión de Labview.

A continuación se muestran dos tablas correspondientes a la imagen completa Tabla 3.29, y la otra para la selección de una ROI¹⁵ sin considerar los desplazamientos dependientes de λ .

longitudes de onda	mínimo	máximo	media	desviación típica	Área total
3,2	5119	6049	5540,312988	240,816345	323840
4	5012	6624	5731,827637	480,281982	
5	4640	7208	5924,006836	804,508972	

Tabla 3.29: Valores para la imagen completa.

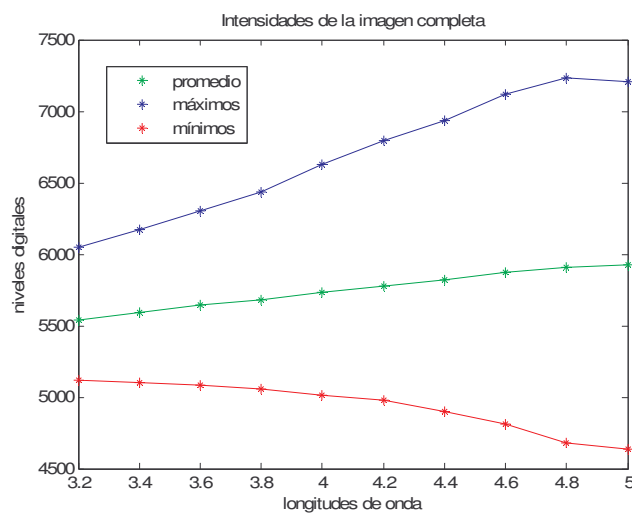


Fig. 3.64: Tendencia del máximo $y = 715,24x + 3755,2$, $R_2 = 0,9842$

¹⁵ Region of Interest = Región de interés

Para el cálculo de la magnificación y el desplazamiento con la longitud de onda, se seleccionó el área en las distintas imágenes¹⁶ (λ), para la referencia T-4 y el cuerpo negro en los dos extremos del rango, 3.2 y 5 μm .

λ	Área (%)	Promedio	DesTípica	Mínimo	Máximo
5	0,13618	5,3799E+08	9,6945E+05	5,3590E+08	5,4000E+08
BB-5	0,05620	5,4050E+08	5,9476E+05	5,3920E+08	5,4170E+08
4,8	0,12969	5,3858E+08	9,5472E+05	5,3640E+08	5,4070E+08
4,6	0,14915	5,3734E+08	1,0062E+06	5,3520E+08	5,3940E+08
4,4	0,18528	5,3646E+08	8,9970E+05	5,3460E+08	5,3850E+08
4,2	0,18528	5,3642E+08	8,8681E+05	5,3470E+08	5,3830E+08
4	0,23283	5,3562E+08	7,9954E+05	5,3390E+08	5,3780E+08
3,8	0,25939	5,3533E+08	6,6433E+05	5,3350E+08	5,3730E+08
3,6	0,29644	5,3499E+08	6,4932E+05	5,3290E+08	5,3650E+08
3,4	0,26495	5,3453E+08	7,4787E+05	5,3200E+08	5,3590E+08
3,2	0,26495	5,3425E+08	9,0847E+05	5,3140E+08	5,3590E+08
BB-3.2	0,08893	5,3369E+08	6,6406E+05	5,3230E+08	5,3490E+08

Tabla 3.30: Valores de la figura 3.75. *Script* de magnificación.

λ	Mean10*e-5	StdDev*10e-5	Min *10e-5	Max*10e-5
3,2	534048926	1121972	530600000	536600000
3,4	535321484	1379041	531200000	537900000
3,6	537980176	1626077	531500000	541600000
3,8	541212939	1826071	534900000	544600000
4	543757617	3034781	532500000	548700000
4,2	542065820	3433464	532300000	547500000
4,4	547700684	3720341	535800000	553400000
4,6	567045459	8756866	542400000	580300000
4,8	570322949	10037100	540500000	585200000
5	551077295	9344346	524100000	565200000

Tabla 3.31: Referencia de la placa térmica T4, a temperatura real 58.1°C

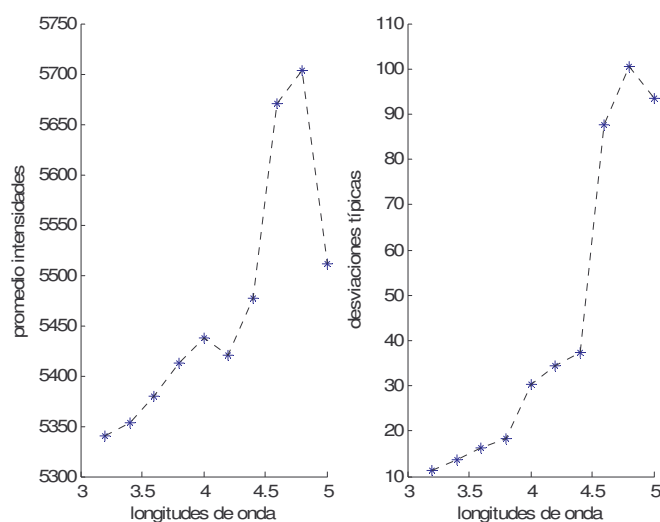


Fig. 3.65: Curvas I/λ , promedio y desviación típica.

¹⁶ Imagen recortada en vertical por el borde superior a $\frac{3}{4}$ de la capturada

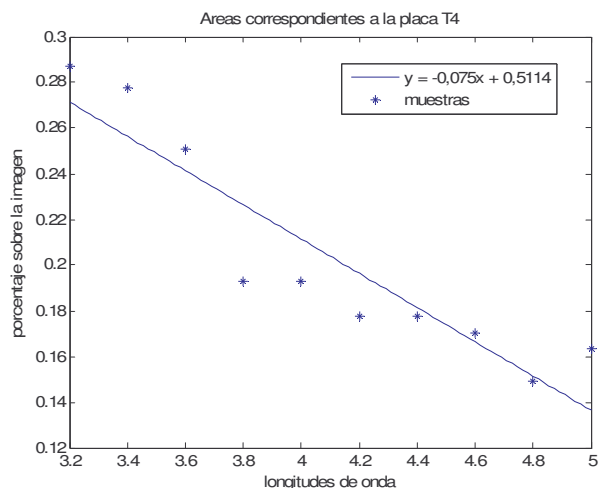


Fig. 3.66: Áreas correspondientes a la placa. Curva de magnificación. tamaño/ λ .

Se escogieron dos píxeles en la imagen, correspondientes a dos esquinas de la placa T4, con el fin de ver hasta qué punto el desplazamiento y la magnificación eran dependientes de la posición en la imagen. Se muestran las curvas para cada píxel.

Aproximación lineal píxel x	$y = -1.4848 \cdot x + 342.79;$ $R^2 = 0,8982$
	$y_1 = -6.1818 \cdot x + 386.55;$ $R^2 = 0,93$
Aproximación lineal píxel y	$y_2 = -26.03 \cdot x + 502.42;$ $R^2 = 0,9982$
	$y_3 = -30.576 \cdot x + 545.66;$ $R^2 = 0,9932$

Tabla 3.32: Ecuaciones que describen el desplazamiento de los píxeles P_1 y P_2 .

longitudes de onda	Área píxeles	Ratio %	X1 ¹⁷	Y1	X2	Y2
3,2	93.000.000	0,28718	338	420	368	449
4	62.500.000	0,19300	337	398	361	422
5	52.900.000	0,16335	335	373	357	395

Tabla 3.33: Variación de dos puntos $P_1(x_1,y_1)$,y $P_2(x_2,y_2)$ con la longitud de onda.

Las ecuaciones de la Tabla 3.33, se han dibujado en las figuras siguientes, donde se observan las diferentes pendientes para cada coordenada de los dos puntos correspondientes a la esquina inferior izquierda (rojo) y esquina superior derecha.(azul)

¹⁷ parejas de valores (x_1,y_1) y (x_2,y_2) correspondiente a las esquinas opuestas de las placas

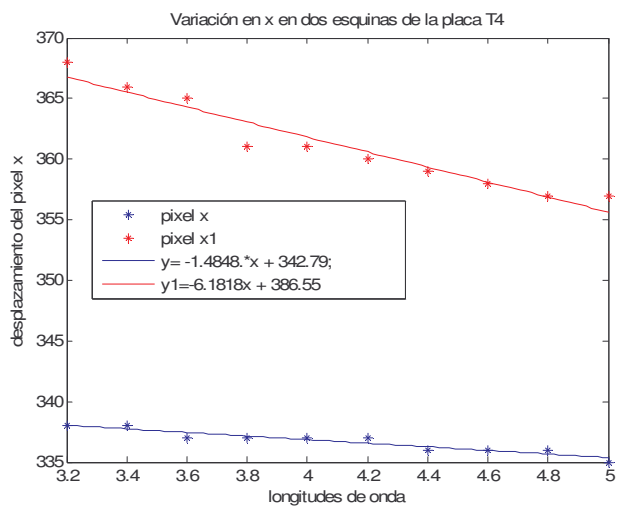


Fig. 3.67: Variación con la longitud de onda en la horizontal.

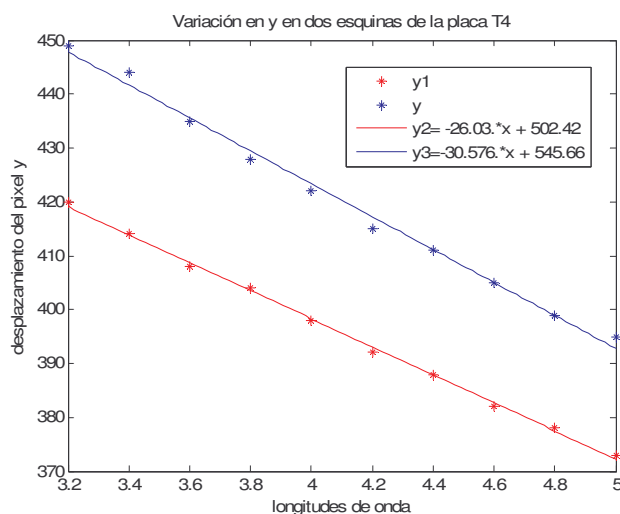


Fig. 3.68: Variación con la longitud de onda en la vertical.

Por último, incluiremos la trayectoria que describen los puntos en la imagen, donde se ve claramente la diferente evolución con la longitud de onda, en la FPA. Este efecto, se ha comentado con anterioridad y debería corregirse por software al hacer la deconvolución espacial. Comparando pendientes, el píxel más alejado del centro tiene una mayor magnificación en la dimensión horizontal.

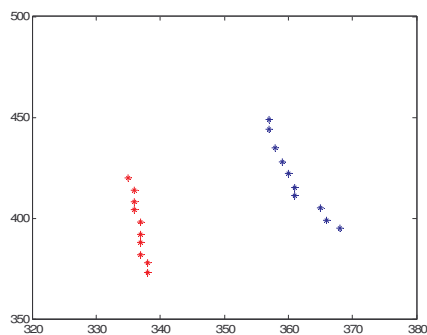


Fig. 3.69: Desplazamiento de los píxeles P_1 y P_2^{18} , con la longitud de onda.

¹⁸ NOTA: el azul /rojo pertenecen a la misma pareja de valores P_1 y P_2 , si bien la dimensión vertical está numerada de forma descendente teniendo su origen en el margen superior.

3.4.7 Estimación de la Dispersión a partir de las Placas Térmicas

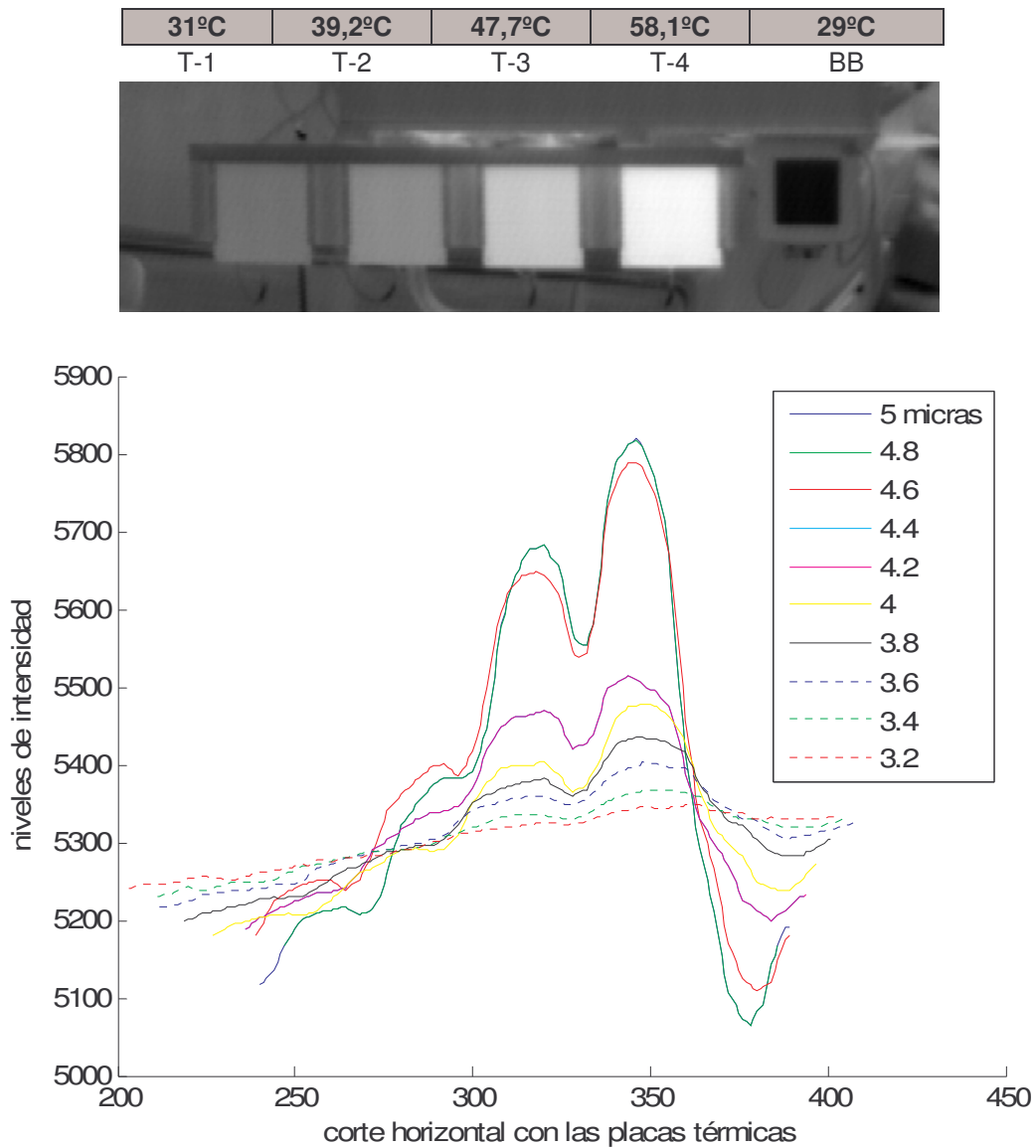


Fig. 3.70: Cortes horizontales en las referencias.

Las señales de la figura 3.70, corresponden a un corte horizontal en el centro de las placas de la referencia para las diferentes longitudes de onda seleccionadas. Con el fin de estudiar el efecto de los niveles de radiación y la influencia de la posición en la imagen, se ha seleccionado este conjunto de curvas. Se pretenden comparar con una señal generada a partir de la transformada de Fourier aplicada a varios pulsos y sobre el dominio frecuencial, aplicarles algunas de las funciones características de MTF comentadas, que se corresponden con los dispositivos que componen el sistema infrarrojo; y que teóricamente modifican para cada longitud de onda, la señal generada hasta parecerse a la obtenida en la práctica.

3.4.8 Transformada de Fourier de una señal pulso de las intensidades de las placas y relación de la dispersión de la lente con la longitud de onda.

Tratamos de dar una explicación matemática al comportamiento de los cortes de las referencias del apartado anterior, ayudándonos de la herramienta de Visión de *Labview*. Cargamos los ficheros correspondientes a la colección de imágenes hiperespectrales, y trazamos una recta que seccionará todas las referencias, centrada ésta sobre el cuerpo negro.

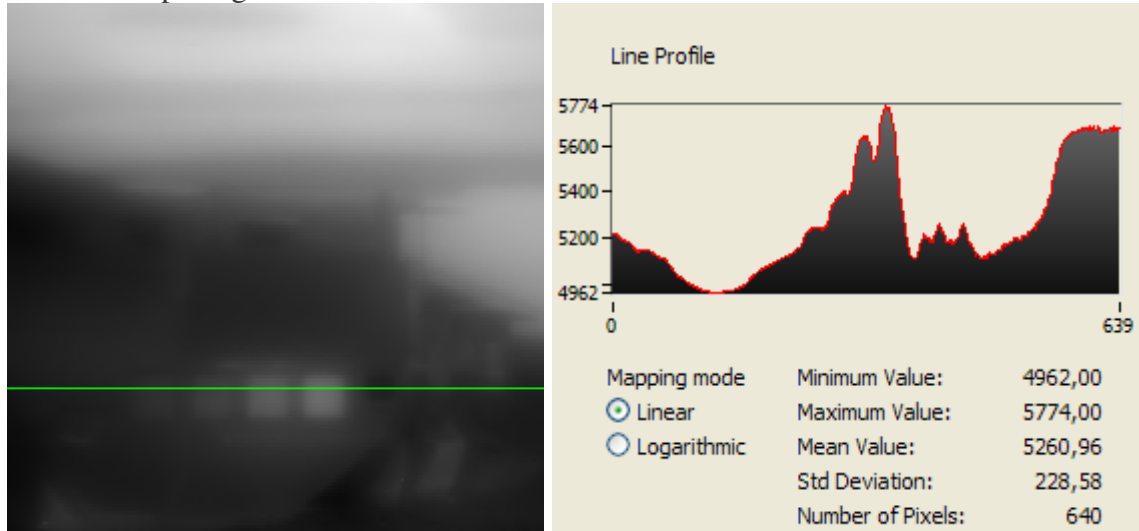


Fig. 3.71: Frecuencia Placas-Transformada Fourier-Función MTF

Con el fin de justificar la pendiente que aparece la figura 3.70, variable con la longitud de onda, y buscar una explicación, se modelizó un sistema de placas mediante Matlab, representado mediante una señal tren de pulsos de amplitud dependiente de la temperatura o nivel digital de cada referencia.

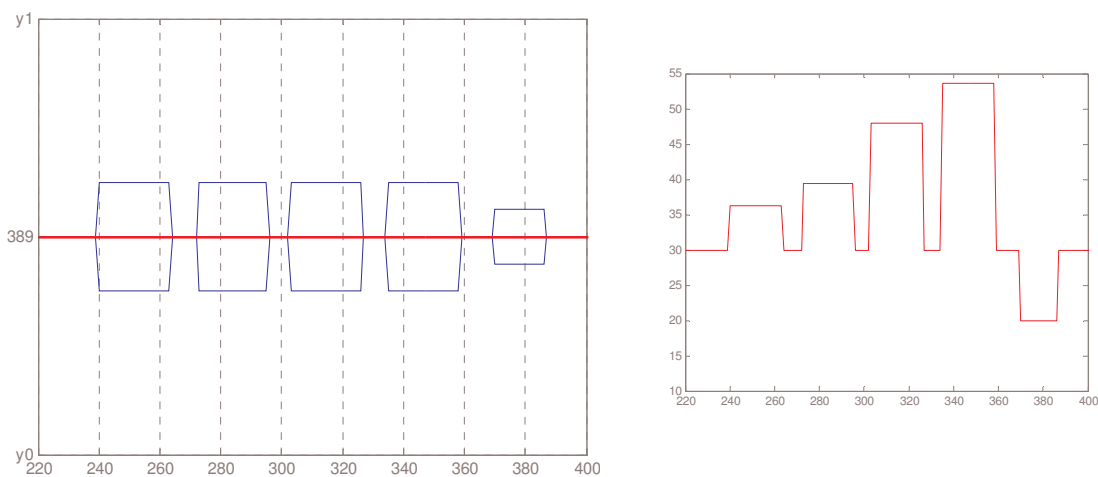


Fig. 3.72: Señal modelada con un vector de amplitud variable. Información de los niveles a lo largo de la recta para la imagen más enfocada $\lambda= 4.6\mu\text{m}$

Tren de pulsos con valor real de la T °C de las placas: $T=[36.2 \quad 39.4 \quad 48 \quad 53.6 \quad 20]$;
 Frecuencia fundamental: periodo 640
 Ciclo de trabajo: anchura del pulso

Se calculó la transformada de Fourier de la señal, y se hicieron varias combinaciones de parámetros para ver si había alguna dependencia con la longitud de onda, pero no se llegó a ninguna conclusión satisfactoria. Algunas de estas pruebas se incluyen en el apéndice. Aquí se ha dejado la gráfica correspondiente a la transformada de Fourier de la señal recreada.

Otra opción, para intentar recomponer la señal en frecuencia, en función de las placas modeladas como pulsos; fue tomar la señal como discreta y su transformada respectiva del pulso. Aplicando superposición sobre cada pulso periódico.

$$g(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + f_4(x) + f_{BB}(x);$$

$$f_1(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x_1}{T}\right) + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot x_1}{T}\right) + \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot \pi \cdot x_1}{T}\right) \dots \right] \cdot T_1;$$

$$f_2(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x_2}{T}\right) + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot x_2}{T}\right) + \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot \pi \cdot x_2}{T}\right) \dots \right] \cdot T_2;$$

$$f_3(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x_3}{T}\right) + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot x_3}{T}\right) + \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot \pi \cdot x_3}{T}\right) \dots \right] \cdot T_3;$$

$$f_4(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x_4}{T}\right) + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot x_4}{T}\right) + \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot \pi \cdot x_4}{T}\right) \dots \right] \cdot T_4;$$

$$f_{BB}(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x_{bb}}{T}\right) + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot x_{bb}}{T}\right) + \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot \pi \cdot x_{bb}}{T}\right) \dots \right] \cdot T_{BB};$$

Con un *offset* de 30°C equivalente a la media de la imagen, las señales que hemos transformado al dominio espectral son las presentadas en la figura siguiente.

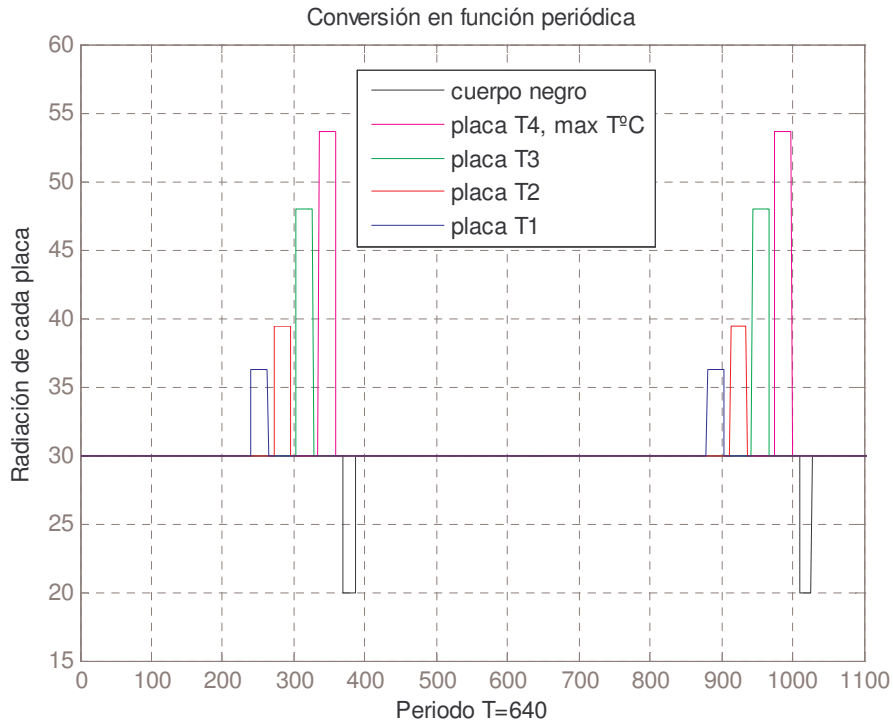


Fig. 3.73: Señal modelada con pulsos

$$placas: Temp = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_{BB}]$$

$$centro \ de \ placas: x_1, x_2, x_3, x_4, x_{bb}$$

$$anchura \ de \ placas: f(\lambda) \quad x_d, x_{BB}$$

$$f(x, \lambda) = T_1 \cdot \text{rect}\left(\frac{x-x_1}{x_d}\right) + T_2 \cdot \text{rect}\left(\frac{x-x_2}{x_d}\right) + T_3 \cdot \text{rect}\left(\frac{x-x_3}{x_d}\right) \\ + T_4 \cdot \text{rect}\left(\frac{x-x_4}{x_d}\right) + T_{BB} \cdot \text{rect}\left(\frac{x-x_{bb}}{x_{BB}}\right) + \text{offset};$$

$$F(w, \lambda) = TF[f(x, \lambda)]$$

$$TF[\text{rect}] = \int_{-x_1}^{x_1} f(x, \lambda) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} \cdot d\tau = -\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left(e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau} \right) \Big|_{-x_1}^{x_1} = -\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left(e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1} - e^{+j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1} \right) = \\ = \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left(e^{+j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1} - e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1} \right) = 2 \cdot x_1 \cdot \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_1} = x_d \cdot \text{sinc}(x_d \cdot f)$$

Con las propias funciones de *Matlab* e implementando otras específicas, se realizaron las transformadas de cada señal pulso como se representa en la figura 3.74. Por otra parte, de la teoría espectral que relaciona la transformada del rectángulo con el sinc, se obtuvieron las curvas asociadas a cada placa, y que se muestran en la figura 3.75 a continuación de las ecuaciones correspondientes.

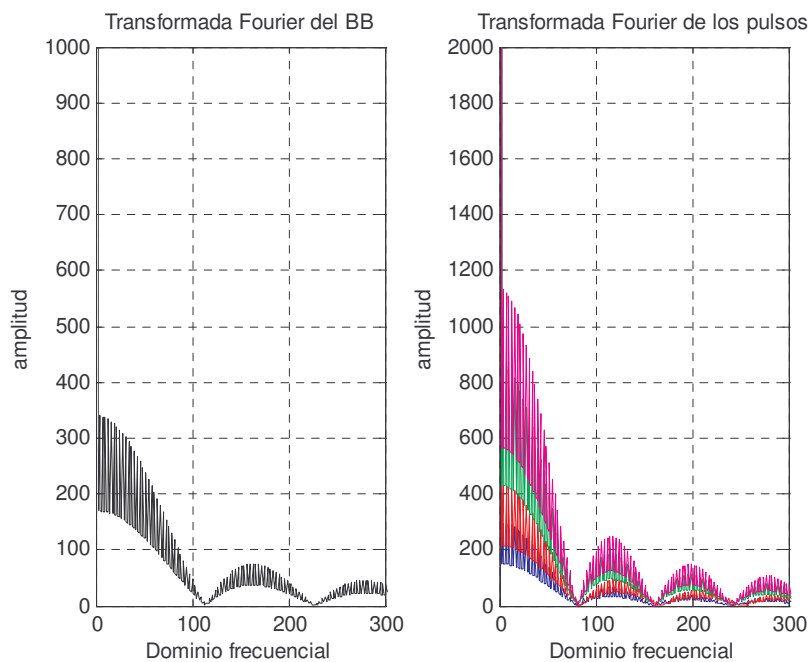


Fig. 3.74: Transformada de Fourier del cuerpo negro y de los placas.

$$g(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + f_4(x) + f_{BB}(x);$$

$$G(x) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x) + F_4(x) + F_{BB}(x)$$

$$F_1(x) = x_d \cdot [\text{sinc}(x_d \cdot f)] T_1 = x_d \cdot \left[\text{sinc}\left(\frac{x_d}{\lambda}\right) \right] T_1;$$

$$F_2(x) = x_d \cdot \left[\text{sinc}\left(\frac{x_d}{\lambda}\right) \right] T_2;$$

$$F_3(x) = x_d \cdot \left[\text{sinc}\left(\frac{x_d}{\lambda}\right) \right] T_3;$$

$$F_4(x) = x_d \cdot \left[\text{sinc}\left(\frac{x_d}{\lambda}\right) \right] T_4;$$

$$F_{BB}(x) = x_{bb} \cdot \left[\text{sinc}\left(\frac{x_{bb}}{\lambda}\right) \right] T_{BB};$$

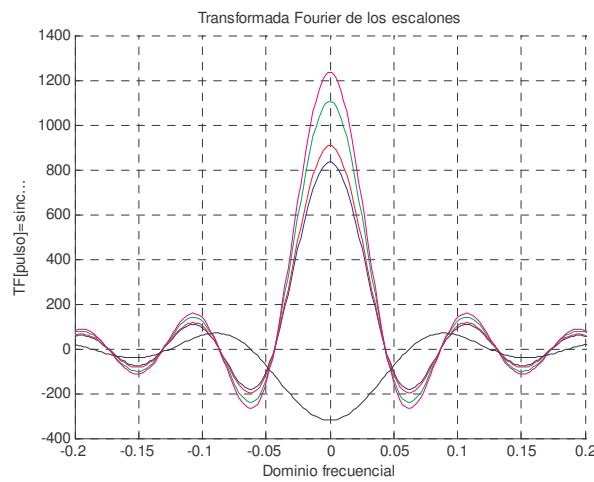


Fig. 3.75: Funciones sinc, transformadas de Fourier de los pulsos.

Una vez obtenido el dominio frecuencial de las referencias, desplazamos cada sinc a la posición correspondiente de la placa en el eje x, considerándolas ahora en lo que sería el dominio espacial.

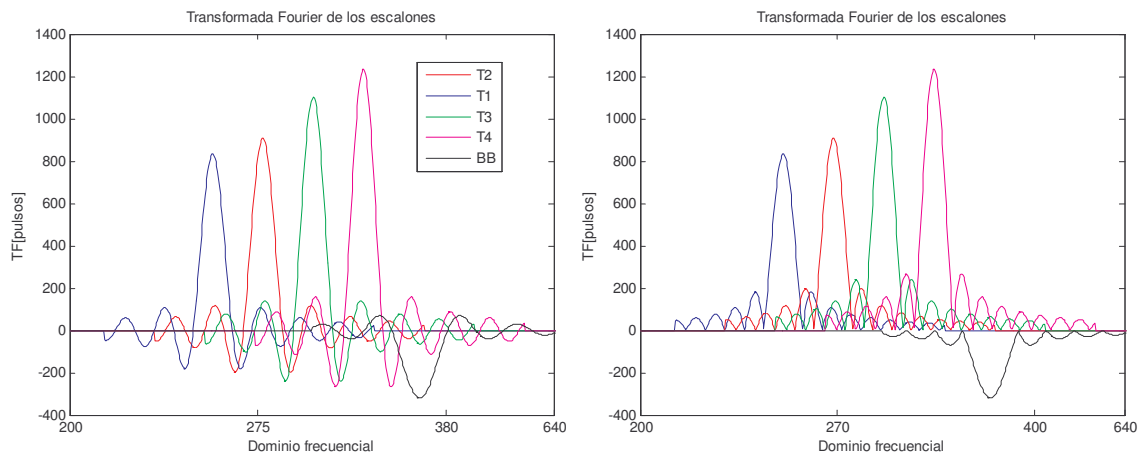


Fig. 3.76: Transformadas en el dominio espacial. Coordenada x

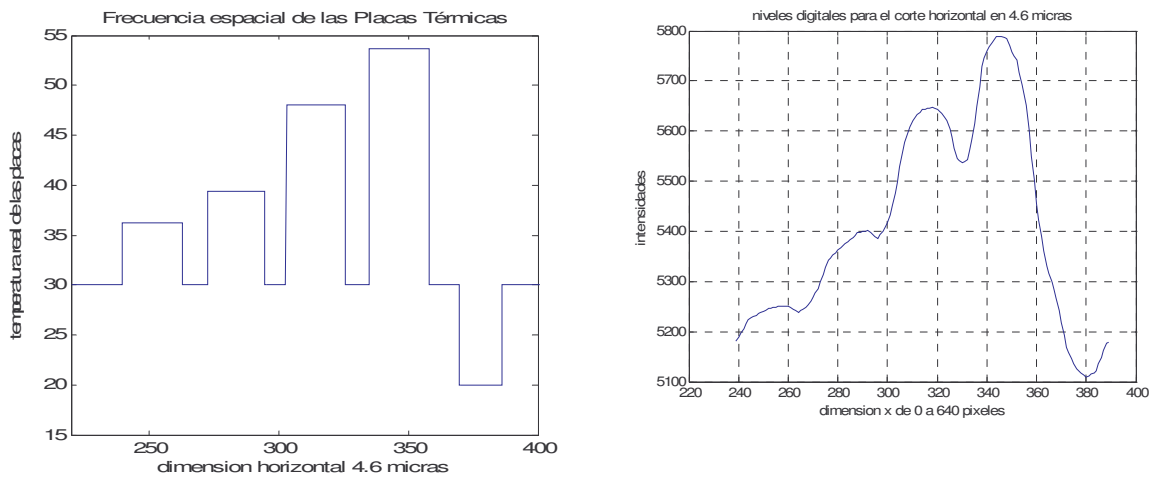


Fig. 3.77: Señal real obtenida para $\lambda = 4.6\mu\text{m}$.

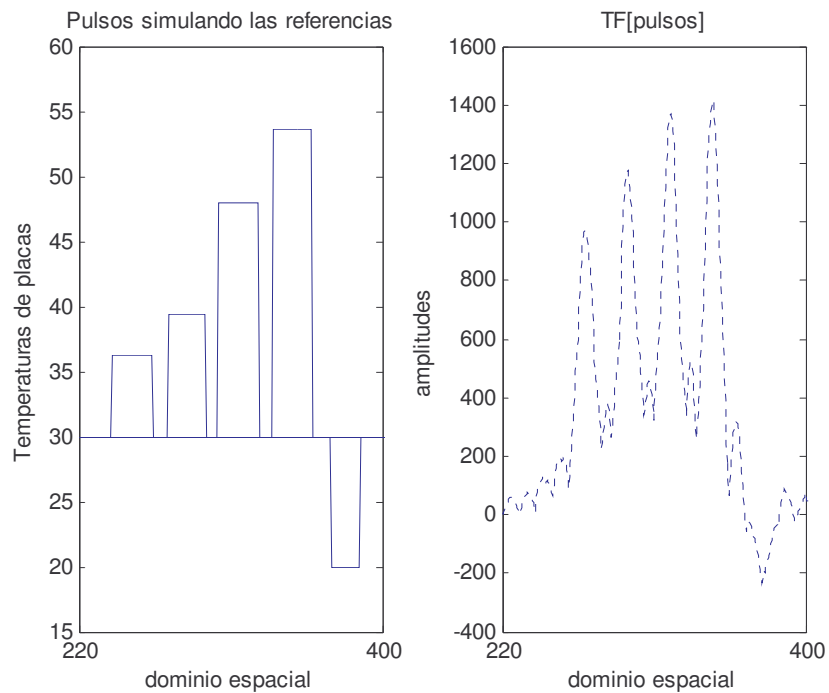


Fig. 3.78: Señal recreada a partir de pulsos y transformadas.

De la transformada obtenida sobre la señal recreada, podría desprenderse la justificación de la pendiente superpuesta y que fue el motivo de hacer este análisis.

Los subsistemas que atraviesa esta señal "creada" desde que entra por la lente hasta que se nos muestra en los visores, aplican su respuesta en frecuencia, modificando la señal y haciéndola dependiente de la longitud de onda. Son muchos los factores que influyen en la variación de la respuesta con la longitud de onda; tanto los intrínsecos de cada sistema que tienen comportamientos diferentes según la frecuencia como parámetros externos físicos. El capítulo 4, trata los efectos de la atmósfera, diferentes para cada longitud de onda.

3.5 Procesado hiperespectral

Dentro de los sistemas hiperespectrales del mercado, el que utilizamos basa su tecnología en óptica difractiva. El elemento de óptica difractiva es el responsable de la selección de las longitudes de onda. Su fabricante; además de realizar la adaptación entre la lente y la cámara utilizada, nos proporciona el software para la adquisición y el post-procesado.

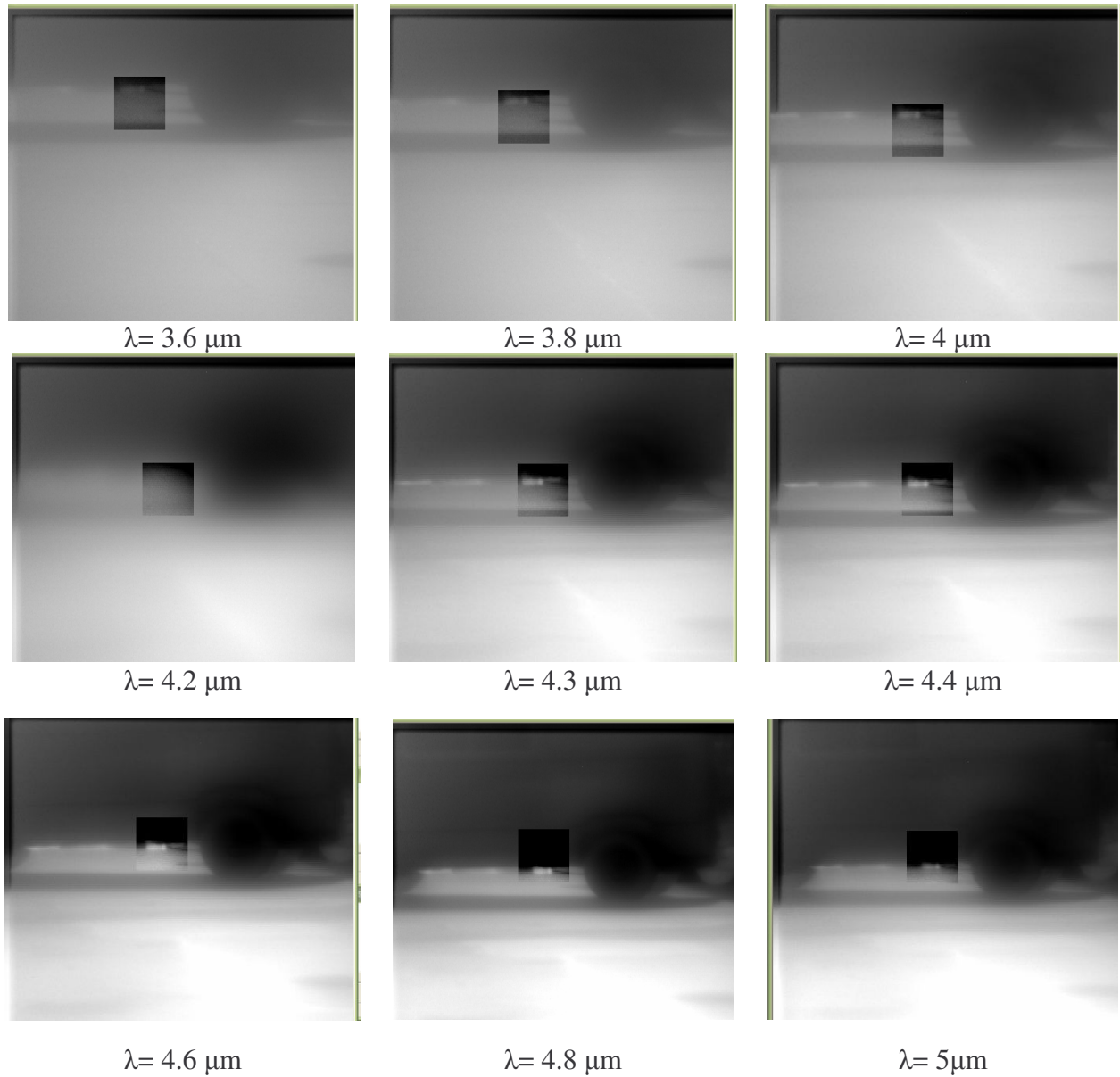


Fig. 3.79 Deconvolución espacial aplicada sobre el tubo de escape en medidas exteriores. Imágenes de Hypat II.exe.

El fichero *.dat que se genera en la captura, sí actualiza los cambios en el centro de magnificación del fichero de calibración IMSS.cal aunque da error al modificarlo y ejecutar el programa HypatII.exe. El capítulo siguiente muestra las aplicaciones que implementamos para completar el estudio del sistema sin considerar su software, justificado por este motivo.

3.5.1 Información espectral

El interés del análisis espectral radica en la posibilidad de cálculo de firmas espectrales en condiciones controladas de adquisición. Analizando la acción de ciertos factores podemos calibrar las imágenes tomadas.

Los ficheros de *Trucking* generados para la colección de imágenes hiperespectrales, dependen de variables, que hay que considerar y por eso no podemos corregir las imágenes en tamaño, magnificación y distorsión para tratarlas con el software de la lente, sin que los fabricantes nos den parámetros necesarios para la correlación. En el capítulo 4 haremos una aplicación para extraer datos de la captura por medio de fusión de imágenes. En este apartado hemos calculado un parámetro característico de los datos hiperespectrales, que es el correspondiente al espectro en cada punto de la colección de imágenes.

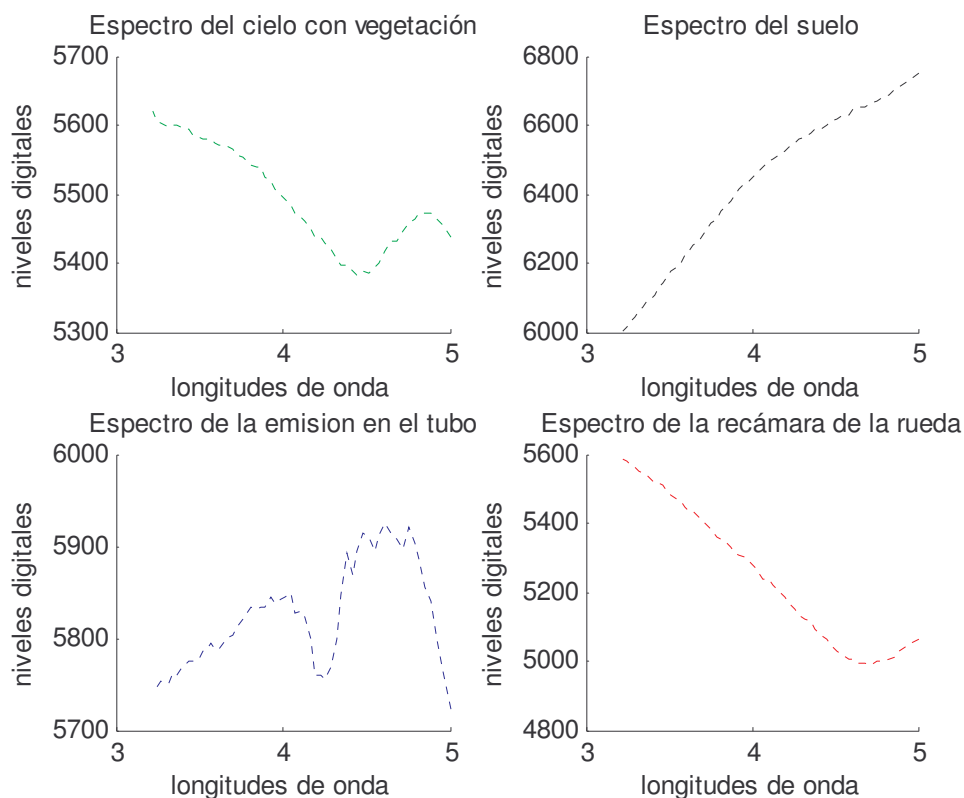


Fig. 3.80: Espectros obtenidos en varios puntos de la imagen IR.

La información incluida en un espectro, es muy amplia. La absorción de ciertos componentes, el número de capas de absorción, los efectos atmosféricos o las condiciones de iluminación pueden darnos una cantidad de datos demasiado mezclada como para poder detectar lo buscado en la imagen. Además influyen muchos factores en la reflectividad de una escena: pinturas, estructuras geométricas, humedad, tamaños, ángulos de observación...etc.

Para poder identificar determinados espectros, es necesario disponer en primer lugar de espectros de referencia; bien obtenidos de bibliotecas espectrales como se pretendió crear con diferentes modelos de coche, y posición; o generándolos mediante espectrorradiómetros. Otra opción, siendo ésta la escogida, ha sido a través de modelos de simulación, como se explicará en el capítulo siguiente.

La metodología a seguir es comparar estos espectros obtenidos en puntos concretos de la imagen, correspondientes al fondo, tubo de escape, máximos locales...etc. Obtener la tendencia y la diferencia frente a la tendencia, la reflectividad del fondo, y contrastar con las diferentes longitudes de onda, a parte de determinar las bandas de absorción.

Por último introduciremos un parámetro importante para este análisis: el ángulo espectral. Es un concepto que permite comparar diferentes firmas espectrales, es un vector n-dimensional, donde n es el número de bandas, su módulo es la reflectividad espectral y la dirección es la forma de la curva. Mide la diferencia en las formas de dos firmas, y es independiente de efectos externos. Un algoritmo para determinar la similitud entre dos espectros calculando el ángulo espectral que les separa sería:

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{k=1,m} \rho_{i,k} \cdot \rho_{j,k}}{\sqrt{\sum_{k=1,m} \rho_{i,k}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1,m} \rho_{j,k}^2}} \quad (3.33)$$

m: número de bandas

$\rho_{j,k}$: reflectividad del espectro de referencia j en la misma banda

$\rho_{i,k}$: reflectividad del píxel i en el espectro objetivo, en una determinada banda k de la imagen

3.6 Conclusiones

Tanto en el capítulo 1 correspondiente a la configuración de la cámara infrarroja, como en éste, que caracteriza el sistema hiperespectral completo, se explican los diferentes parámetros escogidos, el porqué de su necesidad y sus consecuencias; por tanto en este apartado reseñaremos únicamente los resultados más relevantes y la justificación de nuestro proceder.

3.6.1 Resultados en la respuesta en frecuencia. MTF

Esta medida es muy importante, ya que nos da la respuesta en frecuencia del sistema, por tanto se le dedicó una atención particular. Se determinó en el banco de pruebas automático por dos procedimientos, y se repitió con otro software implementado en el CIDA con un algoritmo recursivo, por la dificultad de explicar el comportamiento final con las diferentes longitudes de onda.

La posición de la mira en los cálculos de la LSF, resultó confusa al no aparecer un orden lógico en cuanto a las posiciones relativas de las distintas longitudes de onda. En las anteriores medidas, de intensidad, magnificación, o SiFT aparecían de forma secuencial una gradación entre los valores. Si bien en las medidas de ruido, por la

propia construcción del sistema cabía esperar unas longitudes de onda optimizadas entorno a $4.2\mu\text{m}$; para la MTF esperábamos unas LSFs más acorde con cada longitud de onda correspondiente, tanto para la posición en el *slit* como el nivel de intensidad.

Se repitieron los cálculos con otro programa implementado en *Labview* con el algoritmo de Fermi. Recurrimos a este método tras no poder explicar qué estaba pasando con las medidas de LSF y su relación con cada longitud de onda. En esta ocasión a pesar de tener las curvas un aspecto más atractivo, no se corresponden con la realidad de la medida, apareciendo curvas de mayor nivel a menores longitudes de onda. Hemos justificado este comportamiento observando que el algoritmo calcula la señal, parecida en todos los casos, y luego hace el cálculo con la focal, que al ser decreciente con la longitud de onda hace que las curvas MTF salgan secuenciales y para 3.2 la mayor.

Se asumió como válido el primer procedimiento y se repitieron las medidas para cada longitud de onda seleccionada por separado, obteniéndose mejor resultado.

3.6.2 Resultados del cálculo de Magnificación.

Por la importancia de corregir la magnificación que sufre el blanco al ser capturadas las imágenes a distintas longitudes de onda, se buscó caracterizar este parámetro tanto en el laboratorio como en las medias exteriores.

En el laboratorio, se calculó midiendo en ambas dimensiones mediante las miras rectangulares, el cociente de amplificación sobre una longitud de onda de referencia. Se hizo también mediante una rutina que trabaja con un porcentaje de los valores normalizados. Esta forma mecánica de calcular las anchuras nos sirvió para comparar diferentes combinaciones de temperaturas del cuerpo negro de forma más objetiva que la manual. El algoritmo programado, da como salida las gráficas correspondientes a las figuras y sus cortes transversales y los valores de intensidad y pareja de píxeles asociado, además de permitir eliminar el pedestal de cada curva y sobre el porcentaje deseado del máximo, medir la distancia en píxeles, entre los puntos de igual intensidad.

Para las imágenes exteriores, bajo el entorno de Visión de *LabView*, se han sacado las rectas de desplazamiento y magnificación en ambas dimensiones en varios puntos de cada imagen.

Visualmente en la colección de imágenes hiperespectrales, se pudo apreciar cómo la magnificación en horizontal y en vertical era diferente. Un primer intento de comprender los diferentes niveles del sistema en el eje horizontal, fue pensar que la lente tenía un comportamiento completamente distinto en las dos dimensiones, hecho que posteriormente quedó constatado al caracterizar la respuesta de la lente IMSS en longitud de onda y energía. Cabe pensar, que el software considera correcciones particularizadas para las longitudes de onda y la posición de píxel. Por ello, se procedió a buscar el centro a la vez que se estimaba la magnificación en cada dimensión espacial.

3.6.3 Resultados del centro de Magnificación.

La primera conclusión que se puede afirmar es que no podemos asegurar un centro de magnificación fijo independiente de la distancia al blanco.

Primeramente se buscó el centro de forma mecánica desplazando la mira longitudinalmente, lo que nos dio una primera idea de que el centro de magnificación se encontraba entorno a la esquina inferior derecha¹⁹.

¹⁹ Ver figura 3.40

Luego se modificó la pareja de valores que definía el centro de magnificación para la anterior cámara con la que funcionaba la lente, y que fue calibrada en fábrica. Se capturaron las mismas imágenes tras variar el fichero de calibración y se sacaron unas curvas de variación de la intensidad en determinados píxeles al variar este centro.

Este método, no nos dio resultados escalables a cualquier medida, ya que el centro de magnificación no quedaba determinado para todas las longitudes de onda. Sirvió sin embargo para evidenciar la dependencia de las medidas con los parámetros de coordenadas del fichero de calibración, y encontrar el óptimo a las dos distancias consideradas en el exterior.

Se han añadido en este capítulo las tablas con las rectas de corrección que se debe aplicar a la colección de imágenes, y los respectivos valores del centro de magnificación dependiendo del caso en que nos encontremos.

3.6.4 Alineación del sistema cámara –lente

Se explican en el apartado 3.2.5, las consecuencias que tuvo en nuestras medidas el haber pasado por alto este hecho, y que nos llevó a repetirlo todo. Fue necesario hacer esta consideración, ya que la validez en los datos, depende en gran parte de ello.

La lente IMSS, disponía de dos niveles hidráulicos para ajustar su posición horizontal; sin embargo, la cámara IR en la cara de ensamblado con la lente presenta una leve inclinación respecto a la vertical, lo que implica un desajuste en la alineación de ambos dispositivos. Se pudo corregir este problema, elevando posteriormente la cámara unos milímetros, y fijando la lente IMSS al banco de medidas, en lugar de estar en voladizo unida a la cámara. Para las medidas exteriores, el soporte de ensamblaje se colocó sobre una plataforma de seguimiento.

Variando las posiciones relativas de ambos dispositivos, y viendo su efecto en las imágenes, se pensó en la alineación como posible causa de que existan diferentes pendientes de desplazamiento en ambas dimensiones, así como una dependencia de la posición del píxel dentro del FPA, ya que la parte derecha de la imagen resultaba siempre más desenfocada.

3.6.5 El fichero de calibración.

Tras estimar este centro para la cámara que utiliza el sistema en este proyecto, la *Phoenix de Indigo*; se modificó el fichero de calibración con los nuevos valores de centro de magnificación y parámetros correspondientes a la cámara, con el fin de que el programa *HypatII*, de procesado de la lente; los considerara en su tratamiento de las imágenes.

Se comprobó, como además de cambiar las imágenes, el fichero *.dat que se genera en la captura, también actualiza los cambios del fichero de calibración *IMSS.cal*; aunque éste da error al modificarlo y ejecutar el programa *HypatII.exe*. Por tanto, la única información que pudimos obtener de este software fue la espectral, ya que el fichero espectral de las imágenes contiene información para cada longitud de onda, y se importa directamente en una hoja de *Excel*.

Hay unos datos que deben corresponder con el ajuste pero que se desconoce su funcionamiento, se modificaron de forma "coherente" y efectivamente influyen en la forma de procesar las imágenes y deconvolucionar, pero es imposible saber determinar a qué corresponden, sin la ayuda del fabricante.

4. Procesado de imágenes IR. Aplicación en firmas térmicas.

Las imágenes han sido adquiridas con el sistema hiperspectral compuesto por la cámara de infrarrojos, la lente IMSS y la instrumentación de captura y procesado. Estas imágenes deberían ser tratadas con el software asociado a la lente, el Hypatt.exe, sin embargo el software no sólo plantea varios problemas tras calibrar el sistema, sino que no permite un análisis completo de las mismas, no siendo posible la deconvolución espectral, tras la deconvolución espacial y la corrección de magnificación.

El sensor hiperspectral se comercializa con todo el sistema completo, o bien es calibrado con su cámara operativa por el laboratorio original. Se explicó la necesidad de conocer cómo se adapta la cámara a la lente en el tercer capítulo, para justificar así la necesidad de una calibración con una cámara genérica. Se comentó a su vez, que se dispone de un fichero de texto junto a la aplicación. Este fichero de calibración, tras ser modificado, queda registrado en el formato de las imágenes capturadas, y al intentar procesarlas aparecen deshabilitadas algunas de las opciones del software y que son necesarias para reconstruir, a partir de los datos hiperspectrales, la escena y el blanco medidos.

Al ser el equipo en sí mismo, un sistema cerrado, y puesto que se desconoce la implementación del algoritmo, no es posible simular el efecto de la deconvolución espectral necesaria sobre los datos adquiridos. No obstante, disponiendo de las imágenes hiperspectrales y tras convertirlas a un formato estándar para su tratamiento, las hemos analizado haciendo un procesado individual, con las herramientas de visión de Labview y principalmente con MatLab.

4.1 Determinación de las curvas de calibrado de Radiancia en Temperatura.

Al capturar las imágenes, cada píxel recibe una potencia o Radiancia a la que corresponde un valor digital de tensión de salida, para unos valores de contraste y brillo concretos. Podremos decir que una cámara está calibrada en temperatura, cuando existe una equivalencia directa entre la radiación recibida y el valor de temperatura real de la escena, en dichas condiciones. Para ello, será necesario conocer la emisividad de los objetos, la distancia, la atmósfera...etc. En nuestro caso, no existe tal equivalencia, si bien hemos intentado calibrar la cámara Phoenix y el sistema cámara IR + lente IMSS.

El objetivo de esta corrección es el de poder medir las variaciones de temperatura de varios blancos, concretamente el tubo de escape de varios automóviles sometidos a diferentes ciclos de funcionamiento y de ahí estimar su emisividad. (4.3)

Para esta calibración han tenido que ser considerados varios parámetros eléctricos, y físicos determinantes; desde la variación en los sensores de la propia matriz FPA, hasta la influencia de la óptica del sistema, y las longitudes de onda consideradas.

La figura siguiente muestra los tres bloques de imágenes capturadas, un primer bloque en laboratorio que ha servido para configurar y corregir el sistema y que ha sido desarrollado en capítulos anteriores, y los otros dos bloques correspondientes a imágenes en el exterior, para dos distancias diferentes y con blancos similares.

Posteriormente presentaremos imágenes en visible para contrastar con las infrarrojas que nos den una idea intuitiva del escenario. También se filmaron con cámara de video los distintos ciclos de acelerado a los que se sometieron los vehículos, y que quedará adjunto en el CD anexo.

Tabla. 4.1 Colección de escenarios.

100m					
	8 a 12 μm	3 a 5 μm lente Janos Campo ancho	3 a 5 μm lente Janos Campo estrecho		
					
23m					
	8 a 12 μm	IMSS 5 μm	IMSS 4.6 μm	Calibrado en laboratorio de la IMSS con el BB de 4 pulgadas	
					
	3 a 5 μm . Janos estrecho	IMSS 4.2 μm	IMSS 3.8 μm		
					
					
					

4.1.1 Equivalencia entre las referencias y la Radiancia medida

Como hemos mencionado en apartados anteriores, la distancia del objeto observado, y la focal de la lente, diferente para cada longitud de onda, influyen en la radiación que llega a la cámara.

A partir de 100m, comentamos que se puede considerar el sistema enfocado, y asumiremos que al incrementar la distancia, la radiación recibida se decrementa¹. Sin embargo, para distancias cortas como la considerada en las pruebas igual a 23 metros; el efecto de la distorsión de la óptica con las diferentes longitudes de onda, se pone de manifiesto a la hora de interpretar los valores de Radiancia.

En primer lugar se ha considerado la equivalencia de temperaturas para 2 distancias, 23 m, y para mayor o igual a 100m. Con el fin de comparar los valores obtenidos y demostrar la influencia de la óptica intermedia, se han tomado medidas con la cámara LWIR de 8 a 12 μm , la cámara MWIR de 3 a 5 μm , y las lentes IMSS (en todas sus longitudes de onda) y Janos (en campo ancho y estrecho.)

- Para una distancia de 100m obtenemos las diferentes gráficas, con 5 temperaturas consideradas correspondientes a las 4 placas y al cuerpo negro de 4 pulgadas.

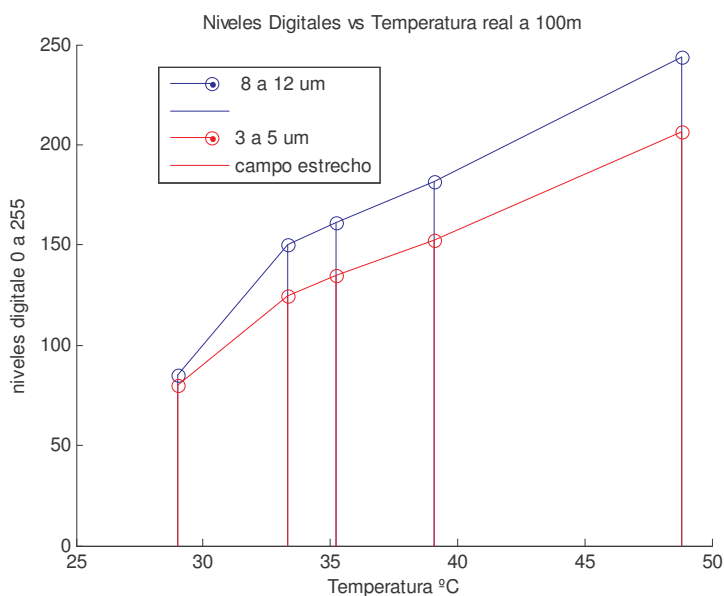


Fig. 4.1: Registro de las referencias a 100m para LWIR y MWIR

Observamos cómo podemos aproximar una función lineal entre los niveles digitales y la temperatura en las placas térmicas, (los 4 últimos valores), mientras que no sucede lo mismo para el cuerpo negro, estando a una temperatura similar. Por definición el cuerpo negro tiene emisividad unidad, por tanto habría que considerar la emisividad de las placas para el calibrado.

Con la intención de precisar en la caracterización de la cámara Phoenix, se han considerado varias combinaciones de temperaturas para las placas, y todas las posibles variantes de los sistemas ensamblados.

¹ Al depender del área, un blanco puntual no extenso depende de la distancia en relación $1/d^2$

100m	BB		placas térmicas							
10:15	29°C		48,8°C		39,1°C		35,2°C		33,3°C	
13:42	29°C		58,1°C		47,7°C		39,2°C		31°C	
	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio
8 a 12 μm	324x 330	85 ²	347x 330	224	369x 330	182	390x 330	161	412x 330	150
3 a 5 μm campo ancho	379x 227	80	404x 227	205	426x 227	152	448x 227	134	473x 227	125
3 a 5 μm campo estrecho	200x 175	138	282x 175	462	370x 175	314	455x 175	222	540x 175	147

Tabla 4.2: Registro de las referencias a 100m a distintas temperaturas.

- Las gráficas obtenidas a 23 m, se muestran a continuación, y podemos observar cómo la lente afecta en las medidas de forma considerable. Fijándonos en lo que sucede con el cuerpo negro a diferentes longitudes de onda, podríamos justificarlo con la curva de emitancia del mismo, ya que su radiación es mayor para longitudes de onda mayores en el rango MWIR a estas temperaturas, al igual que para las placas, por ser cuerpos grises con una emisividad próxima a uno. En las curvas de calibración se ha suprimido el cuerpo negro haciendo la calibración a partir de las referencias, y utilizaremos este dato en la determinación de la emisividad del tubo de escape.

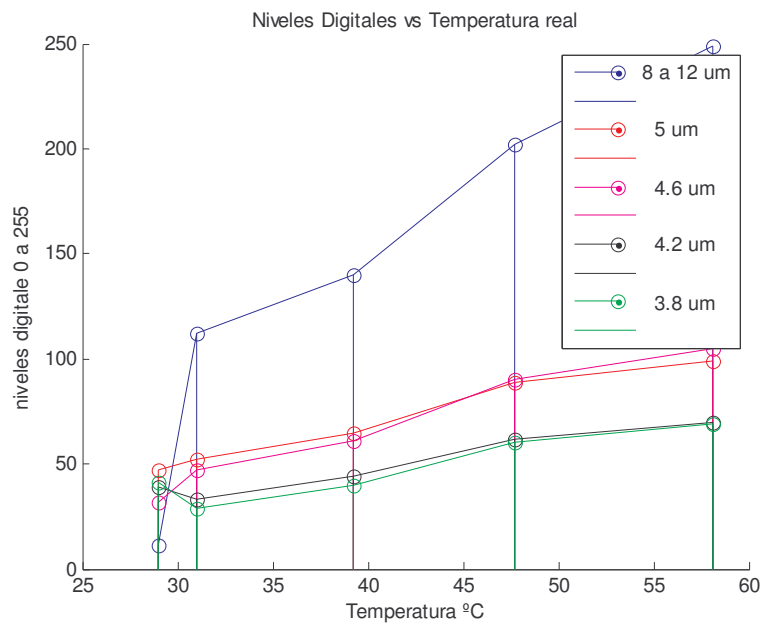


Fig. 4.2: Registro de las referencias a 23m para LWIR y MWIR

Hay que tener precaución a la hora de interpretar los valores de las imágenes, ya que según su formato o el programa con el que las abramos, manejan rangos diferentes de niveles. El software IR_vista.exe que captura y almacena una secuencia controlando

² caída abrupta correspondiente al cuerpo negro, (distinta emisividad de las placas).

la cámara Phoenix directamente, guarda estas imágenes con extensión *.bin con un rango de valores comprendidos entre [0,1]. Para comparar con las imágenes *.bmp se ha extendido el mismo a [0,255].

Vemos en la gráfica como para el campo estrecho hay valores que superan el margen, esto se debe a que la imagen estaría saturada codificando con 8 bits a partir del nivel 255 y la hemos considerado así por mantener fijos los valores de brillo y contraste que se han establecido a lo largo de todas las pruebas; (brillo= -25.07 contraste=27.42, ajuste lineal sin control automático de ganancia CAG para la Phoenix MWIR, y brillo= 6900 contraste = 8 para la LWIR).

23m	BB		placas térmicas							
	29°C		58.1°C		47.7°C		39.2°C		31°C	
12:14	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio	Píxel central	Valor medio
8 a 12 um	333x 183	11	417x 183	249	500x 183	202	584x 183	140	665x 183	112
5 um	267x 127	47	295x 127	98	323x 127	89	355x 127	64	382x 127	51
4.6 um	262x 118	32	293x 118	108	325x 118	92	356x 118	63	390x 118	47
4.2 um	257x 110	39	292x 110	71	326x 110	62	362x 110	45	398x 110	34
3.8 um	253x 98	41	291x 98	71	326x 98	58	367x 98	41	404x 98	29

Tabla 4.3: Registro de las referencias a 23m con distintas temperaturas.

Los valores marcados en la tabla son importantes debido a que manifiestan el efecto de la óptica en la medida. Vemos como la placa T4 está a 31° C. y el cuerpo negro a 29°C., y sin embargo para longitudes de onda menores de 4.2 μm y a la distancia considerada, los valores de Radiancia no tienen una relación lógica que equivalga con su temperatura.

Hemos intentado corregir este efecto de distorsión en el laboratorio poniendo directamente el cuerpo negro a diferentes temperaturas frente a la lente IMSS, y para cada longitud de onda, de manera que todo el cuerpo negro ocupe la abertura y por tanto la matriz de detectores; y analizar qué niveles de Radiancia obtenemos.

Sin embargo por el efecto de la distancia en la modificación de la focal no podremos asegurar totalmente que la aproximación en el laboratorio sea equivalente con las medidas exteriores, y será una incertidumbre sumada a los efectos de absorción atmosféricos que también han sido considerados y analizados.

4.1.2 Corrección de la distancia y la longitud de onda

Una vez consideradas las diferentes posibilidades extraídas de las medidas, y obtenidas las curvas, para corregir el efecto de la distancia y la longitud de onda se han aproximado cada una de estas curvas por una recta diferente (figuras 4.1 y 4.2), de forma que es fácil estimar la temperatura a partir del nivel digital:

$$Nivel\ digital = m \cdot T_{APARENTE} + n - offset_e \tag{4.1}$$

El programa que calcula las curvas y las aproxima será descrito en el capítulo 5. En función de los datos de entrada correspondientes a una cámara, a una distancia, a una lente o a una longitud de onda concreta, se calculará su temperatura aparente.

Con el fin de obtener las temperaturas aparentes para unos niveles digitales concretos en la imagen, representamos las graficas esta vez, con el eje de Temperaturas correspondiendo a la abscisas, y para ajustar de forma más precisa los valores, en lugar de una respuesta lineal, interpolamos con orden cuadrático y considerando únicamente las placas de referencia.

Se aplicaron varias funciones de interpolación sobre los datos de las referencias como *spline* cúbico y polinomios de diferentes grados siendo las curvas que se muestran a continuación las más aproximadas a la realidad de las medidas; guardando coherencia con las respectivas responsividades³ (SiFT) calculadas para cada longitud de onda. Recordemos que había longitudes de onda que recibían intensidades muy similares, independientemente de la distancia en frecuencia que las separaba.

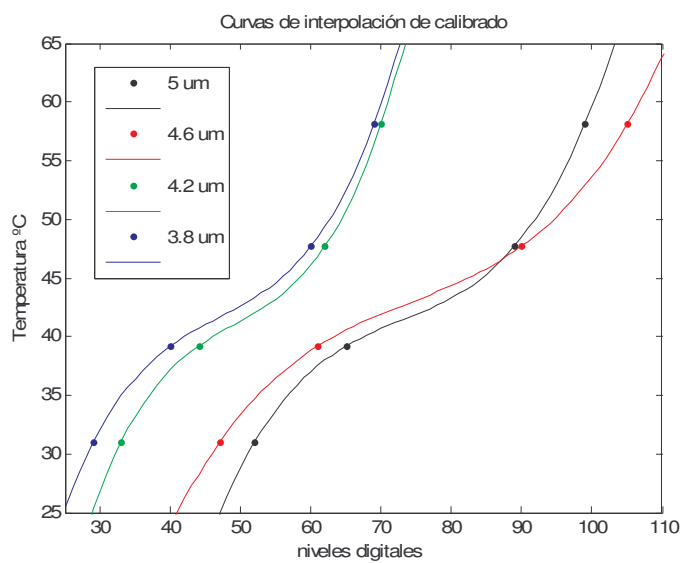


Fig. 4.3: Curvas de interpolación de calibrado a 23m. Con lente IMSS

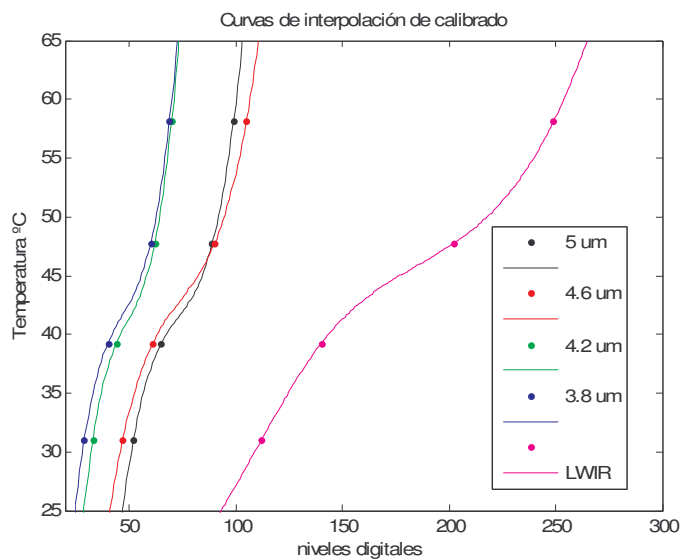


Fig. 4.4: Calibrado a 23 m, algunas longitudes de onda MWIR y cámara LWIR

³ capítulo 3, curvas de SiFT (λ).

4.1.3 Corrección del sistema frente no-homogeneidad y distorsión.

En el capítulo anterior se explicó cómo calibramos las no-homogeneidades del sistema a partir del cuerpo negro frente a la lente IMSS. En el capítulo 0, se introdujo el concepto de distorsión óptica en relación con la lente, resaltando la peculiaridad que tienen ciertos aparatos ópticos con un comportamiento coherente sólo en el centro de la óptica (*sweet spot*).

Se ha comprobado con las referencias cómo principalmente este efecto es más importante en distancias cercanas. En la figura 4.2, para la curva verde y negra, con longitudes de onda menores a 4 μm , o en la tabla 4.3, se aprecia claramente cómo la temperatura de la placa T4 más próxima a los bordes de la imagen y estando a temperatura mayor que la T1 situada en el centro, presenta menor intensidad de radiancia, fenómeno relacionado directamente con la focal. Esto justifica que tengamos que calibrar la lente. En el apéndice II, se incluye el manual de la lente, que dispone de una parte dedicada a la corrección para campo cercano.

La solución que se planteó en el tratamiento posterior de las imágenes es la de almacenar este efecto de distorsión en una matriz de 506 x 640 para cada longitud de onda de 3 a 5 micras. En función de la distancia considerada multiplicamos por la matriz que contiene los datos de la imagen correspondiente, con el fin de comparar entre sí diferentes longitudes de onda, sin este efecto.

4.2 Estimación de la temperatura en el tubo de escape de varios vehículos, a varias distancias a partir de los patrones de calibrado⁴.

La colección de imágenes exteriores que incluye este proyecto se compone de las medidas de fondo sin los blancos, y del sistema de referencia de placas térmicas y las termografías adquiridas, correspondientes a tres blancos diferentes: vehículos de tamaño y combustible diferentes y con dos posibles orientaciones respecto al observador.



Fig. 4.5: Colección de imágenes 100m. Orientación SN⁵

⁴ Emisividad de las placas = 0,90

Determinaremos la evolución de varios ciclos de acelerado, ralentí y parada, para dos de los bloques de imágenes. Tras obtener las curvas de calibración para todas las distancias y posibilidades implementadas, mostraremos un ejemplo de los datos obtenidos para el turismo diesel orientación OE⁶ a 100 m y para la furgoneta diesel orientación SN situada a 23 m.

Se ha seleccionado respectivamente un ciclo de calentamiento del tubo de escape correspondiente al primer caso y un ciclo de enfriamiento hasta la parada en el segundo caso. El procedimiento, no obstante fue sistemático para cada uno de los blancos, su orientación y las distancias consideradas, comprendiendo varias secuencias de encendido, transitorio térmico, y periodos de aceleración y parada, en todas las combinaciones.

Se ha elegido la longitud de onda de 5 μm , ya que se consigue mejor enfoque de las imágenes, y puesto que es el inicio del recorrido de la lente aseguramos estar comparando los datos siempre con la menor deriva mecánica.

En el capítulo anterior se vieron las curvas de SiFT. Al obtener las curvas de calibración en radiancia, donde cada nivel digital asociamos una temperatura, se observa que la pendiente de estas curvas es muy vertical, lo que nos limita la resolución en temperatura, teniendo un rango dinámico bastante estrecho. (Figuras 4.3 y 4.4). La elección de los valores de brillo y contraste en la configuración del sistema, se llevó a cabo teniendo en cuenta que para bajas longitudes de onda había que aumentar el contraste a costa de saturar las imágenes para las longitudes de onda más largas.

4.2.1 Evolución a 100m con interpolación a 5 μm .

A continuación se muestra el registro de temperatura en el tubo de escape de un vehículo turismo situado a 100 m del equipo, primeramente se presentan tres de las imágenes correspondientes a diferentes tiempos.



3 Julio/4Julio

Fig. 4.6: Colección de imágenes 100m. Turismo gasolina orientación OE

⁵ Orientación Sur-Norte

⁶ Oeste-Este

A continuación vemos la curva de calibrado resultante de las referencias presentes en la escena para esta distancia. A partir de estas curvas se estima la temperatura en el tubo de escape y su posterior corrección frente a la emisividad del mismo, considerando ahora el cuerpo negro situado junto a las placas térmicas.

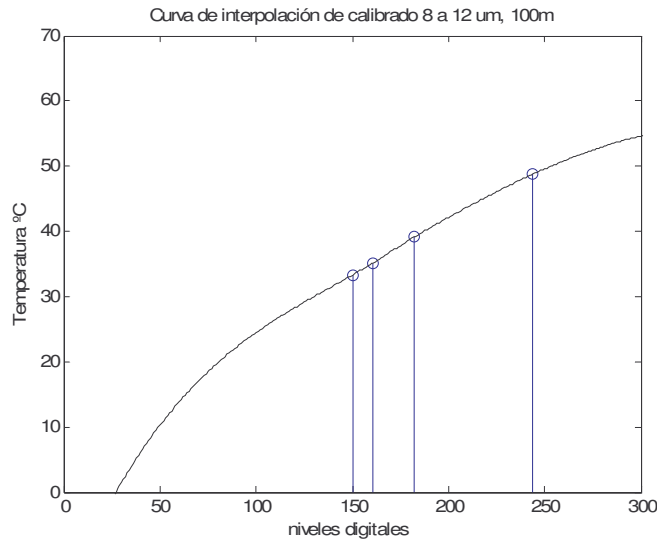


Fig. 4.7: Calibrado de temperatura a 100m, rango 8 a 12 μm .

La figura 4.7 representa la gráfica correspondiente a la curva obtenida a partir de las imágenes registradas con la cámara LWIR. Se muestra también, la curva obtenida con nuestro sistema: figura 4.8 a una longitud de onda de 5 μm , para poner de manifiesto que pese a seguir el mismo tipo de interpolación (primero *chip*, luego cúbica), los diferentes niveles digitales asociados a la radiación de cada referencia distan de un sistema a otro, lo que explica que las curvas de temperatura presentadas seguidamente no encajen en todos sus puntos pese a registrar los mismos datos.

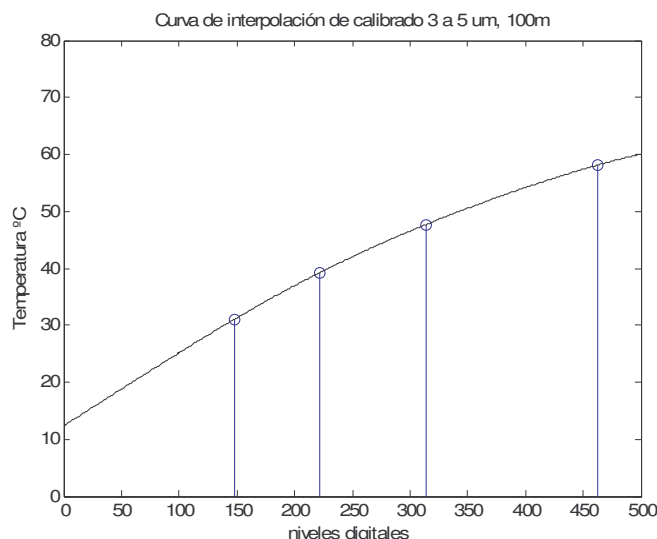


Fig. 4.8: Calibrado de temperatura a 100m, a 5 μm .

Una vez obtenidas las curvas de calibrado a partir de las referencias para cada imagen correspondiente a una longitud de onda de 3.2 μm hasta 5 μm en pasos de 0.2 μm , estas funciones se almacenan como variables para aplicarlas a los diferentes registros de ciclos de acelerado. Se ha seleccionado uno de estos ciclos, realizado el 4

de Julio 07, de 10 a 11 a.m. donde se muestra el arranque y el mantenimiento en ralentí del turismo de gasolina en la orientación que se observa en las imágenes anteriores. (OE)

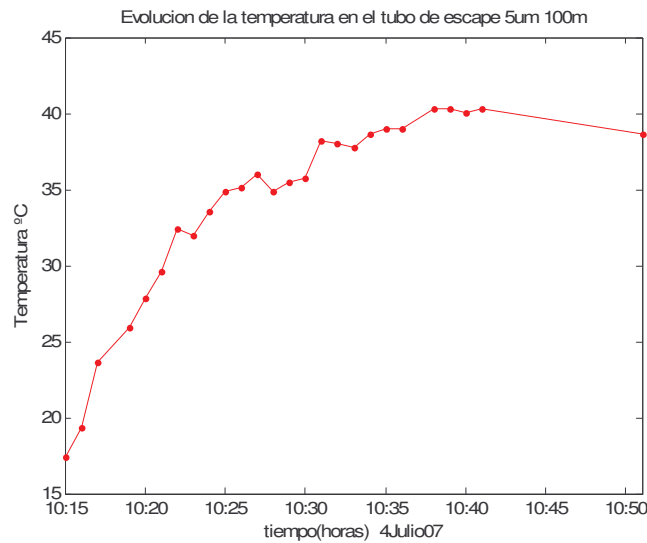


Fig. 4.9: Evolución de la Temperatura en el tubo de escape. 100m a 5 µm.

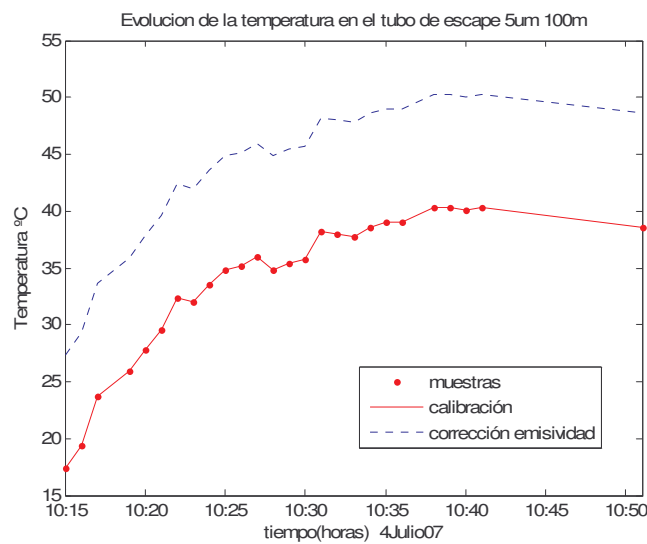


Fig. 4.10: Corrección en emisividad de la evolución T°C en tubo de escape.

La corrección en emisividad ha sido posible considerando que las placas tienen una emisividad del 90%, y a partir de la radiación del cuerpo negro que estimamos como ideal con emisividad unidad. Por otra parte, con un termómetro de precisión se registraron a diferentes temperaturas varias muestras para contrastar los datos dados por las termografías. (tablas en apéndice)

4.2.2 Evolución de la temperatura en el tubo a 23 m con interpolación a 5 µm⁷.

Este apartado es similar al anterior salvo por la variación de la distancia de observación, siendo ahora a 23 m. Tanto el blanco como las referencias se encuentran a esta distancia. Sin embargo la toma del tubo de escape y de las miras no es simultánea ya que ambos no eran abarcados por el campo de visión del sistema.

⁷ ficheros HK_FC de 12 a 13h

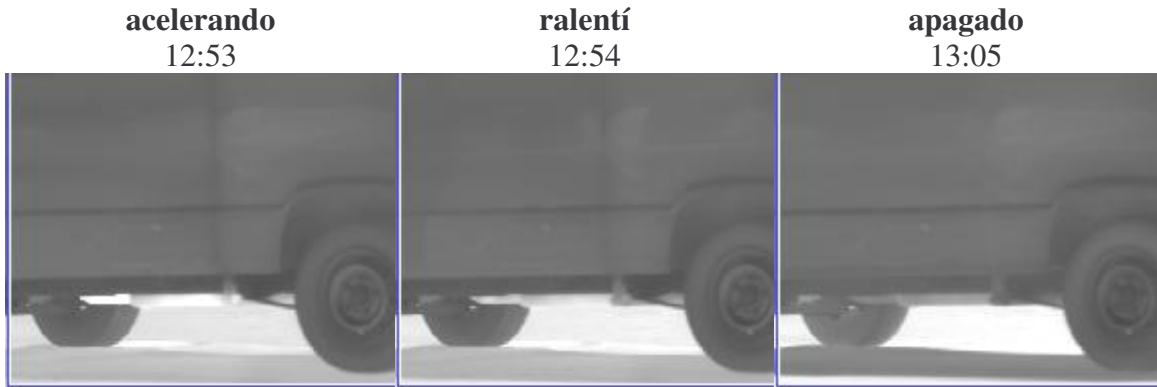


Fig. 4.11: Colección de imágenes 23m. Furgoneta gasoil orientación SN

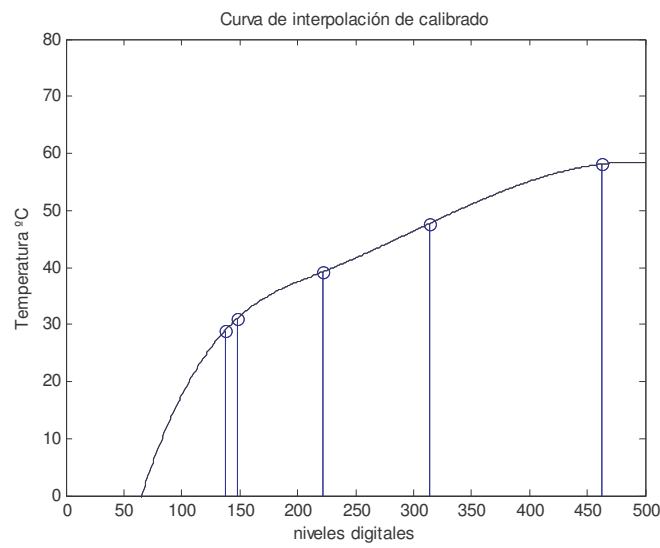


Fig. 4.12: Calibrado de temperatura a 23m, a 5 μm .

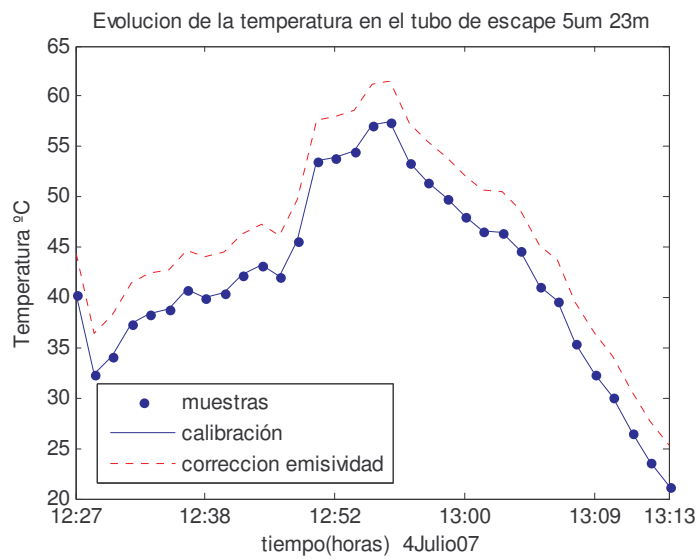


Fig. 4.13: Evolución y corrección de la T°C en el tubo de escape. 23 m a 5 μm .

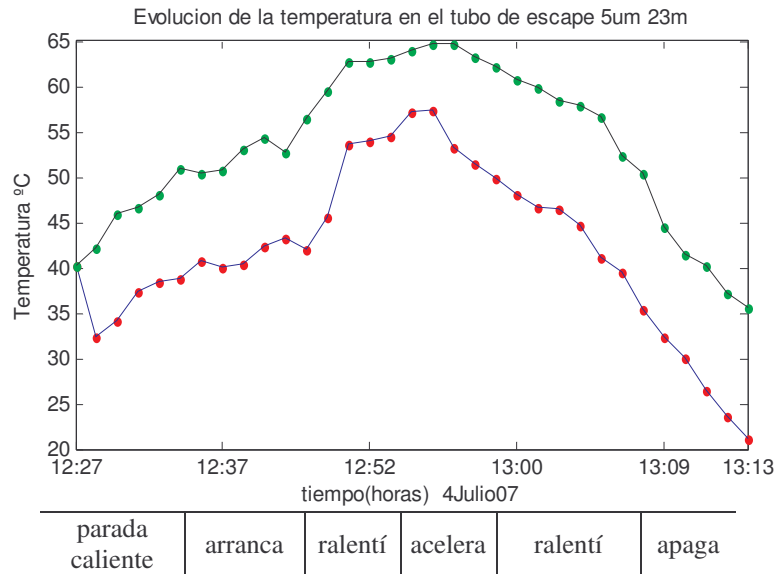


Fig. 4.14: Comparativa de los registros MWIR a 5 μm. y la cámara LWIR.

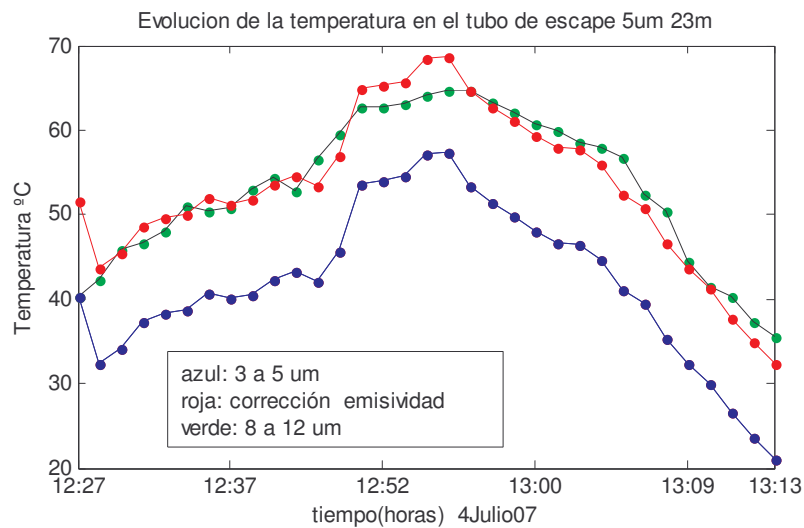


Fig. 4.15: Evolución de la Temperatura corregida a 23 m a 5 μm

4.3 Estimación de la emisividad del tubo de escape simulado, cuerpo gris

El método de calcular la emisividad de un material, en la práctica es en general por comparación con otro material de emisividad conocida, conocida también la temperatura real. En este caso se registraron a diferentes ciclos, varias muestras para comparar con los datos, de las termografías. Se midió con un termómetro de precisión un rango de temperaturas con el motor arrancado con una media de **53 °C**.

A continuación se intenta averiguar la emisividad del tubo a partir de la ley de Planck y la curva de Emitancia M_λ para el cuerpo negro a la temperatura en que se encuentra.

En primer lugar es necesario estimar la temperatura para el tubo de escape, a través de la curva de calibración extraída a partir de las miras.

	TUBO	BB	T1	T2	T3	T4
T°C	50.4°	20°	48.8°	39.1°	35.2°	30°
ND	0.92	0.31	0.81	0.59	0.53	0.51
X	155	381	402	426	449	473
Y	274	226	227	227	227	227

Tabla 4.4: Calibrado a partir de las referencias. Curva interpolada *pchip*

Ley de Planck:

$$M_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \quad (4.2)$$

$$c_1 = 3.741832 \times 10^4 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4 \text{]}$$

$$c_2 = 14387.86 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Despejando esta ecuación para $\lambda = 5 \text{ } \mu\text{m}$, $T(\text{K}) = 50.4 + 273 = 323.4 \text{ K}$. obtenemos que un cuerpo negro con estas características tendría una emitancia:

$$M_{T \lambda=5\mu\text{m}} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot / \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$$

El cuerpo negro a 20° si lo extrapolamos a la curva de calibración de las miras, para compararlo con el tubo de escape nos daría un valor de 30°, $T(30^\circ) = 303 \text{ K}$. Y posteriormente multiplicando por la emisividad de las miras obtendremos la real, ya que la calibración se ha realizado sobre las placas que tienen una emisividad inferior a la unidad.

$$M_{BB \lambda=5\mu\text{m}} = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot / \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$$

Relacionamos ambas emitancias con la emisividad:

$$\epsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{BB}(\lambda, T)} \quad (4.3)$$

Para estas temperaturas, considerando una longitud de onda de 5 micras simulamos la curva de cuerpo negro y relacionamos la emitancia que tendría un cuerpo negro ideal con la emisividad del tubo de escape.

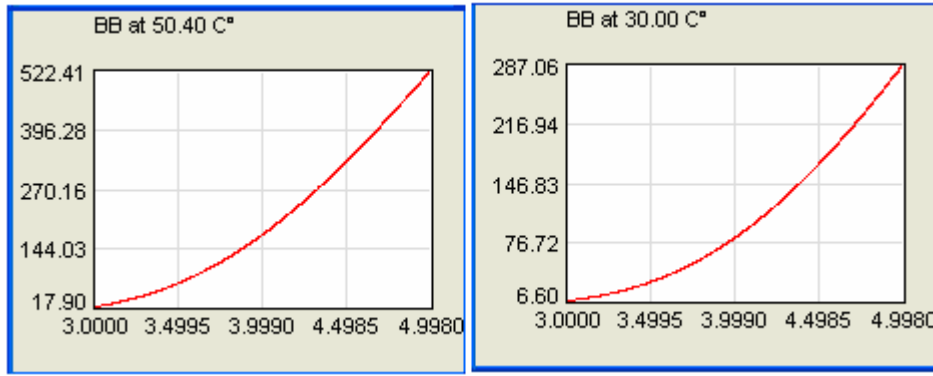


Fig. 4.16: Curva de Radiancia de cuerpo negro emitiendo a 50.4°C

$$\epsilon_{TUBO}(\lambda = 5, T = 50.4^\circ) = \epsilon_{TUBO}(\lambda = 5, T = 30^\circ)$$

$$\begin{aligned}
 M_{TUBO}(\lambda = 5, T = 50.4^\circ) &= \epsilon_{TUBO} \cdot M_{BB}(\lambda = 5, T = 50.4^\circ) \\
 M_{BB}(\lambda = 5, T = 30^\circ) &= \epsilon_{BB} \cdot M_{BB}(\lambda = 5, T = 30^\circ)
 \end{aligned}
 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{M_{TUBO}(\lambda = 5, T = 50.4^\circ)}{M_{BB}(\lambda = 5, T = 30^\circ)} \Big|_{\frac{W}{m^2 \cdot \mu m}} = \frac{\epsilon_{TUBO} \cdot M_{BB}(\lambda = 5, T = 50.4^\circ)}{\epsilon_{BB} \cdot M_{BB}(\lambda = 5, T = 30^\circ)} \Big|_{ND} \Rightarrow \{\epsilon_{BB} = 1\}$$

$$\Rightarrow \epsilon_{TUBO} = \frac{16 \cdot 10^{-4}}{8.9 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{287}{522.4} = 0.97$$

$$\epsilon_{TUBO}(real) = \epsilon_{TUBO}(miras) \cdot \epsilon_{MIRAS} = 0.97 * 0.90 = \mathbf{0.87}$$

Ciclo acelerando

10:41

Emisividades

Acero, galvanizado	0,28
Acero, muy oxidado	0,88
Acero, recién laminado	0,24
Acero, superficie rugosa	0,96
Acero, rojo oxidado	0,69
Acero, chapa, niquelado	0,11
Acero, chapa, laminado	0,56

Fig. 4.17 vehículo determinando su emisividad. Tabla emisividades del Acero

Cabe recordar que nuestras aproximaciones tienen valores coherentes porque las placas tienen una temperatura aproximada a la medición, si no el calibrado no podría considerarse correcto.

Por otra parte, era de esperar un valor de la emisividad elevado ya que la temperatura estimada dista sólo unos grados de la real medida con el termómetro.

4.4. Determinación del efecto atmosférico en las medidas exteriores.

Las imágenes tomadas en el exterior con la cámara IR y el sistema hiperespectral IMSS ensamblado, distan de las analizadas en el laboratorio durante la calibración, principalmente por la presencia de la atmósfera entre el blanco y el sistema infrarrojo. Resulta primordial modelizar la aportación atmosférica como una fuente de emisión y absorción, para poder estudiar y corregir su efecto en la radiación capturada.

Además de analizar parámetros como la Transmitancia y la Absorción espectral en las medidas de campo; buscamos varios espectros de los gases que se liberan en la combustión, utilizando un software de simulación que recrease las condiciones ambientales y los parámetros de las medidas en las que realizamos la adquisición exterior.

Los códigos disponibles y su resolución, se listan a continuación:

LOWTRAN	20 cm ⁻¹
MODTRAN	2 cm ⁻¹
FASCODE	0.04 cm ⁻¹

Según el manual del HypatII.exe, la resolución espectral del sistema es 0.01 μm; por tanto para ese paso disponemos de una imagen con su correspondiente espectro. El LOWTRAN es un código de baja resolución espectral (20 cm⁻¹) lo que supone que en una longitud de onda de 4 μm la resolución es aproximadamente 0.03 μm. Esto implica que cualquier espectro medido con la lente IMSS no se va a parecer mucho al calculado a no ser que se combinen varias de las imágenes en una sola. Por ejemplo tomando imágenes de 3 en 3, el resultado tendría, al integrar, una resolución de 0.03 μm y entonces la comparación sería más fiable.

La otra posibilidad es usar el software MODTRAN ya que este código tiene una resolución de 2 cm⁻¹ (aproximadamente 0.003 μm para una longitud de onda de 4 μm). En este caso como la resolución del cálculo es mayor que la de la medida, es posible el análisis de imágenes individuales.

En el capítulo de calibración, resultaba interesante promediar varias imágenes con el fin de obtener parámetros como ruido espectral, espacial...etc., al igual que en las medidas de radiancia con cuerpos negros, que integramos una colección de imágenes en ciertas bandas. Sin embargo, en este capítulo hemos analizado de forma separada imagen por imagen, tanto para la obtención de la temperatura real en unas determinadas zonas, como en la determinación del espectro de los gases de combustión, de los vehículos utilizados como blanco.

Es por eso, que se eligió el código MODTRAN para la obtención de varias gráficas de simulaciones del entorno de medida.

4.4.1 Descripción del Software.

Justificado por la resolución necesaria, el programa de simulación elegido es el MODTRAN⁸ 4 que se utiliza principalmente para analizar las características de propagación atmosférica en diferentes bandas. Es un código patentado por *The Air Force Research Lab, Space Vehicles Directorate* en colaboración con *Spectral Sciences Inc.*

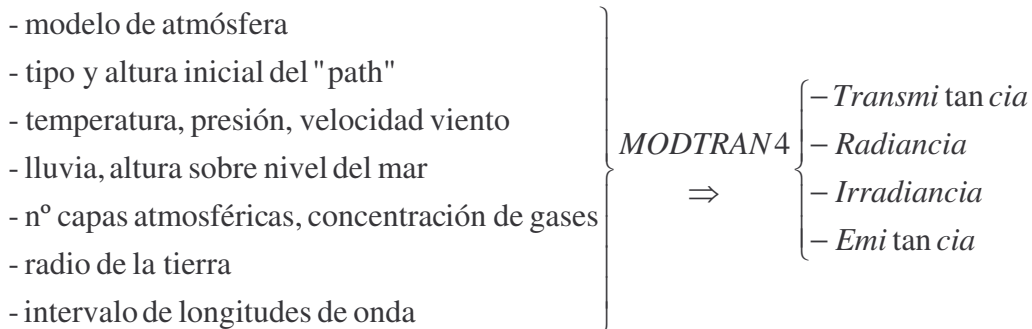
Su desarrollo se debió a la necesidad de conseguir mayor resolución y capacidad que las que proporcionaba el código LOWTRAN. El MODTRAN añadió la posibilidad de parametrizar bandas a nivel molecular e incorporó todas las ventajas de las diferentes versiones del código anterior incluidas las funciones de geometría refractiva esférica lunar y solar, Scattering (Rayleigh, Mie, individual y múltiple) y perfiles por defecto (gases, aerosoles, nubes, niebla y lluvia).

A diferencia del código FASCODE, este software ha sido ampliamente probado, verificado y validado línea por línea. La última comprobación de sus prestaciones ha sido medida usando datos hiperspectrales visibles y en el infrarrojo cercano con el sistema AVIRIS.

Este código de simulación permite estimar la cantidad total de energía transmitida a través de la atmósfera considerando los efectos de atenuación y dispersión de energía, permitiendo modelar la atmósfera en la cual van a trabajar las cámaras.

El programa tiene como parámetros de entrada fenómenos meteorológicos como velocidad de viento, lluvia, nubosidad, temperatura, presión, etc.

datos de entrada



4.4.1.1 Longitud de onda en términos de número de onda.

El motivo principal de selección de un software u otro, para la simulación de espectros, como comentamos al inicio de este apartado es la resolución en términos de longitudes de onda de las imágenes. El programa trabaja en cm^{-1} , por tanto al seleccionar un paso de 0,01 los datos están próximos pero no llevan ese salto. Es necesario coger el más próximo o bien interpolar.

⁸ MODerate spectral resolution atmospheric TRANSmittance algorithm and computer model

Para entender la equivalencia, se hace necesaria la aclaración del cambio necesario de longitud de onda, a términos de número de onda.

Por definición:

$$\lambda(\text{micras}) = \frac{10^4}{\eta(\text{cm}^{-1})} \quad (4.4)$$

en magnitudes como la radiancia el cambio de unidades no es inmediato:

$$R_\lambda d\lambda = R_\eta d\eta \quad \Rightarrow \quad R_\lambda = R_\eta \frac{d\eta}{d\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\eta}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} 10^4$$

sustituyendo se tiene :

$$R_\lambda = R_\eta \frac{1}{\lambda_{\text{micras}}^2} 10^4, \quad R_\eta = \frac{R_\lambda \lambda_{\text{micras}}^2}{10^4} \quad (4.5)$$

4.4.2 Parámetros utilizados en las simulaciones

Se han simulado 4 casos, empleando datos de los días 3 al 5 de julio de 2007 de la estación meteorológica, e incluyendo en el programa parámetros como la elevación del lugar, altitud, rango de frecuencias, visibilidad... etc.

- Trayectoria horizontal: 23 y 100 m
- Atmósfera estándar: *midlatitude summer*
- Visibilidad⁹: se toma el dato medio de los datos medidos: 11744 m
- Altitud CIDA : 730 m (dato GPS)
- Frecuencias: 3 a 5 micras, incremento de 0.01 micra
- Tipo : urbano de visibilidad 5 km
- Corrección estacional: *spring-summer*
 - a. SIN AEROSOLES
 - b. CON AEROSOLES

⁹ el modelo de aerosoles lleva una visibilidad asociada, pero se modifica manualmente el área, siendo esa la considerada en nuestro caso de estudio.

4.4.3 Medidas de transmitancia total

En el apartado de introducción, se vio cómo la transmitancia espectral es un concepto que responde a una función variable con las condiciones ambientales, meteorológicas, y circunstanciales.

Simulamos varios casos, para ver cómo afectan en las medidas la distancia, y los efectos de las partículas en suspensión de la atmósfera.

En las capas altas de la atmósfera la atenuación más fuerte que sufre la radiación infrarroja es debido a la absorción de gases, mientras que en capas bajas, donde operan las cámaras, el mayor atenuante es la dispersión debida a las partículas en suspensión; especialmente en zonas con humedad baja.

El fenómeno predominante en ese caso es la dispersión.

En entornos marinos los aerosoles pueden llegar a alcanzar dimensiones importantes ya que las partículas de sal se rodean a su vez de agua lo cual hace aumentar su tamaño considerablemente. Sin embargo, en el entorno urbano en que realizamos las pruebas, el objetivo de comparar el efecto de los aerosoles fue meramente comparativo.

4.4.3.1 Cálculo de transmitancia en la Trayectoria horizontal de 100m de longitud

De los 4 casos que simulamos con el software MODTRAN, dos corresponden a la trayectoria de distancia fija de 100 m, y los otros dos para 23 m; que son las distancias a las que hemos calibrado en Radiancia el sistema en los apartados anteriores de este capítulo. A continuación se presentan las gráficas correspondientes a una distancia de 100 m, y considerando la presencia de los aerosoles en la atmósfera.

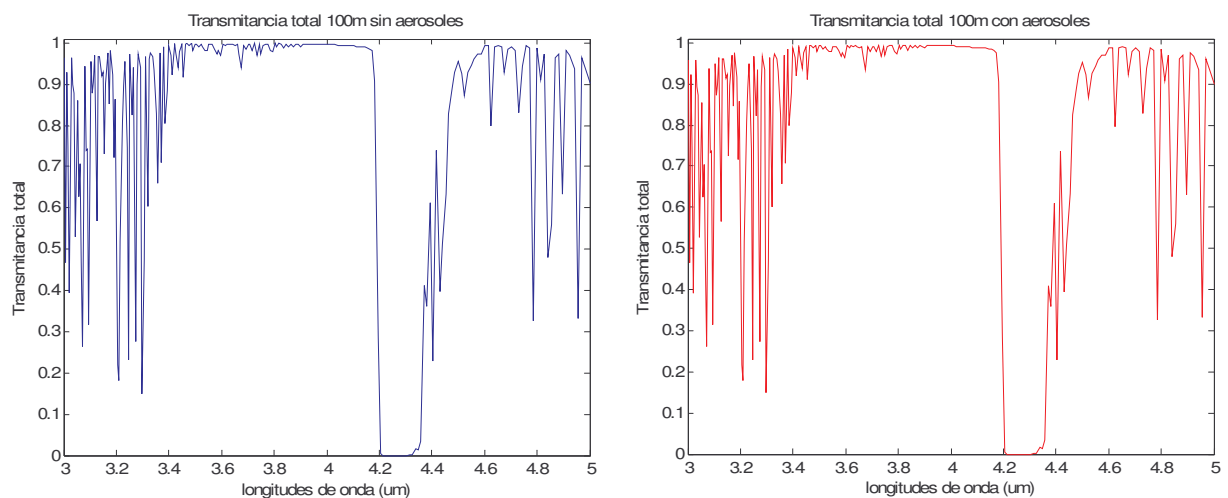


Fig. 4.18: Transmitancia de la atmósfera sin/con aerosoles a 100m

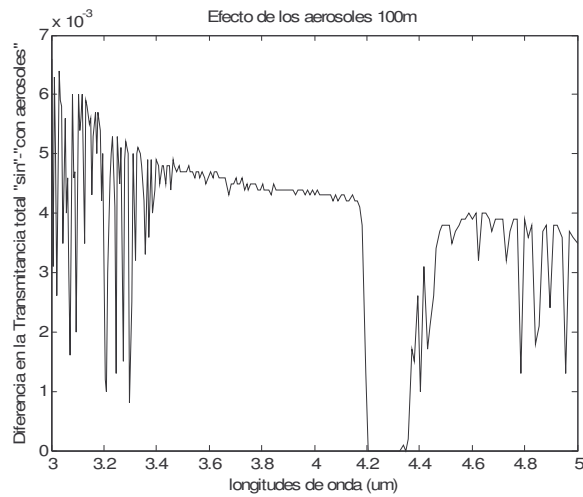


Fig. 4.19: Diferencia entre aerosoles y sin ellos para la transmitancia a 100m.

4.4.3.2 Calculo de transmitancia en la Trayectoria horizontal de 23m de longitud

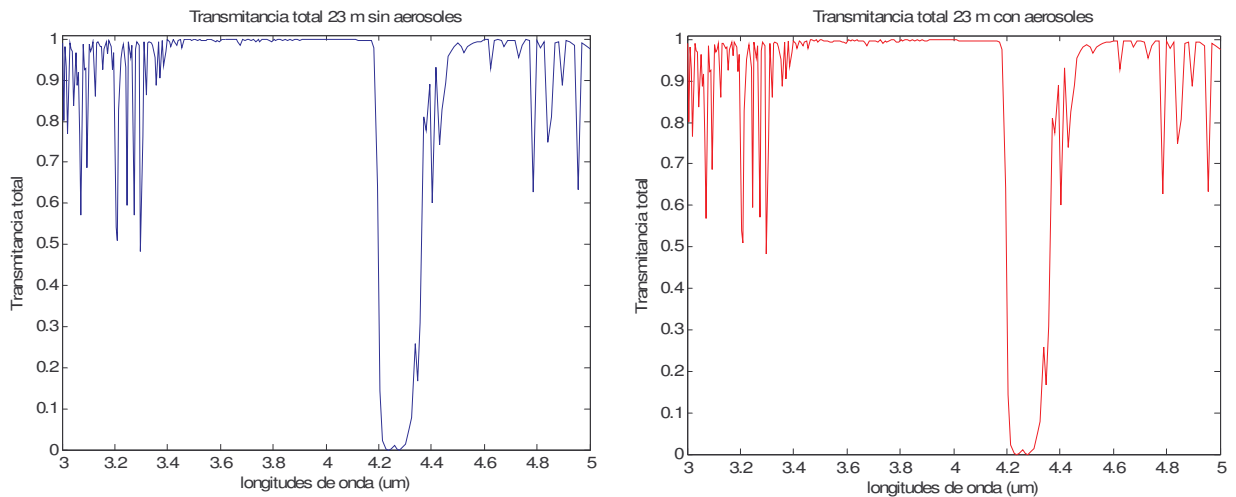


Fig. 4.20: Transmitancia a 23m sin aerosoles / con aerosoles

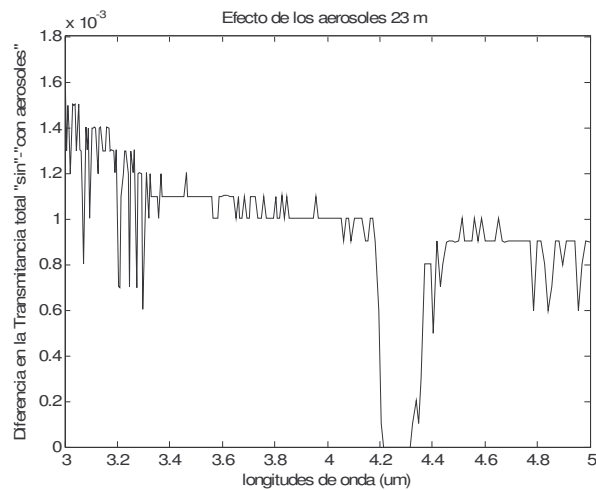


Fig. 4.21: Diferencia efecto aerosoles en la Transmitancia a 23 m.

4.4.3.3 Comparativa de la transmitancia con la distancia al blanco.

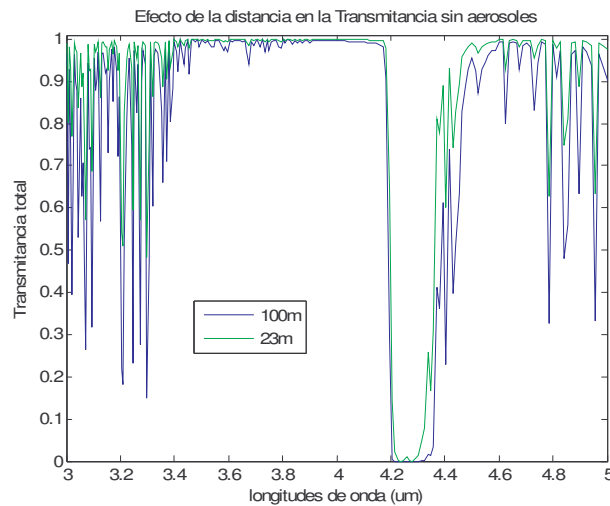


Fig. 4.22: Comparativa de Transmitancia sin aerosoles, 100m y 23m.

Comparando la Transmitancia de ambas trayectorias con distintas distancias al blanco vemos que para algunas longitudes de onda, esta diferencia debería considerarse por la posibilidad de que dicho efecto enmascare la presencia de picos muy estrechos como es la respuesta espectral de los gases.

4.5 Espectros de los gases de combustión extraídos de la simulación.

De las simulaciones espectrales, nos interesan principalmente aquellos gases que se generan en la combustión y su radiación, que al atravesar la atmósfera se ve afectada por sus características de transmisión. Uno de los objetivos de este proyecto era precisamente el de detectar ciertas partículas y gases producto de la combustión, principalmente CO₂.

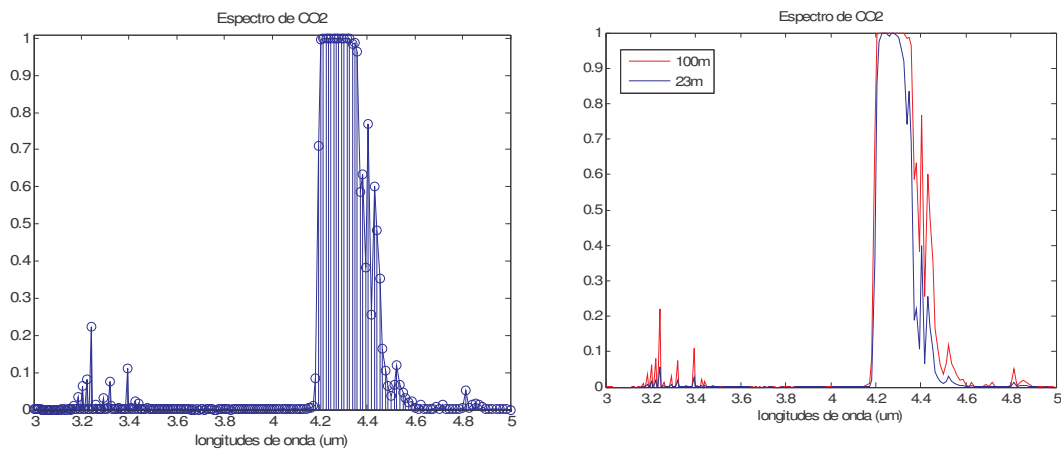


Fig. 4.23: Curvas del pico de absorción de CO₂ obtenidas en simulación.

El efecto de CO₂ de absorción se cuantifica con la transmitancia, estas gráficas nos sirven para saber en qué longitudes de onda no diseñar sensores ya que el CO₂ de la atmósfera absorbe toda la señal.

La intención de simular con el MODTRAN los espectros, era la de obtener los picos de emisión del gas para cotejarlos con las firmas espectrales de los motores analizados en las imágenes. La presencia de radiación a determinadas longitudes de onda sería el patrón de detección de estos gases. Conociendo los espectros de emisión a diferentes temperaturas, y sabiendo que se desplazan en función de éstas, se pretendía encontrar en algunas de las imágenes hiperespectrales que correspondieran a estas longitudes de onda. Ha resultado muy difícil para estas condiciones. La figura 4.24 muestra una curva del espectro de emisión de CO₂, obtenido de la literatura, ya que con el Modtran no da como salida las curvas de emisión que esperábamos.

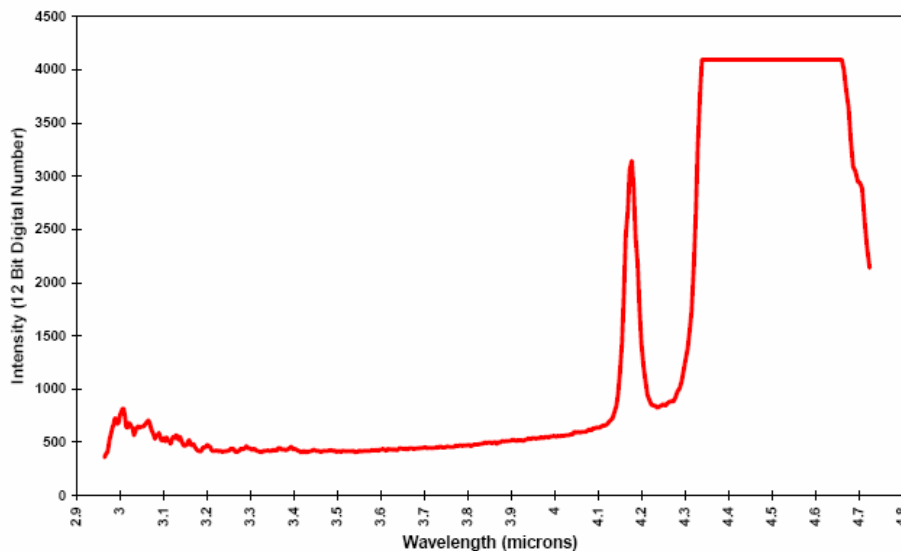


Fig. 4.24: Espectro de emisión de CO₂

4.6 Aplicación de la técnica de Fusión de imágenes en la determinación de picos de gases en el tubo de escape de varios vehículos.

Una imagen fusionada es una termografía no real, que resulta más intuitiva para el observador. Se desarrollan diversas técnicas de fusión en el tratamiento de imágenes, para mejorar la utilidad y aplicaciones de las mismas. En las situaciones en las que el entorno cuenta con fuertes contrastes, zonas frías y calientes, es especialmente útil la aplicación de esta técnica sobre ciertas partes de cada imagen, obteniendo una imagen final con más información que cada una de ellas por separado.

La **técnica HDR (o HDRI, High Dynamic Range Imaging)** es un método para procesar imágenes que busca abarcar el mayor rango de niveles de exposición en todas las zonas, incrementando el rango dinámico de las mismas. Esto se consigue mediante la mezcla de varias termografías de la misma imagen con diferentes exposiciones. En fotografía la técnica del *bracketing* u horquillado sirve para tomar varias imágenes con un fuerte contraste de luces y sombras y posteriormente fusionarlas en una sola, cogiendo lo mejor de ellas, y aumentando el rango dinámico de la imagen resultante, lo que se conoce como "**Digital blending**". Escalándolo a la tecnología infrarroja, la fusión se puede obtener a partir de imágenes donde la configuración del tiempo de integración sea variable, los niveles de brillo y contraste, etc. lo que nos permite disponer de fotogramas con muy diversa información.

Para facilitar el uso de estas técnicas, se ha implementado un algoritmo dedicado al procesado de las imágenes¹⁰ hiperespectrales, capturadas con la lente IMSS.

4.6.1 Técnicas de fusión de imágenes

El objetivo de las técnicas de fusión de imágenes es integrar de una forma coherente, información procedente de diferentes imágenes, de tal forma que la imagen final fusionada conserve la información más relevante de las imágenes fuentes.

En la actualidad se dispone de un gran número de metodologías y algoritmos para la fusión de imágenes ópticas en general, siendo las más utilizadas las basadas en diferentes transformadas. Algunas son muy sencillas desde un punto de vista conceptual, como las metodologías basadas en la transformada de Brovey, el Análisis de Componentes Principales o la transformada IHS (intensidad, brillo y saturación).

Sin embargo, estas metodologías proporcionan imágenes fusionadas cuyo color presenta considerables distorsiones respecto al color de las imágenes multispectrales originales, lo que impide su uso por ejemplo en la detección de cambios.

Por otro lado, existe un elevado número de métodos basados en técnicas de análisis multirresolución, que utilizan fundamentalmente la Transformada Discreta Wavelet (TDW). En general estos métodos proporcionan una mínima distorsión del color de las imágenes fusionadas respecto de la imagen multispectral, superior a las técnicas descritas más arriba, pero no permiten controlar el compromiso entre la calidad espacial y la espectral de las imágenes fusionadas.

4.6.2 Aplicación de fusión de imágenes infrarrojas hiperespectrales

Se desarrolló una aplicación, dentro de la herramienta, para fusionar varias imágenes tomadas en el exterior, a partir de otras imágenes seleccionadas. De una de ellas nos interesaba especialmente el fondo, donde disponemos de mucha información del asfalto, aunque el resto de la imagen está oscura. Las otras, sin embargo, contienen el blanco y diferentes ciclos del motor, teniendo zonas calientes que sólo se muestran en algunas de ellas. Al comparar imágenes tomadas sin control automático de ganancia, siendo los valores de brillo y contraste prefijados y manteniéndolos constantes, para diferentes longitudes de onda, aparecen zonas sobreexpuestas, disponiendo de mucha más información en la parte de reflejos y zonas calientes.

La idea primordial era comparar imágenes a diferentes longitudes de onda. La limitación de esta técnica se basa en su propia definición ya que para fusionar imágenes, éstas deben ser exactamente iguales, y estar alineadas. A lo largo de este proyecto se ha explicado claramente, como la tecnología empleada, captura secuencialmente imágenes de un escenario a diferentes longitudes de onda, variando la focal con que se capturan. Esto implica, que las imágenes sean sometidas a un efecto de magnificación que además está sumado a un desplazamiento en la alineación de las mismas, fruto de la propia óptica. Configurar y calibrar el sistema para considerar este efecto y tener toda la colección de datos hiperespectrales ha sido el objetivo principal de la caracterización.

¹⁰ imágenes ficheros 050707_hora_frame.bmp

4.6.2.1 Colección de datos hiperespectrales procesados

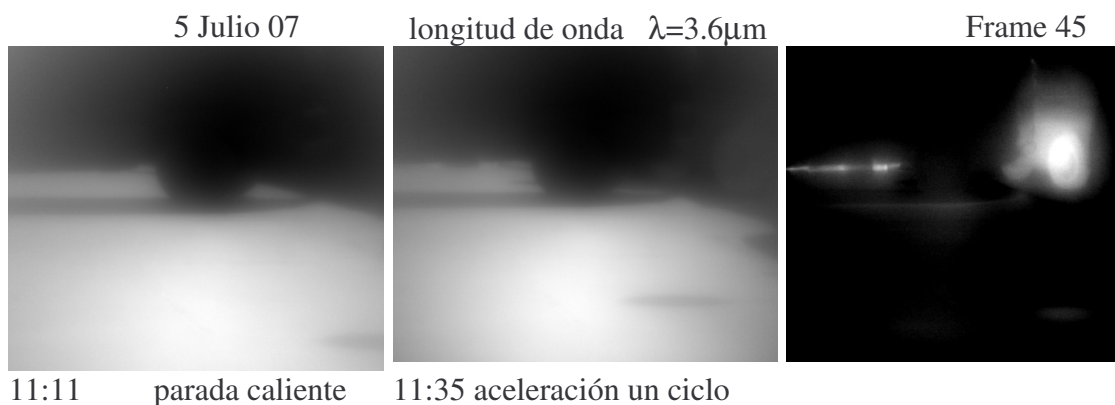
A continuación se introducen algunas de las imágenes que se han fusionado. En primer lugar se presenta el escenario en visible sobre el que se tomaron las imágenes infrarrojas a diferentes longitudes de onda y con varios ciclos de aceleración del motor.



Fig. 4.25: Imágenes en visible de la zona estudiada. 23m.

Anteriormente, en este capítulo, se han incluido imágenes correspondientes a una distancia de 100 m, con otros vehículos y diferentes orientaciones, además de los cálculos de temperatura en sus respectivos tubos de escape. En esta sección, se han seleccionado algunas longitudes de onda representativas por la variación de la imagen y dos secuencias capturadas con el motor a pleno rendimiento y parado, a temperatura máxima y mínima, respectivamente.

La figura 4.26 muestra 3 longitudes de onda con dos imágenes consideradas fría y caliente y la resta de ambas. Los siguientes dos apartados se encargaran de aplicar algunos algoritmos de fusión sobre éstas imágenes y otras tramas capturadas en bandas próximas.



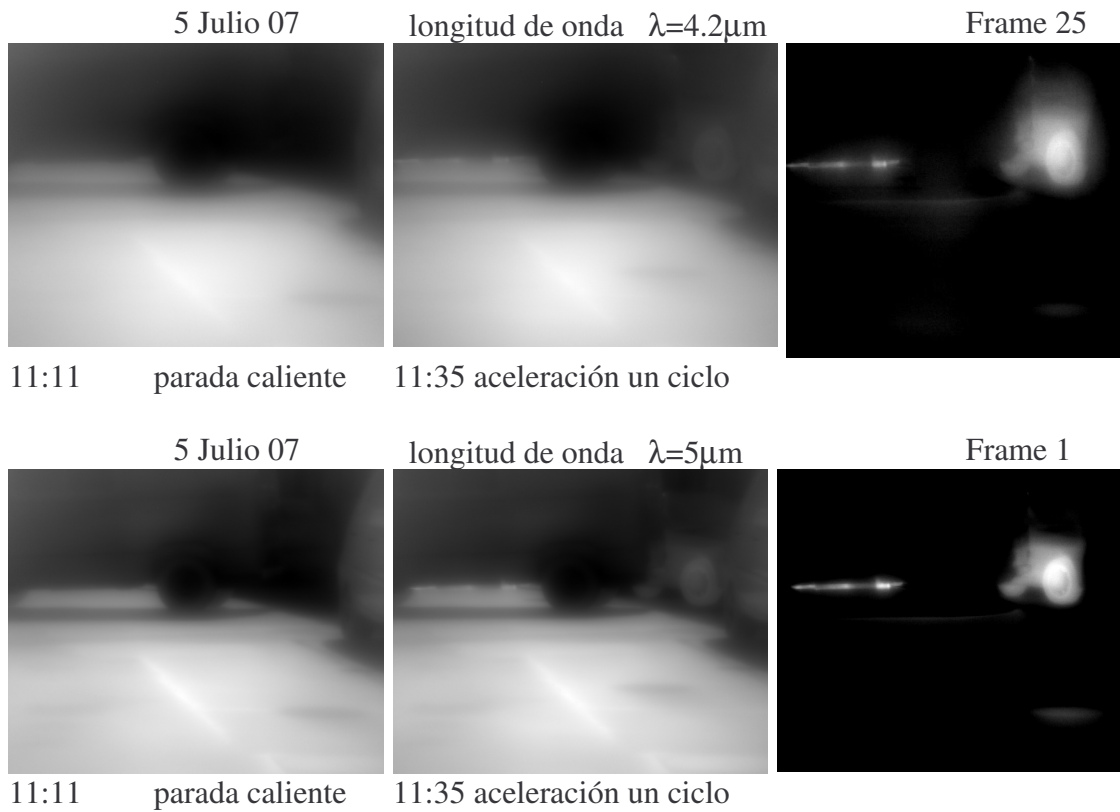


Fig. 4.26: Imágenes fusionadas en temperatura y longitud de onda.

Las imágenes infrarrojas resultan más intuitivas para el observador cuando las zonas calientes las asociamos a tonos entorno al color rojo, y las zonas frías al azul. Con esta filosofía se asignaron las paletas de colores de las imágenes fusionadas.

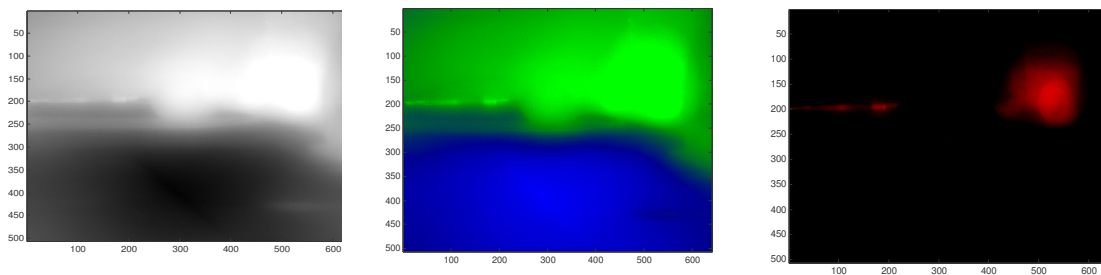


Fig. 4.27: Aplicación de fusión de imágenes a diferentes temperaturas

4.6.2.2 Fusión de imágenes de diferentes longitudes de onda

Este algoritmo se implementó con la intención de localizar cambios en longitudes de onda muy próximas, debido a la presencia de gases. La respuesta espectral de éstos se sitúa centrada en una longitud de onda concreta y en el resto, su aportación es mínima, por ello el incremento de los niveles de señal en la zona de emisión (tubo de escape) implicaría la detección del gas asociado a esa longitud de onda.

En la figura 4.28 se muestran 3 longitudes de onda correspondientes a 4, 4.1 y 4.2 μm , rango en el que esperamos detectar CO_2 . La función desarrollada se probó incluso en pasos de menor longitud de onda.

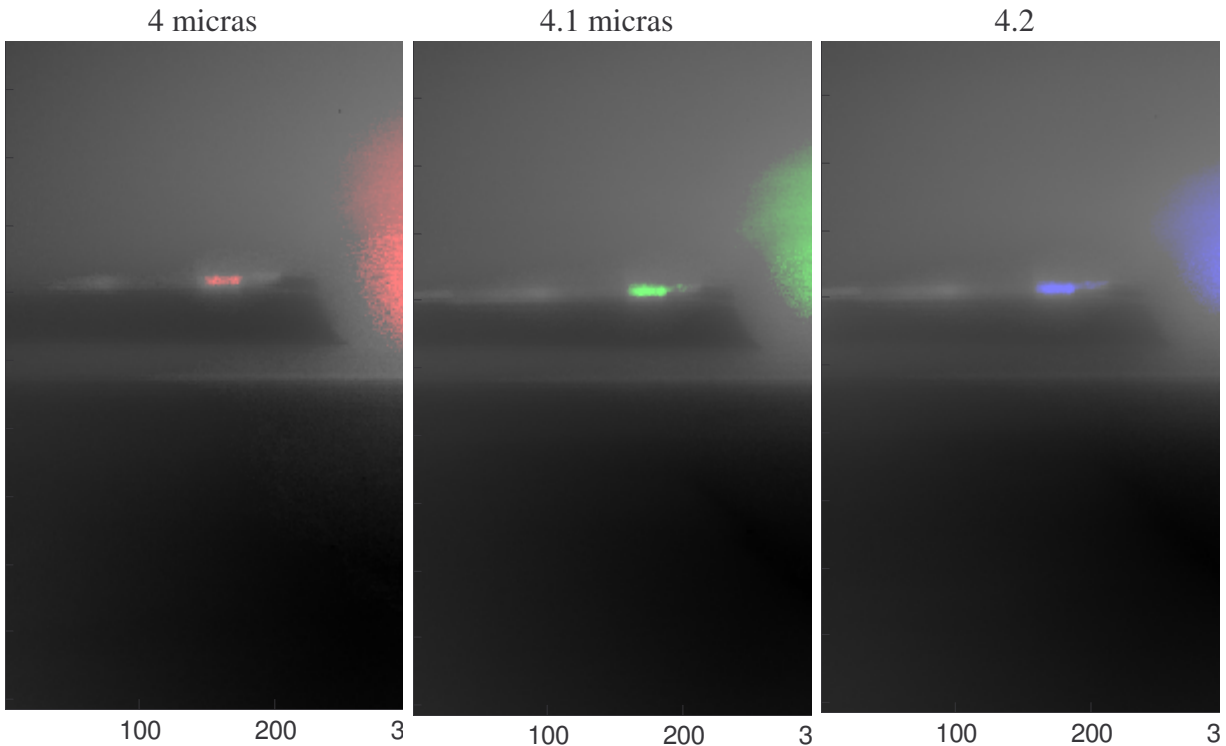


Fig. 4.28: Asignación de bandas de color a tres longitudes de onda distintas.

Para realizar la fusión en longitudes de onda, se consideró una imagen “amplificada” en las zonas calientes a partir de la composición con la imagen en frío. Esta imagen fue mapeada en tres colores diferentes: rojo, verde y azul repartiendo el espectro de cada longitud de onda, en todo el rango de cada uno de ellos. Una forma muy clara de entender el proceso sufrido por las imágenes es a través de la información presente en sus histogramas. Seguidamente se muestran algunos de los histogramas asociados a cada imagen y cómo se han transformado, para conseguir repartir la información correspondiente a las tres imágenes de diferente longitud de onda, en el rango de $[0,255]$ niveles.

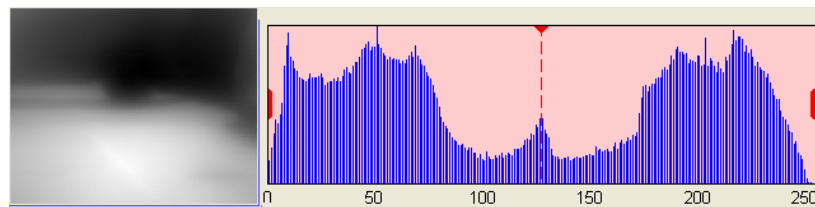


Fig. 4.29: Histograma de la imagen en frío. $\lambda=4\mu\text{m}$.

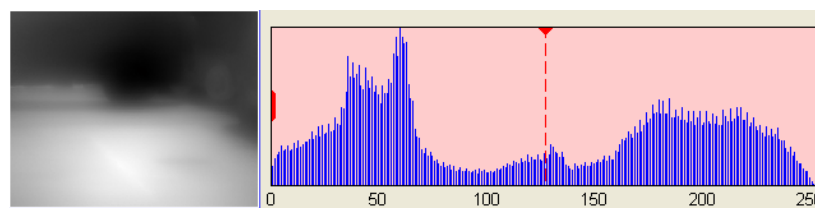


Fig. 4.30: Histograma de la imagen con aceleración ciclo completo. $\lambda=4\mu\text{m}$.

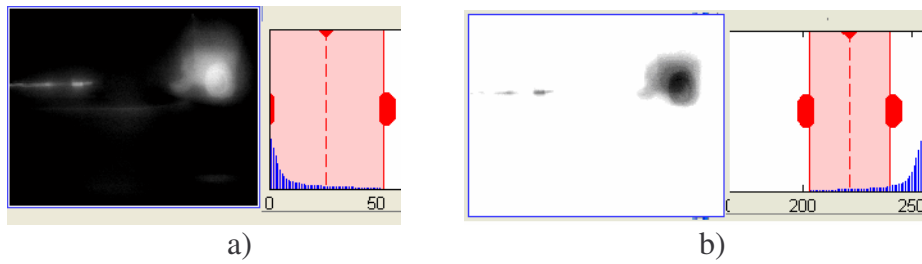


Fig. 4.31: a) Histogramas e imágenes diferencia. b) Imagen inversa.

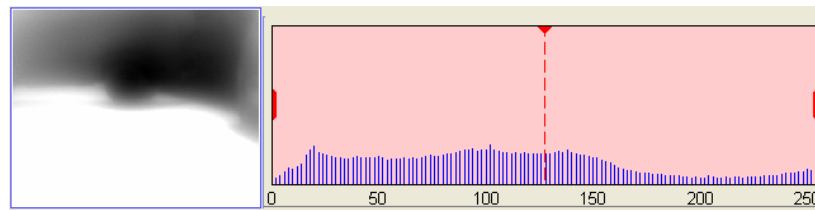


Fig. 4.32: Histograma de la imagen multiplicada por un escalar.

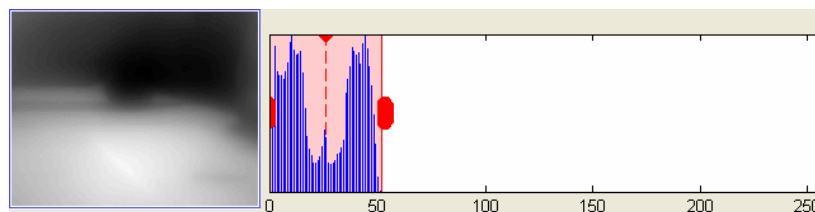


Fig. 4.33: Histograma de la imagen dividida $M4=M1./5$

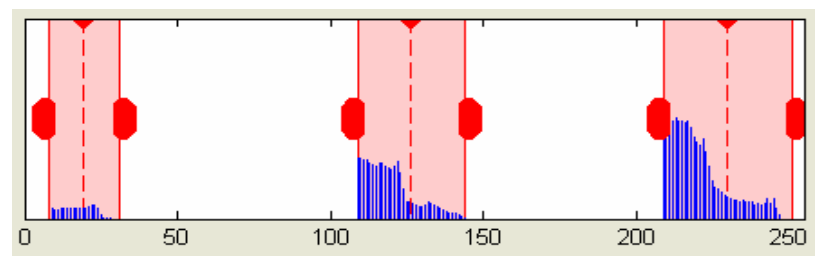


Fig. 4.34: Histograma del mapeado de la imagen a fusionar.

En la figura 4.34 se muestra el resultado del histograma que se le aplicará a la imagen fusionada para mapearla en los tres rangos de colores cada uno correspondiente a una longitud de onda distinta. En primer lugar se traslada la información de cada imagen a un rango: rojo [0,50], verde [100,150] y azul [200,250]. El desenfoque de la longitud de onda entorno a $3.6 \mu\text{m}$ se pone de manifiesto con la respuesta tan estrecha del histograma y tan plana.

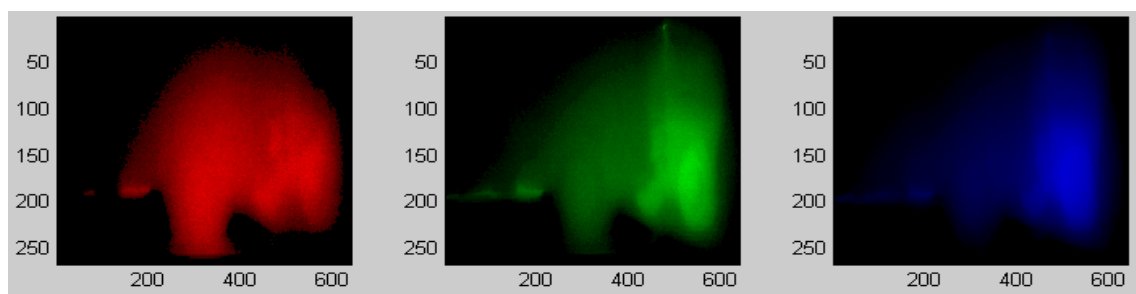


Fig.4.35: Imágenes mapeadas R($3.6\mu\text{m}$) G($4\mu\text{m}$) B($4.2\mu\text{m}$) tras eliminar el suelo

Se han escogido estas longitudes de onda para ver los efectos de distorsión y la diferente magnificación de las muestras, para resaltar la importancia de la alineación y el perfecto encaje de las imágenes para ser fusionadas. Por otra parte, al ser longitudes de onda tan espaciadas, los niveles de intensidad distan bastante unos de otros consiguiendo colores “mezcla” al fusionar la imagen.

La secuencia de imágenes de la figura 4.36 sirve de valoración sobre este hecho, ya que en caso de tener igual señal en todas las longitudes de onda y tratar con imágenes corregidas en tamaño y posición; la imagen fusionada sin cambios debería aparecer en blanco, fruto de la combinación de señal máxima de rojo, verde y azul = 1.

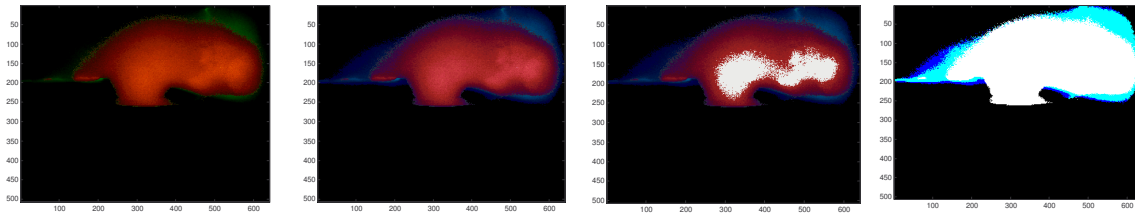


Fig. 4.36: Secuencia de imágenes variando los rangos hacia el color puro

Se tomaron imágenes corregidas en magnificación y desplazamiento del blanco, a partir de las referencias colocadas a igual distancia. No obstante se aprecia una ligera desviación de los píxeles de una longitud de onda a otra, que invalida el proceso de fusión ya que las imágenes no encajan completamente.

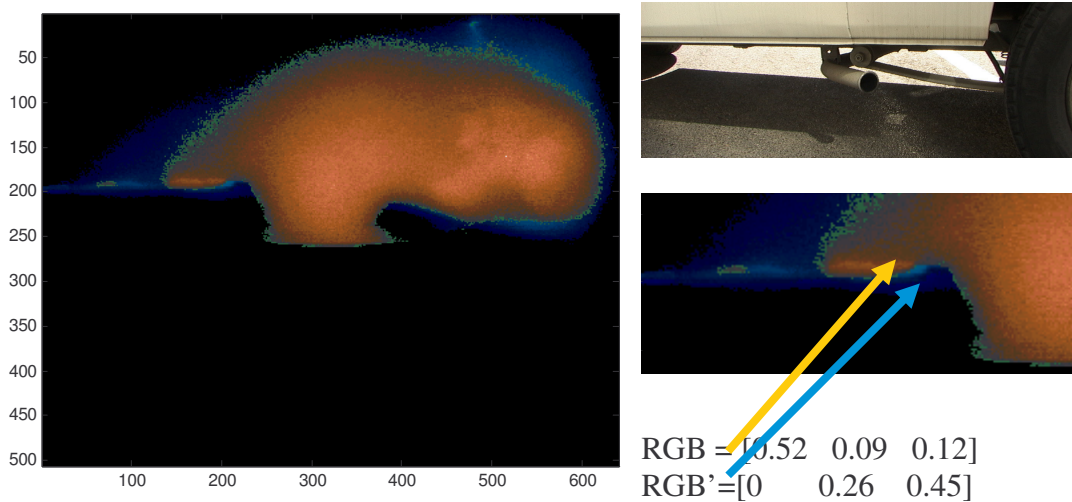


Fig. 4.37: Imagen resultante tras aplicar el algoritmo.

Al no tener componente rojo, donde deberían coincidir puntos calientes, se pone de manifiesto que no están superpuestos los píxeles correspondientes a un mismo punto del escenario. Si las imágenes hubiesen estado alineadas perfectamente, comparando secuencias distintas de aceleración y arranque del motor, la presencia de gases implicaría un cambio puntual en la imagen, para la longitud de onda de emisión del gas. Pudiendo estimar así de qué gas se trata y su importancia, con el fin de compararse con las firmas espectrales en otros vehículos.

4.6.2.3 Fusión de imágenes con blancos a diferentes temperaturas.

La implementación del algoritmo de fusión sobre imágenes con la misma longitud de onda, por conservar el tamaño y la alineación entre ellas resulta especialmente útil como técnica de “mejora” de la imagen.

Es fácil hacer isotermas¹¹ o ver la presencia de gradientes asignando diferentes niveles o combinaciones de color, con la intención de comparar dos imágenes correspondientes a ciclos distintos del motor y restarlas.

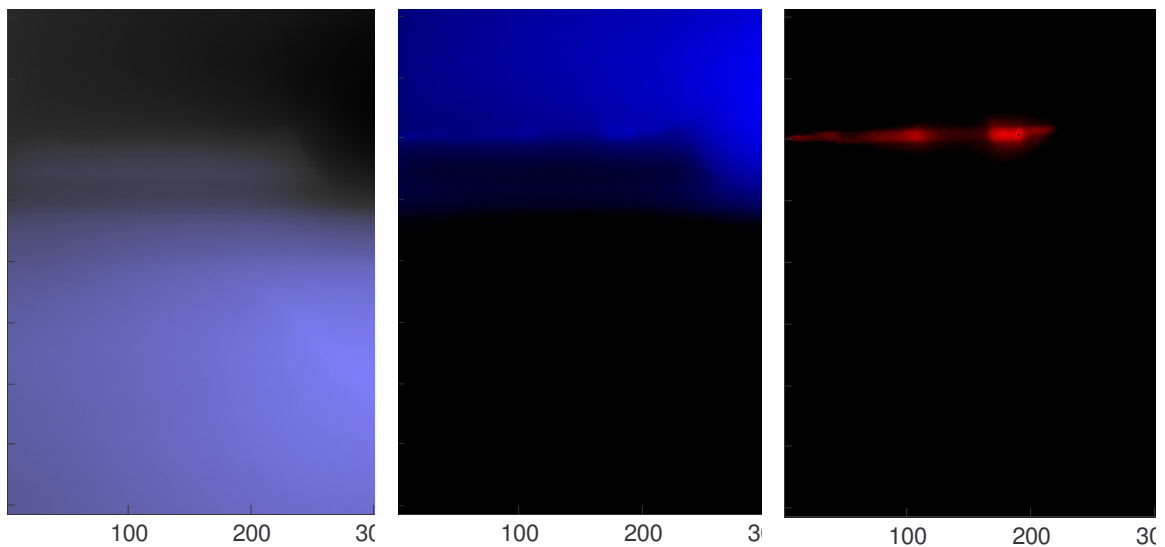


Fig. 4.38: Obtención de un punto caliente mapeado en tonos rojos.

En este apartado se mostrará el resultado de las imágenes de los dos algoritmos implementados.

El primero se programó para la detección de humos, ya que la distribución de los mismos sobre la imagen sería uniforme y gradual. En el caso de haber humo en la escena, éste aparecería coloreado en tono intermedio entre el fondo y el punto caliente.

El segundo algoritmo aplica el mapeado de forma gradual sobre la imagen original y tras la fusión vuelve a mapear los tonos de mayor intensidad haciendo un promedio de la zona y asignando el valor RGB¹²= [1 0 0] correspondiente al rojo. Esta función se aplicó sobre el tubo de escape y sería útil para tener en cuenta en las zonas de interés el efecto de la emisividad de determinados materiales, pudiendo también eliminar reflejos.

Si se hubiese podido corregir las imágenes tras la convolución espacial se podría haber hecho una fusión en longitud de onda sobre las imágenes fusionadas en

¹¹ Lugar geométrico a igual temperatura

¹² Codificación estándar de rojo, verde, azul; blanco=[1 1 1], negro=[0 0 0]

temperatura, componiendo así una imagen con toda la información posible. Si bien, para aplicar esta técnica a diferentes longitudes de onda, como cada píxel tendrá una intensidad diferente en cada longitud de onda a la misma temperatura es necesario considerar las curvas Intensidad/ λ y ecualizar los niveles antes de fusionar.

A continuación presentamos las dos opciones para fusión de imágenes con blancos a diferente temperatura y para una misma longitud de onda.

Fusión sobre mapeo:

Se creó una función de mapeo distribuido por intensidad y se le asignó a cada imagen según su nivel de señal, una banda de color. Tras sumar las dos imágenes y aplicar esta función, el resultado presentará una combinación de colores correspondientes a ambas informaciones.

En el ejemplo vemos como se suma el azul de la imagen con motor parado con el rojo de la imagen con motor encendido, viendo en las zonas donde se suma la señal un tono violeta/morado combinación de ambos tonos.

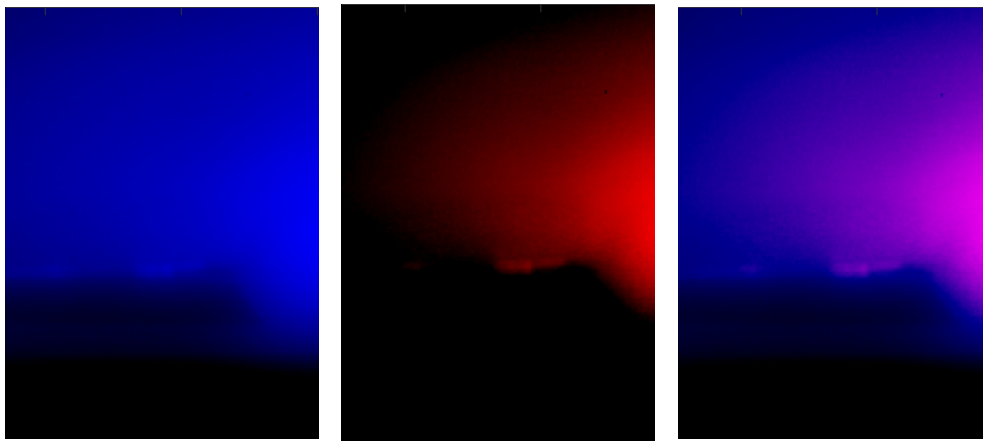


Fig. 4.39: Imagen motor parado, motor acelerando, suma de ambas.

Mapeado sobre fusión:

Este algoritmo permite tener mayor detalle en las imágenes. Tras fusionarlas, se asignó la paleta de colores a las diferentes intensidades, bien de forma gradual o asignando a intensidades concretas un color aislado. Esta sería la mejor forma de detectar detalle para un observador.

Aplicamos este último algoritmo a diferentes longitudes de onda y se puede apreciar la variación de tamaño por la magnificación y el efecto del desenfoque, ya que no ha habido deconvolución espacial

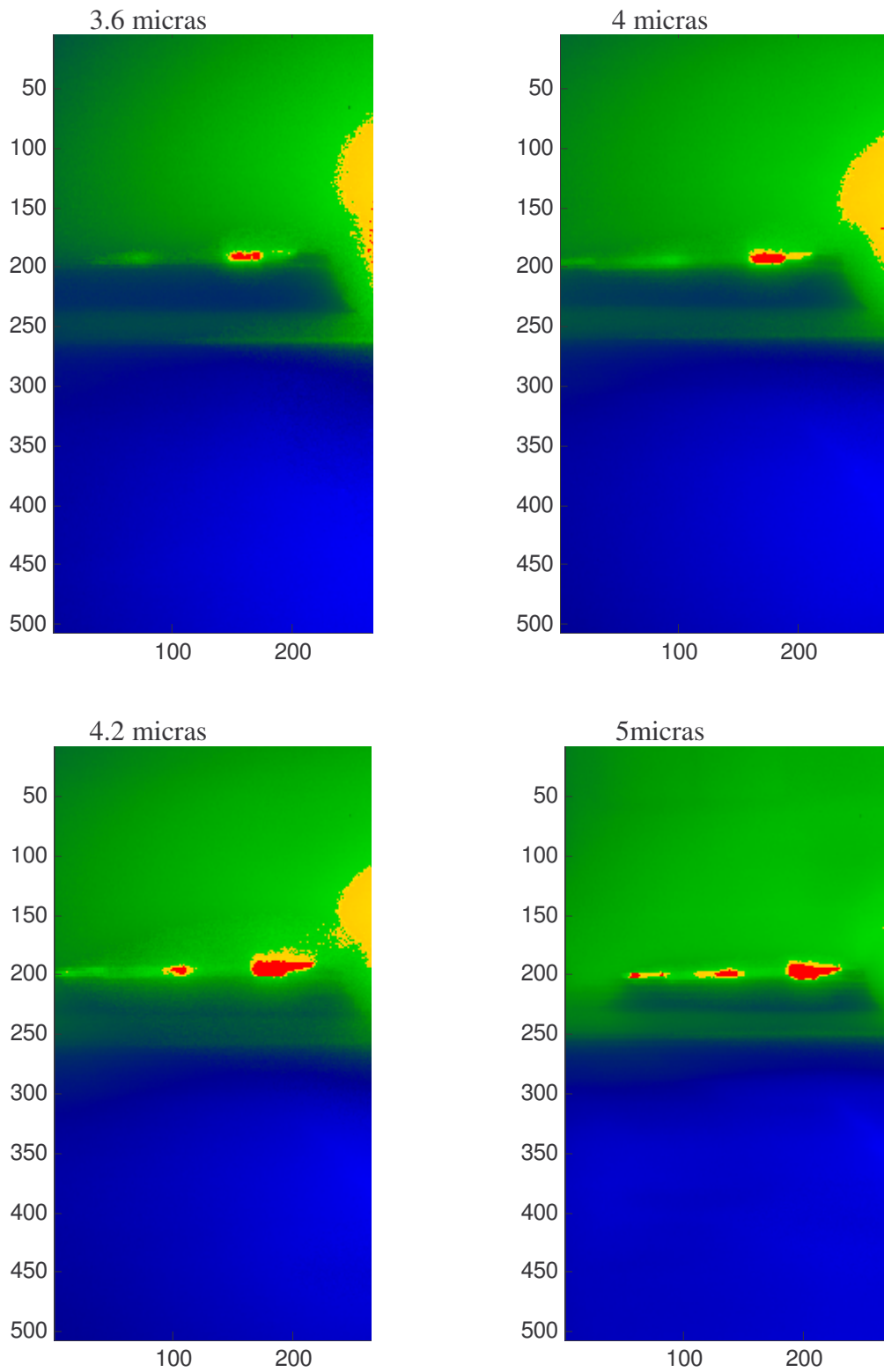


Fig. 4.40: Fusión de temperatura para varias longitudes de onda.

4.7 Conclusiones

Este capítulo tenía el objetivo de encontrar gases a partir de las imágenes registradas sobre los tubos de escape, pero nos tenemos que conformar con localizar y caracterizar los puntos calientes en la imagen, ya que bien por la baja intensidad de la emisión o por el efecto de la absorción atmosférica, no se ha detectado la presencia de humos, en las escenas registradas.

Se concretó el análisis sobre la imagen más cercana a 23 m, y se seleccionó el vehículo de gasoil por no llevar catalizador, y ser el de más consumo; sin embargo las imágenes procesadas no presentan la señal buscada para estas condiciones.

Se aplicó la técnica de fusión de imágenes en varias rutinas, que fusionaron distintas longitudes de onda y para distintos ciclos de aceleración del motor, a una misma longitud de onda.

4.7.1 Problemas de los sistemas infrarrojos. Medidas de laboratorio vs. exteriores.

Los distintos efectos de reflexión están presentes en todos los sistemas de imágenes de infrarrojos. Un diseño apropiado de la óptica del sistema puede reducir estos efectos por debajo de lo perceptible. Podría haber sido interesante hacer la fusión de imágenes con una imagen de día y otra de noche, ya que tendríamos variaciones considerables, por el cambio brusco de temperatura y por la eliminación de reflejos.

Durante las medidas exteriores la temperatura del entorno puede variar significativamente en un amplio rango. Los cambios en la temperatura ambiente pueden tener efectos significativos en los resultados de las medidas, debido a diferentes razones:

1. la radiación emitida por los elementos ópticos de la cámara depende directamente de la temperatura de estos elementos y de forma indirecta con la temperatura ambiente.
2. las variaciones de la temperatura del entorno pueden causar variaciones de la temperatura del detector y cambios en su sensibilidad de detección.
3. cambios en la temperatura ambiente causan directamente cambios en la temperatura de los bloques electrónicos e indirectamente cambios en la ganancia y el “*offset*” de estos bloques.

La influencia de la temperatura ambiente en los resultados de las medidas con cámaras infrarrojas puede corregirse. Las cámaras IR modernas están equipadas con software y mecanismos hardware que corrigen de forma automática este efecto. Sin embargo, solo es posible controlar una parte. Por ello, las medidas en condiciones reales difieren de las tomadas en el laboratorio, en condiciones estables y controladas.

La única medida que se tomó al respecto, fue cubrir los equipos con el fin de evitar la exposición directa al sol¹³.

¹³ Ver imágenes de las medidas exteriores en el apéndice

4.7.2 Calibración en Radiancia.

Puesto que no se sacaron grandes conclusiones sobre el escenario variando entre el motor apagado y encendido, desarrollamos una función que se explica en el capítulo 5, y calibramos en radiancia para ver la evolución temporal de la temperatura del tubo de escape. Posteriormente se determinó la emisividad del mismo.

Las curvas de calibrado, no obstante tienen una dependencia con la distancia al blanco, por la propia corrección que se precisa hacer sobre la lente IMSS.

4.7.3 Emisividad

Otra consideración a tener en cuenta es la determinación de la emisividad del tubo de escape. Un modo de medirla es comparar la radiación de un cuerpo negro que está a la misma temperatura que el material a medir, pero aparecen varios inconvenientes en estas estimaciones, la emisividad de un material se ve degradada por las propias reflexiones del material y además los materiales con emisividades bajas presentan altas reflexiones.

Nuestra estimación dio buenos resultados empíricos, debido principalmente a que la temperatura del cuerpo negro y de las placas que se utilizaron en la calibración era similar a la del tubo de escape en el momento de la medida. El valor para el vehículo medido fue de 0.87.

4.7.4 Espectros de Emisión.

Haciendo uso del HypatII.exe, se intentó obtener los espectros en el tubo de escape de una misma imagen, en tiempos distintos y con la finalidad de observar algún desplazamiento de la firma espectral como consecuencia del calentamiento. En primer lugar era necesario tener las escenas predefinidas, y una librería de firmas espectrales, de los gases típicos de combustión, y los presentes en la atmósfera. Se simuló estas curvas con el programa de modelización de la atmósfera *Modtran 4*, sin obtener resultados comparables con los espectros que se extrajeron del HypatII.

Se buscaba implementar un filtro adaptativo del gas, como un filtro paso banda, de forma que al correlarlo con el espectro de la imagen, tras convolucionar, se detectase desde partículas en el humo hasta varios gases presentes. Las medidas tomadas en el exterior, sin embargo, tras procesarlas no resultaron de intensidad suficiente en la combustión como para ser detectadas por el sistema a esas distancias.

Al ser la emisión mínima, y la potencia captada muy baja, intentamos la detección por desplazamiento de temperatura a unas longitudes de onda concretas; lo que implicó la programación de varias rutinas que tenían en cuenta la fusión de imágenes.

5. Software de manipulación de imágenes hiperespectrales infrarrojas.

Hasta este capítulo, se han mencionado las múltiples funciones desarrolladas y las herramientas utilizadas desde la calibración del instrumental hasta el tratamiento posterior de las imágenes.

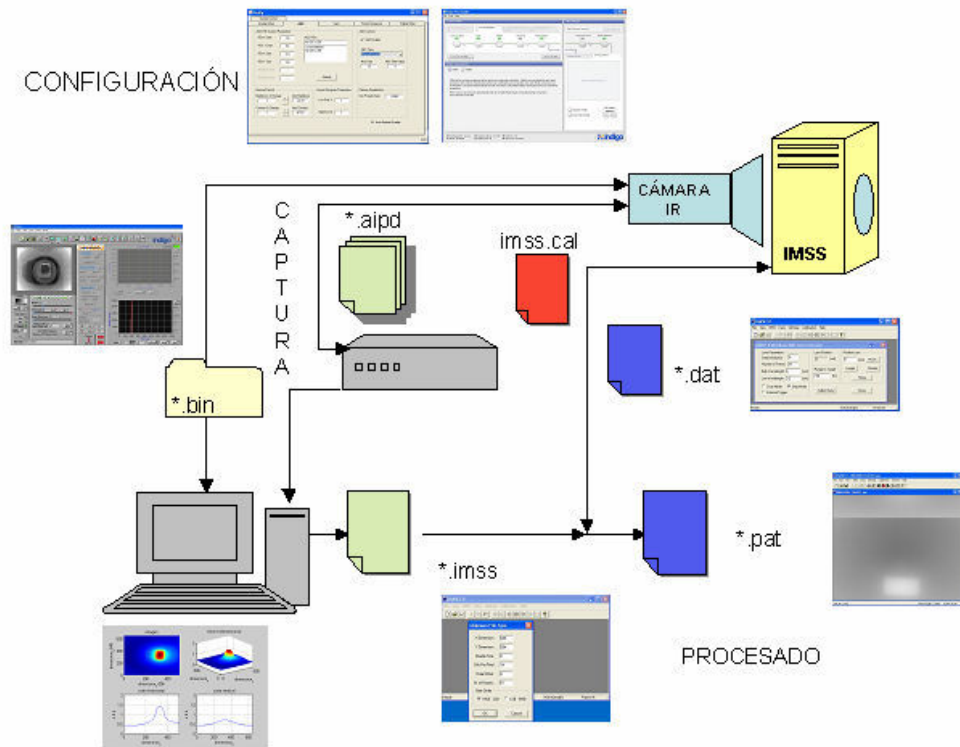


Fig. 5.1: Esquema del instrumental y sus herramientas y ficheros asociados.

En la figura 5.1, vemos un diagrama de los pasos seguidos: Configuración, Captura y Procesado. Cada uno de estos pasos tiene una o varias herramientas de manipulación asociada y unos ficheros propios generados.

Los diferentes programas de software utilizados se han presentado en el capítulo correspondiente al instrumental y de acuerdo con su aplicación. Así, en el capítulo 1 de cámaras infrarrojas se han presentado los programas de configuración y captura de la Phoenix de Indigo; y en el capítulo 2, la herramienta de HypattII.exe que controla el hardware de la lente. En el capítulo 3 se ha descrito el *Toolbox* de visión de Labview y el *script* creado para la colección imágenes exteriores.

A continuación se describen las funciones implementadas en Matlab, que se han ido requiriendo para la caracterización del sistema y el tratamiento posterior de las imágenes infrarrojas. Se han integrado en una aplicación transparente al usuario que implementa los procedimientos desarrollados durante el proyecto. Se describirán los módulos principales.

5.1 Descripción cualitativa de la herramienta. Menús

Las actuales capacidades de memoria y procesadores de que disponen los ordenadores con plataformas como Windows, permiten tratar e implementar algoritmos muy potentes y en definitiva los software de interés que planteamos en este trabajo. Bajo la herramienta Matlab 7.1, se ha programado el software integrador de las rutinas necesarias para la caracterización y manipulación de los datos tomados con el sistema IR. Las líneas de comandos principales que implementan la herramienta se ejecutan a través del algoritmo **hyperIR.m**. Éste abre la ventana de presentación de la figura 5.2 y tras cargar los archivos, habilita los menús que se describen a continuación. Podría considerarse como un sistema de procesamiento para el análisis interactivo, ya que requiere de determinados parámetros de entrada dependientes de los otros software de la caracterización.

Es un sistema de procesamiento sobre datos de imágenes hiperespectrales tomadas con la lente IMSS en sus dos modos de captura. El principal objetivo es poder exportar los resultados obtenidos en la investigación, para el estudio de los datos hiperespectrales en posteriores aplicaciones del sistema completo.

5.1.1 Menú Archivo

El Menú Archivo es el primero de los menús, permite cargar los datos según su formato y origen, así como las funciones genéricas de la ventana de Windows. Se ha implementado la opción de importar y visualizar los diferentes formatos de imágenes, adquiridos durante el proyecto, con IRvista.exe el formato *.bin, con HyPatII.exe el formato *.pat, y *.imss, y con Labview.exe el formato *.aipd. También se han incluido la lectura directa de imágenes *.jpg, *.bmp, y texto ASCII. La pantalla principal así como el menú desplegado se muestran en la figura siguiente.

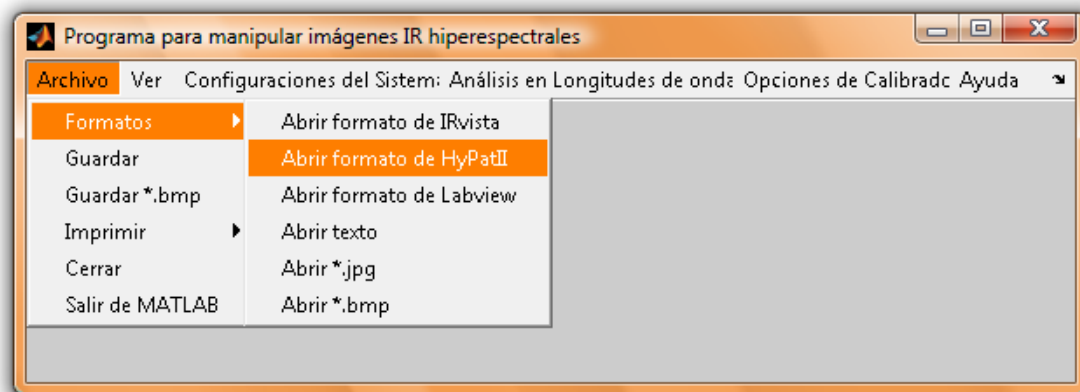


Fig. 5.2: Pantalla principal con menú del módulo formatos.

5.1.2 Menú Ver

El siguiente menú se compone de cuatro bloques. En primer lugar presenta los datos de la imagen actual abierta leyendo de su cabecera los principales parámetros, que serán distintos dependiendo del tipo de formato. Seguidamente, está la opción de seleccionar una parte de la imagen o región de interés, que permite agilizar de forma considerable el procesamiento posterior de la matriz que contiene la información necesaria.

Este recurso es especialmente necesario en el procesado posterior de Técnicas de Fusión, también accesibles a través de este menú Ver, ya que se consume gran cantidad de recursos. Por último se permite acceder al fichero de calibración IMSS, que también puede visualizarse con el menú Archivo ya que es un fichero de texto con extensión *.cal. Sin embargo, de esta forma se cargan como variables manipulables por el software, los parámetros más importantes modificados durante la calibración.

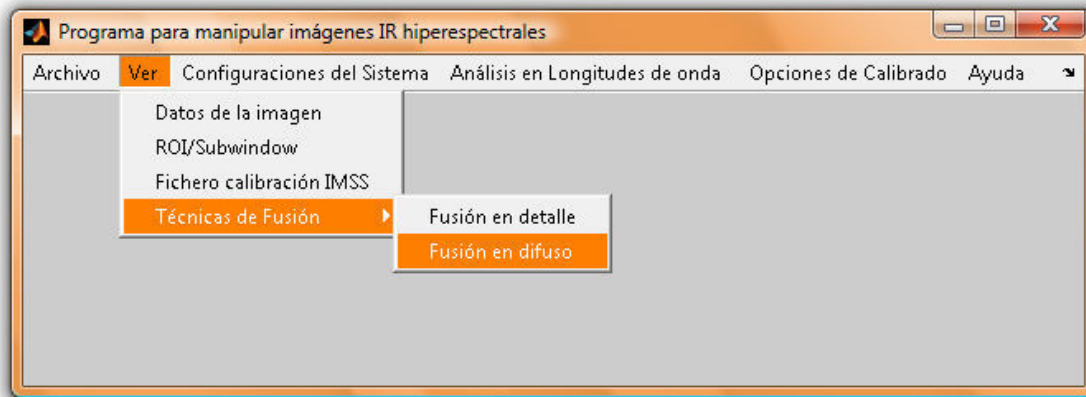


Fig. 5.3: Menú Ver desplegado. Parámetros y Técnicas de Fusión.

En siguientes apartados se detallan las variables y rutinas consideradas en los principales módulos programados. El módulo de Técnicas de Fusión se ha descrito cualitativamente en el apartado correspondiente del capítulo anterior, por otra parte, en este capítulo se da un enfoque más funcional describiendo el procedimiento algorítmico que se ejecuta sobre las imágenes.

5.1.3 Menú Configuración del sistema

Este menú es meramente informativo, ya que presenta curvas y datos extraídos durante la caracterización en laboratorio del sistema + colimador + cuerpo negro. Los resultados obtenidos del capítulo 3 y las curvas calculadas se presentan como guía del efecto de la óptica en el blanco para las diferentes imágenes según la longitud de onda.

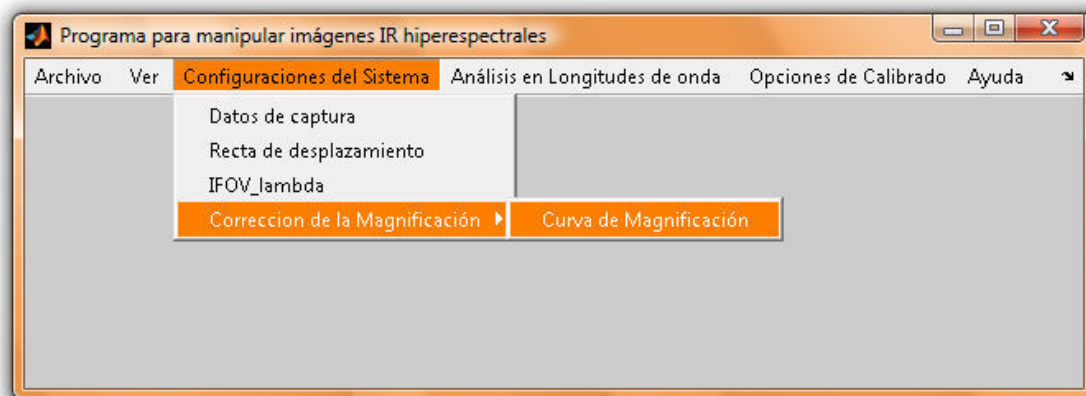


Fig. 5.4: Pantalla Menú Configuración del Sistema

5.1.4 Menú Análisis en longitud de onda

El menú Análisis en longitud de onda, integra los datos de calibración obtenidos para la cámara IR y el sistema formado por la cámara y la lente IMSS. Se cargan las curvas de ruido, responsividad y MTF, y las variables correspondientes a cada longitud de onda se les asignan a vectores columna.

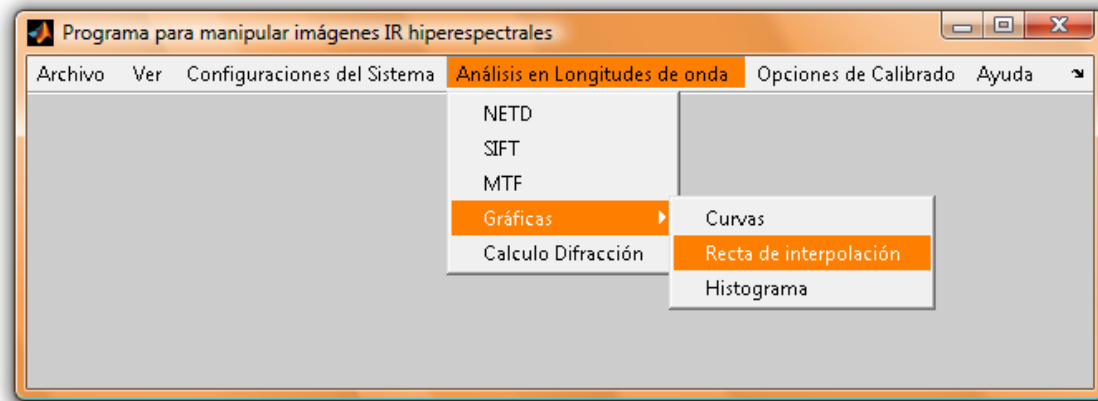


Fig. 5.5: Menú Análisis en longitud de onda

5.1.5 Menú Opciones de calibrado

Este menú viene a ser como el anterior pero haciendo un análisis sobre la energía. Se consideran los diferentes niveles digitales capturados, y su equivalencia a temperaturas a partir de las curvas de calibrado obtenidas en las medidas exteriores con las referencias térmicas.

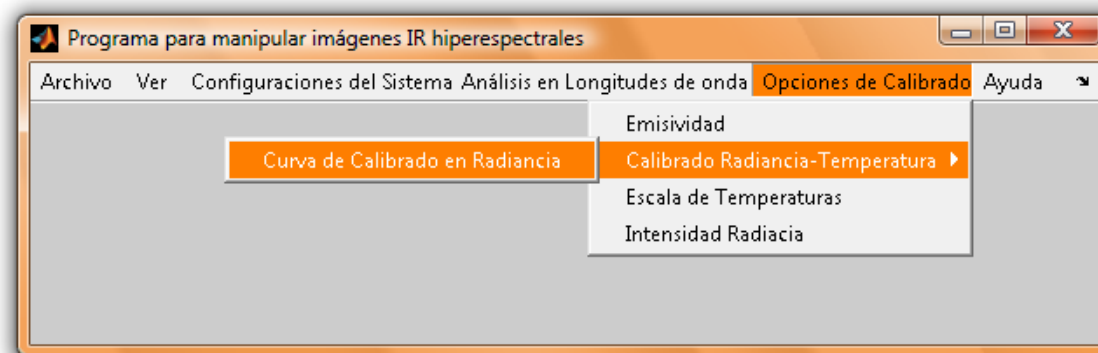


Fig. 5.6: Menú Opciones de Calibrado

5.1.6 Menú Ayuda

Este menú accede a un fichero de texto que incluye junto con el código fuente del entorno y los módulos principales, descritos en el siguiente apartado, algunos de los parámetros y procedimientos descritos en los apéndices; de manera que sirvan de guía para el manejo de la herramienta y los resultados.

5.2 Módulo para abrir y tratar diferentes formatos de datos.

Uno de los principales problemas que se presenta en los sistemas infrarrojos, no sólo en nuestro proyecto sino con carácter extendido a otros sistemas de imágenes, es la no estandarización de los datos y la necesaria integración de información de múltiples orígenes.

Ha sido imprescindible tratar información de diferentes fuentes, y “mezclar” datos correspondientes a imágenes con varias escalas de codificación, giradas unas respecto de otras, o imágenes correspondientes a diferentes zonas y ficheros de texto.

Este módulo, contempla la adaptación de la información a formatos estándar o específicos y la exportación a varios formatos estándar para su posterior utilización en otras plataformas, tras el tratamiento en Matlab.

Las primeras 3 modalidades de formato que se observan en la Figura 5.2 del Menú Archivo/ Formatos, son opciones dedicadas a nuestro sistema: formato de IRvista.exe, formatos de Hypat.exe y las capturadas con Labview.

Las otras opciones son para manipular formatos estándar *.jpg y *.bmp, así como ficheros ASCII. Cabe mencionar que hay distintos ficheros en modo texto tanto de la calibración de la lente *.cal, *.dat, como del banco de medidas II, *.lsf y del software de corrección atmosférica MODTRAN.exe *.mod que se pueden visualizar y editar con esta opción.

Con el fin de manejar las imágenes bajo el mismo ejecutable, se ha integrado el módulo que permite elegir el tipo de archivo y abrirlo. De esta forma, a las imágenes se les asigna una matriz de valores entre 0 y 255 niveles. Adaptándose cada tipo de imagen tratada, según su extensión.

Puesto que las imágenes principalmente analizadas han sido con la lente en modo paso a paso y capturadas con el software de la cámara IRvista.exe, se describen seguidamente sus parámetros y consideraciones principales.

El fichero de datos generado o secuencia de imágenes, es un formato estándar I16 (*Integer* 16 bits) de Labview, con extensión *.bin. Se compone de tres secciones: la cabecera, las tablas de NUC y BPR, y las imágenes con información opcional de longitud de onda.

La cabecera contiene información sobre la versión del software, datos de la cámara como número de serie, dimensiones de la FPA, tiempo de integración, número de *frames*...etc. y los tiempos de captura y secuenciación de tramas.

La siguiente sección comprende las tablas de NUC y BPR, presentadas como una secuencia de tres arrays¹ de imágenes, la primera contiene el factor de corrección de ganancia para cada píxel multiplicado por mil. La segunda contiene la corrección de offset con 2048 añadidos a cada entrada. Por último, la tercera es el mapa de píxeles malos *bad pixels* donde los "1's" representan los defectuosos.

¹ Desarrollado en el capítulo 3

La tercera y última sección en el fichero de datos *.bin, almacena las imágenes, cada una de ellas entendida como un *array* de datos de 16-bits o 2 bytes, aunque actualmente las cámaras de *Índigo Systems* usan únicamente 12 bits.

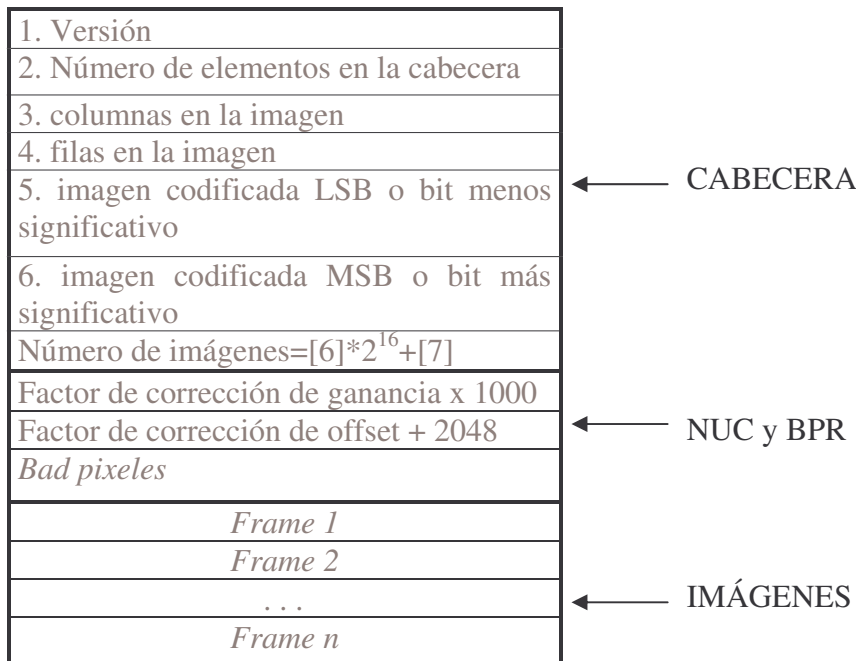


Fig. 5.7: Formato de fichero *.bin

El algoritmo que se describe seguidamente considera los datos de la cabecera, salta los datos que se asignan a la segunda de las secciones, y comienza a extraer las imágenes. La rutina encargada de realizar esta función es el subprograma **extraer_BIN.m**, donde el parámetro de entrada es el fichero, el parámetro de salida es una matriz 640x506 correspondiente a cada imagen en una longitud de onda fija, y las instrucciones dependen de la cabecera de los datos haciendo uso de las funciones propias de Matlab para manejo de ficheros, como *fopen.m*, *fseek.m* y *fread.m*

<code>fid=fopen(fichero,'r','b');</code>	Abre modo lectura (r) , estándar iieee (b)y asigna Id
<code>fseek(fid,6,'bof²);</code>	Posiciona el puntero a partir de la posición 6
<code>info=fread(fid,3,'uint16³);</code> <code>m=info(1);</code> <code>n=info(2);</code> <code>n_imag=info(3);</code>	Lee tres posiciones de la cabecera: dimensiones mxn 640x506 número de <i>frames</i>
<code>tramas=n_imag*m*n*2;</code> <code>offset=34327186-tramas;</code> <code>fseek(fid,offset,'bof');</code> <code>datos=fread(fid,m*n,'uint16');</code>	14896786 -> 20 <i>frames</i> 34327186 -> 50 <i>frames</i>
...	Ecuación/compresión
<code>fclose('fid')</code>	

Tabla 5.1: Secuencia de extracción básica de la cabecera

²*Begging Of File* - inicio de fichero

³ tipo de dato entero 16 bits

El siguiente bloque de instrucciones de la rutina, hace un ecualizado de la imagen calculando la media de los datos y su desviación estándar, con un criterio elegido de 3σ . Posteriormente la imagen se comprime convirtiendo los datos a 8 bits, para fijarlos en un rango de [0, 255] niveles, y se prepara para la visualización. Es necesario hacer desplazamiento especular de los datos por las consideraciones de codificación por defecto, del software de captura *Big Endian* (MSL).

media =mean(datos)	
sigma=std(datos)	
datos1=datos-(media-sigma*3); maximo=sigma*6;	Ecualizado
datos2=datos1/maximo;	Conversión 8 bits
datos3=datos2*255	Paleta de 0-1 a 0-255 colores
imagen=reshape(datos2,m,n); imview(imagenEC,[0,255])	Visualizadores de la imagen
imagen=fliplr(imagen);	Estándar LSB
imagen=rot90(imagen);	Giro 90°

Tabla 5.2: Secuencia de Ecualización y compresión de la imagen.

La rutina de extracción y asignación de variables para el formato *.aipd es muy similar: **extraer_AIPD.m**, pero la mayoría del tratamiento de estas imágenes en dichos formatos se ha realizado con el *Toolbox* de visión de *Labview*, o han sido convertidas en formato *.imss y posteriormente en *.pat para ser analizadas con el software de la lente.

[imagen]=extraer_AIPD('fichero.aipd')	Lectura de formato *.aipd que captura el
fid=fopen(fichero,'r','b');	<i>Frame Grabber</i>
fseek(fid,6,'bof');	
info=fread(fid,8,'uint16');	
a=info(1);	
b=info(2);	
c=info(3);	Número de imágenes
d=info(4);	
m=info(6);	Número de columnas
n=info(7);	Número de filas
tramas=m*n*2;	
offset=648192-tramas;	648192 bytes fichero *.aipd
fseek(fid,offset,'bof');	
datos=fread(fid,640*506,'uint16');	

Tabla 5.3: Parámetros básicos formato *.aipd, según su formato de cabecera.

Otras de las versiones dedicadas, incluidas en el código son:

- formatoBIN.m : Secuencia de llamadas
- readbin.m : Considera todos los frames y calcula la imagen promedio
- openfile.m : Realiza ecualizados diferentes

Los otros formatos con los que se trabaja, tanto de imagen como de texto son abiertos y tratados a partir de las funciones de la librería de Matlab. Para la lectura de imágenes se usa **imread.m** y dependiendo de los argumentos que introduzcamos en cada llamada, se obtiene un formato u otro. Se han integrado en funciones específicas para poder ser seleccionados los archivos desde el menú. Los ficheros de texto se visualizan con la ventana de edición.

5.3 Módulo de configuración y calibrado

De forma resumida, podría decirse que el calibrado del sistema se llevó a cabo básicamente calculando el desplazamiento del máximo de intensidad frente a la longitud de onda, y la magnificación en términos de píxeles, también frente a la longitud de onda, basándonos en el montaje de cuerpo negro + colimador + sistema.

Las curvas resultado Intensidad / λ y magnificación / λ se obtuvieron sobre varias temperaturas, diferentes combinaciones de brillo y contraste para la configuración de la cámara y con y sin una mira rectangular frente al cuerpo negro.

Por tanto se incluye una rutina genérica de cálculo de máximo, posición y anchura y diferentes modificaciones adaptadas a las imágenes tomadas con los parámetros óptimos descritos en el capítulo 3; para el cuerpo negro de 2 pulgadas y el de 4 pulgadas y para varias temperaturas seleccionadas.

Mediante la subrutina **abrir_porcen.m** se extrae a partir del fichero `_.bin` para una longitud de onda, su correspondiente matriz de valores y dos vectores con los cortes verticales y horizontales que se cruzan en el máximo de la imagen. También se dibujan estos dos cortes. El procedimiento siguiente es mediante los perfiles horizontal y vertical, en los que se calcula, para un porcentaje dado sobre la caída del máximo, la anchura en píxeles. Las anchuras se hicieron tanto para horizontal como vertical, y se probaron para una mira cuadrada y otra rectangular.

El algoritmo principal integrado en la herramienta es la función **calculo_anchuras.m** que se implementa con el cuerpo negro de 4 pulgadas, a 50°C y con la mira rectangular de dimensiones reales 3cm x 6cm. Esta rutina llama para cada longitud de onda, a la subrutina **abrir_porcen.m** comentada anteriormente. Ésta a su vez comienza calculando el máximo en la imagen a través del subprograma **maximo.m**, dando como parámetros de salida la posición del máximo (x,y) y su nivel digital. A continuación se ejecutan dos subrutinas **corte_h.m** y **corte_v.m** que calculan y representan el corte horizontal y vertical respectivamente sobre el nivel máximo en la imagen. Para cada imagen, sobre estos cortes, de forma iterativa se permite seleccionar el pedestal u *offset* en la curva de intensidad que se eliminara del máximo calculado, y el porcentaje sobre el que se considerarán las medidas. Se deja la opción de elegir el porcentaje, si bien en las tablas calculadas se realizaron las medidas como se presentó en el capítulo 3, para el 50% y 80%.

Eliminando del máximo un pedestal concreto para cada longitud de onda y tomando el porcentaje seleccionado, se calcula la anchura en píxeles sobre la mira. Las subrutinas **curva_intensidad.m** y **curva_magnificacion.m** representan para las longitudes de onda calculadas, el máximo corregido y la anchura respectivamente.

Subrutinas:

corte_h.m	corte_h(A,color)
corte_v.m	ídem al horizontal pero con la dimensión vertical
maximo.m	[pixel_h,nivel_h,pixel_v,nivel_v]=maximo(A,color)
niveles_max.m	dibuja todas las funciones para los cortes en el maximo del cuerpo negro con o sin mira frente a la lente
extraer_inter_max.m	saca el máximo y los cortes de la imagen
Curva_intensidad.m	
Curva_magnificacion.m	

Versiones dedicadas:

calculo_anchurasB.m	modificado 22 agosto 07 al cambiar el centro de magnificación fichero calibración 40_242_320_λ_SINMIRA.bin
calculo_anchuras_bb2.m	BB2T50_λNB.bin
calculo_anchuras_bb4_mrec.m	BB4T50mrecλ.bin
calculo_anchuras_bb4_nom.m	BB4T50nomλ.bin
calculo_anchuras_bb4_60.m	BB4T60mrecλ.bin

La primera columna corresponde a las rutinas que contienen las llamadas concretas de las colecciones de datos registradas. Cada colección se compone de un número de ficheros *.bin igual al numero de longitudes de onda seleccionados.

Está reseñado en negrita el valor variable de los ficheros, como el cuerpo negro BBi, la temperatura Tj, y la longitud de onda, además del tipo de mira.

5.4 Módulo de Calibrado de Radiancia en Temperatura

El programa para calibrar en Radiancia a partir de las placas térmicas, tiene como parámetros de entrada: la imagen, la longitud de onda, y la distancia de las referencias al sistema IR; y como parámetros de salida: la temperatura en todo punto de la imagen tanto en niveles de Radiancia como su equivalencia en grados centígrados.

Para una longitud de onda en el rango de 8 a 12, existe una única curva de calibración una para cada distancia, mientras que para el rango de 3 a 5, para la cámara Phoenix; el programa da la opción de elegir entre las lentes Janos, y sus dos campos (ancho y estrecho) y para la IMSS, la longitud de onda. Se interpola una curva a partir de la radiación recibida de las placas térmicas, a las distancias de 23m y 100m; existiendo curvas de calibrado para las diferentes combinaciones de sistemas y longitudes de onda.

La secuencia de instrucciones comienza abriendo la imagen equivalente a una matriz de puntos, con los niveles digitales de radiación, se le asigna un nivel de gris entre 0 y 255, y tras determinar la curva de calibrado correspondiente, se transforman los valores de Radiancia, en valores de temperatura . Se toma opcionalmente, el máximo de la placa o un rectángulo promedio de los niveles de las placas, y se codifica en temperatura.

En este punto, cabe destacar la dependencia de los datos para las características de brillo y contraste específicas.

Las rutinas que intervienen en este módulo se componen por un lado del subprograma **curvas_calibrado_radiancia.m**, que implementa una función de calibrado de temperatura sacando las curvas de calibración, según los niveles de las placas en las posiciones fijadas, 100m y 23m. Por otro lado, existe el subprograma **calibrado_radiancia.m** que a partir de estas curvas, diferentes según la distancia, el tipo de cámara y el tipo de lente; calcula la temperatura equivalente a la Radiancia de la imagen. Los parámetros de entrada a esta función son la distancia, la longitud de onda, y opcionalmente el campo.

Las imágenes de calibrado se hallan previamente cargadas para la calibración, modificando estos ficheros, cambiarían los parámetros de calibrado, las curvas y también su lectura en temperatura. También se carga el vector de temperatura real de las miras en cada imagen, que sirven de referencia para representar y sacar los datos interpolados, con los que extrapolar otras temperaturas.

curvas_calibrado_radiancia.m	Rutina principal
cal.m	Calcula el vector de interpolación de las placas y saca la curva de calibrado. <i>spline</i> cúbico modificable, y los valores de la temperatura de las placas
tubo.m	Rutina con parámetros de entrada imagen, hora, placas, niveles. Abre la imagen pide la posición que se quiere medir, con el nivel que tiene en la imagen, lo codifica de [0,1] a [0,255] interpola y da un vector con la hora, nivel intensidad y temperatura.
Ejemplo_tubo_gasoiil.m	llamadas a calibrado_radiancia, y curvas de calibrado, con las horas y cada imagen correspondiente a la evolución de la temperatura del tubo de escape

Los ficheros que han servido de calibración tanto para cada distancia como para cada sistema, se listan a continuación.

23 m	ficheros extensión *.bmp	3 a 5 μm	'040707_1015mirasi_23m.bmp' con i=5:0.2:3
		8 a 12 μm	'050707_1214miras812_23m.bmp'
100 m	ficheros extensión *.bin IRvista	3 a 5 μm	'HK_vacio1015.bin' 'HK_VC1342.bin'
		8 a 12 μm	'040707_1015miras812_100.bmp'

Tabla 5.4: "Base de datos" de imágenes referencia

5.5 Módulo de Fusión

El diagrama de la figura 5.8, nos sirve para diferenciar los tipos de fusiones realizadas sobre las imágenes, así como para tener una visión general del tratamiento realizado sobre la colección de datos hiperespectrales obtenidos con el sistema infrarrojo.

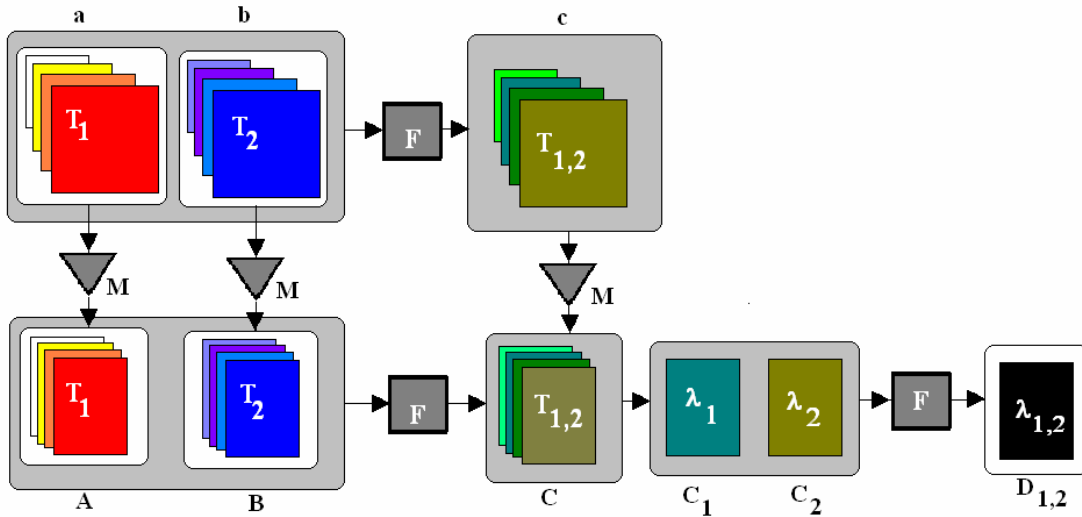


Fig. 5.8: Diagrama de la secuencia de fusión sobre la colección de datos

Los tipos de fusión realizados son dos: fusión en temperatura, considerando registros del blanco a temperaturas diferentes para la misma imagen; y fusión en longitud de onda. En este caso, para capturas a diferentes longitudes de onda sobre el mismo escenario y blancos.

Dependiendo del orden de aplicación del módulo de fusión o el de corrección de magnificación del sistema hiperespectral, se tienen los respectivos ficheros:

$$\left. \begin{array}{l} c_{\lambda} = a(T_i) \ \Phi \ b(T_i) \\ C_{\lambda} = A(T_i) \ \Phi \ B(T_i) \end{array} \right\} \text{ fusión en temperatura sobre datos sin corregir y corregidos.}$$

Para la fusión en longitud de onda es preciso hacer la corrección en magnificación previamente, siendo necesario que exista un perfecto alineamiento en las imágenes.

Lo ideal sería hacer ambas fusiones, temperatura y longitud de onda, sobre la colección de datos registrada, lo que resultaría en la figura el fichero correspondiente a:

$$\left. \begin{array}{l} C_{\lambda} = M[a(T_i) \ \Phi \ b(T_i)] \\ C_{\lambda} = M[a(T_i)] \ \Phi \ M[b(T_i)] = A_{\lambda} \ \Phi \ B_{\lambda} \\ D_{\lambda} = C(\lambda_i) \ \Phi \ C(\lambda_j) \end{array} \right\} \Rightarrow D_{1,2} = f\{\lambda_1(T_i, T_j), \lambda_2(T_i, T_j)\}$$

En el capítulo 4 se vieron algunos ejemplos de aplicación de estas dos variantes de fusión, para imágenes en busca de puntos calientes, y para determinar la presencia de ciertos gases presentes únicamente a determinadas longitudes de onda. Con motivo de estas especificaciones se implementaron tres funciones respectivamente: la **fusion_detalle.m** y la **fusion_difuso.m**, y la rutina **fusion_humos.m**.

Las líneas de código son muy distintas pese a tener en común el manejo de matrices, y la asignación de combinaciones de colores, estando en función de la temperatura o de la longitud de onda.

En el capítulo anterior se describieron de forma cualitativa los algoritmos desarrollados, mientras que a continuación se destacará la parte funcional del manejo y manipulación de la información presente en las imágenes.

La **fusionlambda.m** abre 5 imágenes correspondientes a trozos de la imagen original, a través de la llamada a la función `subwindows`. Proviene de la imagen deconvolucionada espacialmente con el algoritmo `jan` y desmagnificados con una rutina que cada pixel lo desplaza y magnifica según la recta de desplazamiento y las prepara para aplicar el algoritmo de fusión. No se incluyen imágenes porque se pone de manifiesto la necesidad de corregir el efecto de la distorsión, ya que los trozos no corresponden a la misma zona de pixel de la imagen, además de que las longitudes de onda no sufren una magnificación verdaderamente lineal.

La rutina **hoyfusion.m** abre imágenes *.bmp, mapea en RGB y permite elegir qué tipo de fusión hace.

5.6 TF

Ya que se han dedicado algunos apartados del capítulo 3 a las técnicas básicas de procesado con transformadas sólo listaremos a continuación varias funciones implementadas para usar sobre los datos.

<code>coef_DSF.m</code>	Calcula coeficientes del desarrollo en serie de Fourier
<code>x_TF.m</code>	Calcula transformadas con FFT's
<code>pr_conv.m</code>	Convolución de señales
<code>pr_escalon.m</code>	Implementación de pulsos
<code>pr_seno.m</code>	Implementación de señales simples, frecuencia fundamental
<code>pr_sinc.m</code>	TF de escalones tratada como sinc.
<code>difracción.m</code>	Rutina para asociar las transformadas con el efecto de la radiación al atravesar las ranuras.

5.7 Dibujar_funciones

`espectrosimagen.m` representa gráficamente los espectros de las imágenes extraídos del fichero de seguimiento Excel que genera el HypattII al hacer un tracking de un punto a lo largo de las diferentes longitudes de onda.

`graficas.m` toma de la matriz que contiene la imagen, sus dimensiones, calcula el máximo y el mínimo y permite elegir el punto de cálculo, saca una ventana con 4 graficas: una con la imagen bidimensional, otra tridimensional con la intensidad representado en el eje z, y los dos curvas correspondientes a los cortes verticales y horizontales.

`grafica.m` plotea todas las longitudes de onda de un vector `a(,)`

graficas_SIFT.m	plotea la sift para todas las longitudes representa dos longitudes de onda 3.2, 3.4 la función SIFT, eje y niveles digitales de señal y ejex valores de temperatura entre 15°y 50°C calculados en paso de 5°C y con interpolación lineal entre ellos.
graficas_NETD.m	
createlegend.m	función de matlab para crear leyenda de gráficos
plotengrupo.m	plot para funciones nuc, bpr, todas las longitudes en una ventana

5.7.1 MTF

La rutina principal viene dada por el ejecutable **mtf.m**, que abre los ficheros de texto cargados en el directorio abierto, que vienen del banco de Optikos y extrae en vectores las columnas de los datos correspondientes a los valores de LSF y MTF y los asigna a unas variables.

mtf_λ.m	rutina asignada a los datos de las curvas para cada longitud de onda con lente IMSS
mtf_campo.m	según el campo marcado por la lente Janos
grafica_mtf_joa.m	método de cálculo a partir de los bordes de una abertura con el algoritmo de Fermi.

5.8 Otras funciones

emisividad.m: Calcula la fórmula de la Irradiancia según la ley de Planck, se utiliza como subrutina de llamada para calcular la emisividad a una longitud de onda y temperaturas concretas.

interpol_cub.m: Hace un ajuste cúbico sobre cada pareja de muestras, con el algoritmo de interpolación polinomial cúbica de Hermite. Sobre los vectores de datos y sus valores, calcula sus coeficientes y la evaluación de puntos intermedios. Para cada función $p(x)$, satisface en cada intervalo $X(k) \leq x \leq X(k+1)$.

Se incluye en el CD del proyecto, además de los datos y las funciones desarrolladas durante el mismo, los *workspace* de los apartados principales, además de ficheros de variables generadas y que contienen datos de calibración.

Name	Size	Bytes	Class
A_h3_2	1x506	4048	double array
A_v3_2	640x1	5120	double array
BB4T60mrec_3_4	640x506	2590720	double array
Ix	1x2	16	double array
Iy	1x2	16	double array
datos	323840x1	2590720	double array
fid	1x1	8	double array
id	1x1	8	double array
imagen	640x506	2590720	double array
info	3x1	24	double array
inicio	1x1	8	double array
maximo	1x1	8	double array
media	1x1	8	double array
niveles_porc	1x10	80	double array
offset	1x1	8	double array
pedestales_h	10x1	80	double array
px	1x2	16	double array
py	1x2	16	double array
sigma	1x1	8	double array
tramas	1x1	8	double array
valor_pedes_h	10x1	80	double array
x	3x1	24	double array
y	3x1	24	double array

Grand total is 3239665 elements using 25917314 bytes

Tabla 5.5: Ejemplo de fichero de variables salvadas. llamada *whos.m*

Al inicio del manejo del sistema hiperespectral, se plantearon varias de las aplicaciones que podían resultar interesantes, pensando en una ampliación futura y que mencionaremos a continuación. Una de ellas era la de discriminar blancos entre sí. En pasos sucesivos, se pensó: distinguir un blanco (cuerpo negro), del fondo. Distinguir entre dos cuerpos negros de distinto tamaño y temperatura, de forma automática y por último, distinguir entre dos blancos *reales* con diferentes características, de forma *automática*. Otra de las aplicaciones que se planteó, fue la de mejorar las características DRI (Detección, Reconocimiento, Identificación) de la cámara Phoenix. Determinar los rangos DRI para la cámara cuando funciona en todo su rango espectral (sin el IMSS), y luego utilizando el IMSS. Finalmente, tras caracterizar el sistema en longitud de onda y energía, se optó por buscar en determinar longitudes, o rangos de longitudes, de onda óptimos para extracción de características determinadas (puntos calientes/fríos, emisiones de gases de combustión, etc.); como se vio en el capítulo 4.

5.9 Conclusiones

Una de las mayores limitaciones de los sistemas hiperespectrales, es el gran volumen de información en imágenes y datos, que se capturan y se almacenan. El procesamiento de los mismos y la adaptación a formatos estándares se deriva en un incremento exponencial de la memoria necesaria y ralentiza considerablemente el procesado. Gran parte del estudio del sistema, fue conocer y trabajar con los diferentes formatos de imágenes y datos; así como los tipos de datos asociados a las diferentes plataformas, donde se integraron las herramientas.

5.9.1 Consideración del tipo de datos

A lo largo de este documento, se ve obligada a coexistir la nomenclatura americana con la europea, en cuanto a la consideración del valor decimal representado bien por un punto o por una coma, según con el programa que se traten los datos. Tanto en *Labview*, como *Excel* y el programa *IR-vista*, utilizan la coma al exportar y tratar los datos con decimales. Sin embargo, en *Matlab*, la coma se interpreta como un carácter similar al tabulador y es necesario hacer una conversión y a su vez, las tablas de datos que genera, los decimales vienen separados por un punto. Hecha esta aclaración, no resulta ninguna limitación puesto que se ha trabajado de forma simultánea accediendo directamente al fichero de los datos codificado en binario.

Por último, dejamos para este apartado un aspecto referente al entorno de trabajo *Matlab*. Al considerar una imagen como una variable de tipo matriz, de la forma $M(m,n)$ el primer parámetro corresponde a las filas que tendría una equivalencia con las ordenadas Y, y el segundo a las columnas, correspondiente con las abscisas X; esto puede generar confusión al tratar los píxel de la forma $M(x,y)$; como hace automáticamente *Labview*, o cualquier representación bidimensional de la imagen. En las funciones implementadas se han añadido ayudas/comentarios, ya que incluso estando familiarizado con la programación, es fácilmente confundible.

5.9.2 Consideración formato de imágenes, ficheros

La primera limitación en el número de líneas, columnas de datos, número de bandas espectrales... etc., está determinada por la capacidad de memoria y espacio de disco para almacenamiento y ejecución. Se ha generado un volumen considerable de datos, almacenados en dos discos duros extraíbles. Por otro lado el formato *.pat de datos hiperespectrales, al no ser estándar y tener un tamaño importante ralentiza el procesado con el propio programa y con otras herramientas.

IRvista.exe archivos *.bin → transformo en *Matlab.exe* a *.jpeg, *.bmp
Labview abre archivos *.aipd → 512 bytes de cabecera + imagen
Matlab → *.asv, *.fig, *.m

Por otro lado, hay que reseñar, que la imagen con *Labview* no se puede girar, por ello los valores de la posición x-y tendrán que corregirse en la gráfica de la magnificación, con la imagen invertida. La justificación es que la gira como muchos otros programas de imágenes, manteniendo las dimensiones establecidas y aplicando el giro al contenido de los píxeles, en *Matlab* se ha introducido la corrección de posición en la apertura de los ficheros.

6. Conclusiones

El desarrollo del proyecto se diferenció de varias partes. Se comenzó por el manejo del instrumental y de los equipos que componen el sistema; con el fin de poder caracterizarlos por separado y posteriormente ensamblarlos. Seguidamente se buscó obtener la presencia de gases de combustión en varios vehículos a diferentes distancias.

El principal motivo por el que calibrar el sistema lente IMSS + Cámara IR, se deriva de que los proveedores del hardware PAT, comercializan el sistema cerrado al usuario. El sistema utilizado, fue calibrado para una cámara Amber 256x256 píxeles, limitada por las horas de criogenización y no operativa actualmente. La necesidad de ensamblar la lente a otras cámaras con diferentes características requiere conocer este sistema y los efectos físicos que se plasman en las imágenes tomadas.

Por otro lado, el software que acompaña a la lente tiene dos versiones, la primera para una plataforma Windows 98 o anteriores y una versión más actualizada con la que hemos trabajado, bajo Windows XP. Sin embargo no están todas las funciones necesarias habilitadas, y el único parámetro configurable del software es el fichero de calibración. El hecho en sí mismo de modificarlo implica la deshabilitación automática de muchas prestaciones de la herramienta y responde como una violación de privilegios, lo que nos ha obligado a intentar tratar y procesar los datos en otros entornos.

Esta limitación básica del sistema, es su implementación cerrada, totalmente opaca al usuario. Motivo crucial a la hora de desarrollar nuestra aplicación, teniendo que diseñar funciones paralelas para procesar los datos tomados.

Dentro de los sistemas hiperespectrales del mercado, el que utilizamos basa su tecnología en óptica difractiva. El elemento de óptica difractiva es el responsable de la selección de las longitudes de onda. La energía que llega a un detector del array depende de la longitud de onda seleccionada (focal del sistema para esa longitud de onda), y de la posición del detector en el array, por lo que nos propusimos hacer un estudio para separar ambos componentes y quedarnos únicamente con la componente espectral.

La caracterización del sistema tuvo su origen en la determinación de las características generales del mismo, como ruido y parámetros básicos de un sistema infrarrojo. Posteriormente se modificaron las variables de calibración de la lente y se adquirieron imágenes tanto en laboratorio como en el exterior. Se capturó una colección de imágenes en diferentes días, con el fin de detectar determinados gases de combustión emitidos por tubos de escape de varios modelos de vehículos, en varias orientaciones y distancias.

El software que acompaña a la lente, *HyPatII.exe* queda bastante limitado al modificar los ficheros, incluso las máscaras de deconvolución espacial dependen del escenario, y no resultaron adecuados para nuestras medidas. A partir de este punto, se recurrió a otros entornos como *Labview* y *Matlab*, y se programó un algoritmo de fusión de imágenes, para poder trabajar con las imágenes hiperespectrales capturadas por el sistema. Puesto que también se disponía de espectros puntuales de las imágenes deconvolucionadas, se intentó buscar patrones similares de gases a partir de los espectros simulados por el programa *Modtran*.

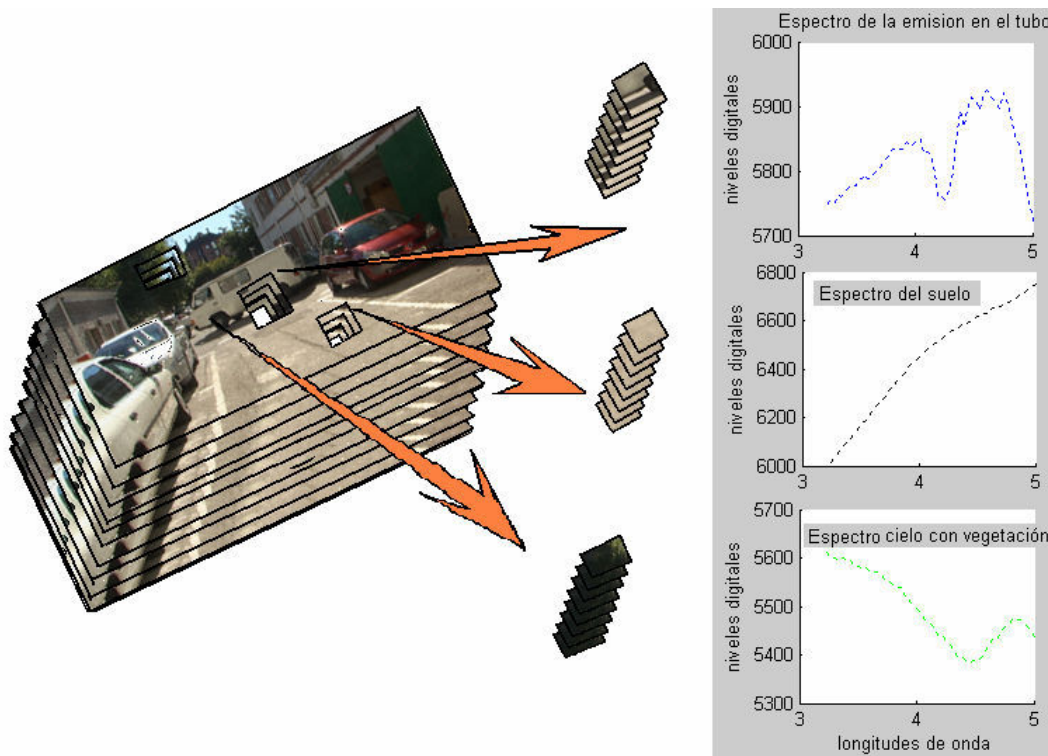


Fig. 6.1 Esquema de una colección de datos hiperespectrales y su contenido espectral.

Aunque se han presentado los diferentes resultados en cada uno de los capítulos de este documento, en el siguiente apartado se comentarán las conclusiones obtenidas.

6.1 Resultados de las medidas.

En primer lugar, se pensó que se podría interpretar el principio de funcionamiento de la deconvolución espacial-espectral del sistema y la caracterización de la correlación espectro-espacial del mismo, a partir de los resultados finales de forma retrospectiva. Esta idea no ha sido posible, no sólo por los problemas derivados de la utilización del sistema en condiciones distintas a las que facilita el fabricante, sino por el complejo tratamiento que hace su software sobre las imágenes, y del que no se tiene información alguna.

La caracterización en Energía, sirvió primeramente, para determinar la intensidad captada en relación con la longitud de onda, y la dependencia con la lente hiperespectral, y por otro lado, para el cálculo de la magnificación del sistema y su relación con la focal. Muchas de las medidas realizadas tienen su fundamento en justificar cada uno de los resultados que sin duda, influyen en la correcta utilización del sistema.

No debería deducirse de este proyecto, que por no haber sido capaces de detectar humos con la lente hiperespectral; el sistema no sea válido para ello, únicamente que no fue posible en las condiciones escogidas y por la baja emisión de los vehículos. Este hecho se constató ya que junto a la lente IMSS, en las medidas exteriores se había colocado un espectro-radiómetro¹ que tampoco registró la presencia de humos.

¹ Figura 8.3.4 Apéndice 8.3

<i>LabView</i>	SIFT, responsividad	Sí
<i>LabView</i>	MTF, respuesta en frecuencia	Sí
<i>LabView</i>	NETD, ruido	Sí
<i>LabView</i>	CENTRO DE MAGNIFICACIÓN	No
<i>IRvista</i>	PROMEDIOS Y COMPONENTES DE RUIDO	Sí
<i>Matlab</i>	MAGNIFICACIÓN	Sí
<i>LabView</i>	CARACTERIZACIÓN ENERGIA	Sí
<i>Matlab</i>	EMISIVIDAD DEL TUBO DE ESCAPE	Sí
<i>Matlab</i>	CALIBRACION EN RADIANCIA	Sí
<i>Modtran</i>	OBTENCION ESPECTROS SIMULACION	No
<i>HypatII</i>	DECONVOLUCION ESPACIAL	Sí
<i>HypatII</i>	DECONVOLUCIÓN FRECUENCIAL	No
<i>Matlab</i>	DETECCIÓN DE HUMOS DE COMBUSTIÓN	No
<i>Matlab</i>	FUSIÓN DE IMÁGENES. PUNTOS CALIENTES	Sí

Tabla 6.1. Resumen de medidas realizadas por bloques.

Tras hacer una valoración de los datos obtenidos, se puede afirmar que no se consigue lo buscado, primeramente porque falta documentación sobre el proceso al que se someten los datos, y cómo se crean los patrones de deconvolución. Y en segundo lugar, porque el software se autobloquea limitando la operatibilidad del mismo, al modificar los ficheros de calibrado.

No obstante, la calibración de la cámara y el sistema completo a nivel de laboratorio si ha resultado satisfactorio, pese a las contrariedades de corrección de magnificación distinta para cada dimensión.

La aplicación de los medios en cuanto a instrumental disponible y software para tratar las imágenes hiperespectrales, ha permitido hacer un estudio bastante completo del sistema y de las imágenes capturadas.

7. Bibliografía

- [1] Alien Vision. Exploring the Electromagnetic Spectrum with Imaging Technology. Austin Richards. ISBN: 0819441422
- [2] Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems. Gerald C. Holst
- [3] Electro-Optical Imaging System Performance. Gerald C.Holst.
- [4] EF Lens Work III. Los ojos de EOS. Cannon Inc.
- [5] Digital Image Processing. Rafael C. González, Richard E. Woods, Ed. Addison-Wesley Publishing Company.
- [6] Digital Image Processing. William K. Pratt, Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Image Processing Toolbox. User's Guide, Matlab. The MathWorks, Inc
- [8] Manual HypatII. Manual lente IMSS
- [9] Tutorial del Toolbox Vision Labview
- [10] Manual Test Bench I-SITE de Optikos
- [11] Evaluation of thermal cameras in quality System according to ISO 9000 or EN45000 satdards/ Chrzanowski
- [12] Schaepman (1997)

Especificaciones de la cámaraIR

<http://www.flirthermography.com/spain2/cameras/camera/1064/>
<http://www.patinc.com/>

Junto con los documentos del proyecto, se incluyen en un directorio en formato digital, las diferentes páginas consultadas.

8. Capítulo: Apéndices

8.1 Apéndice I: Descripción de la cámara IR Phoenix de Indigo	
8.1.1 Descripción.....	8.1
8.1.1.1 Detector de InSb	8.1
8.1.1.2 Prestaciones del sensor.....	8.2
8.1.1.3 Salida y análisis digital en tiempo real de 14-bits.....	8.2
8.1.1.4 Electrónica del sistema de imagen en tiempo real.....	8.3
8.1.1.5 Electrónica del sistema de adquisición de datos.....	8.3
8.2 Apéndice II: Manual de la Lente Hiperespectral	
8.2.1 Parámetros y prestaciones.....	8.6
8.2.2 Software de la lente IMSS.....	8.6
8.2.2.1 Programa HyPAT II.....	8.7
8.2.2.1.1 Menu <i>View</i>	8.7
8.2.2.1.2 Ajuste de Histogramas.....	8.7
8.2.2.1.3 Ventana de Espectro.....	8.9
8.2.2.1.4 Información de la imagen.....	8.9
8.2.2.1.5 Control de la Lente y adquisición de datos.....	8.9
8.2.2.1.6 Medida de Temperatura.....	8.10
8.2.2.1.7 Extracción Espectral.....	8.11
8.2.3 Compensación aplicaciones <i>close-range</i> , blancos próximos.....	8.12
8.2.4 Procedimiento de calibración espectral.....	8.13
8.3 Apéndice III: Datos medidos, ensayos y tablas de resultados.	
8.3.1 Pruebas Realizadas.	8.14
8.3.2 Ensayos en el Laboratorio.	8.16
8.3.2.1 Configuración de la Cámara sin Lente. <i>B/C</i>	8.16
8.3.2.2 Configuración de la Cámara con Lente (NUC, BPR.)..	8.16
8.3.2.3 Configuración de la Cámara con Lente. SiFT, NETD..	8.17
8.3.2.4 Calculo de la SiFT de la lente.....	8.19
8.3.2.5 Consideraciones de Formatos de almacenamiento.....	8.19
8.3.2.6 Configuración Hypatt.	8.19
8.3.3 Medidas Exteriores	8.21
8.3.3.1 Descripción.....	8.21
8.3.3.2 Datos Meteorológicos en las medidas exteriores.	8.22
8.3.3.3 Medidas en las Referencias (t_4AREAS, 20 JULIO)...	8.24
8.3.4 Obtención de la magnificación del sistema.....	8.25
8.3.4.1 Curvas de medida sobre cortes transversales.....	8.25
8.3.4.2 Constelación de medidas de magnificación. anchuras..	8.26
8.3.4.3 Presentación de la rutina de cálculo de anchuras(λ)...	8.28
8.3.5 Determinación del centro de magnificación.....	8.29
8.3.6 Medidas de Transmitancia debida a determinados gases.....	8.30
8.3.7 Banco de optikos, medida lsf, mtf, ficheros de configuración....	8.33
8.3.8 Fichero de calibración de Hypatt.....	8.34
8.3.9 Conexiones PC- Cámara IR.....	8.35
8.4 Apéndice IV: Código fuente básico	

8.1 APÉNDICE I: Descripción de la cámara IR Phoenix de Indigo



Fig. 8.1.1: imagen de los módulos, controlador y lente

8.1.1 Descripción¹

La Phoenix es una cámara desarrollada especialmente para aplicaciones científicas, de ensayos no destructivos o militares proporcionando alta flexibilidad y rendimiento. Es un sistema modular, compuesto por un cabezal de la cámara y un procesador electrónico de señal, la Electrónica de Imagen en tiempo real (RTIE) y el Sistema de Adquisición de datos (DAS).

Está fabricada por Indigo Systems. Incluye un FPA (*Focal Plane Array*) que consiste en 640*512 elementos detectores con un *pitch* de 25 μ m*25 μ m, y su rango de sensibilidad comprende de 1 a 5 μ m.

8.1.1.1 Detector de InSb:

Para la mayoría de los detectores de infrarrojos, la función responsividad (relación entre señal de salida eléctrica y señal de entrada óptica) y el ruido interno son función de su temperatura. La figura ilustra las curvas características de responsividad y ruido para un detector de InSb. La temperatura del detector depende de la capacidad refrigerante del subsistema de refrigeración, de la temperatura ambiente y de la carga de calor inducida por la electrónica situada cerca del detector. Según cambia la temperatura, cambian las características del detector y su respuesta, y este cambio puede ocurrir incluso durante la toma de escenas.

¹ catálogo phoenix. AppendixB System Specifications

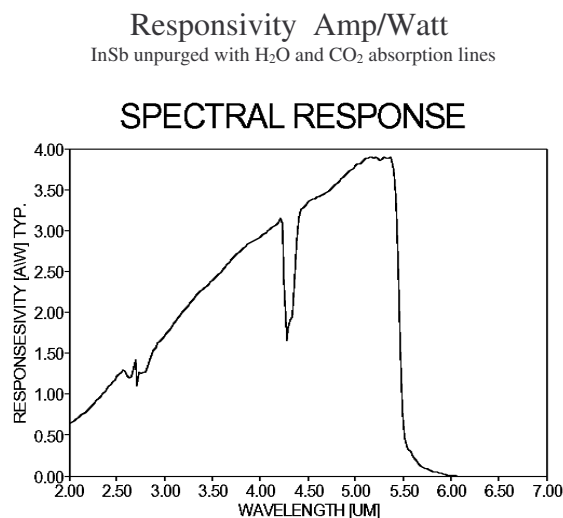


Fig. 8.1.2: Respuesta espectral del detector InSb

El sensor refrigerado de InSb (Indio Antimonio) de la Phoenix detecta fácilmente diferencias de temperatura muy pequeñas. El detector InSb ofrece una prestación de imagen extraordinaria en la banda media (opciones disponibles; 3.0 μm - 5.0 μm ó 1.5 μm - 5.0 μm) con una medida de alta precisión.

8.1.1.2 Prestaciones del sensor

El sensor infrarrojo de la Phoenix ha sido fabricado utilizando los circuitos integrados de lectura (ROICs)² usando un proceso de hibridación por colisión de indio, con tecnología CMOS propios de FLIR. Estos ROICs ofrecen muchas prestaciones avanzadas que incluyen: modo de exposición foto del píxel (simultáneos), ganancia ajustable, tiempo de exposición variable, ventanas y función inverso/reverso.

8.1.1.3 Salida y análisis digital en tiempo real de 14-bits

Utilizando la salida digital de 14-bits del conector RS-422 en la RTIE, la Phoenix puede transferir los datos digitales a 14.75 mega píxeles por segundo a un PC para la grabación y el análisis. El DAS tiene la capacidad de transmitir directamente desde el cabezal de la cámara al PC hasta 40 mega píxeles por segundo para el análisis y el almacenamiento. Ambos sistemas son compatibles con una gran variedad de paquetes de software.

² Readout Integrated Circuit

8.1.1.4 Electrónica del sistema de imagen en tiempo real

La Electrónica de Imagen en Tiempo Real (RTIE) es un subsistema electrónico que proporciona video analógico y digital, con frecuencia de datos de hasta 14.75 mega píxeles por segundo. El RTIE proporciona corrección de ganancia de píxel y de *off-set* en tiempo real, PAL (NTSC opcional), así como S-Video. La Phoenix tiene una configuración modular bajo la cual el cabezal de la cámara está separado de la electrónica por un cable interfaz de 3 a 13 metros. La Phoenix está diseñada para controlarse de forma remota a través de una aplicación con interfaz gráfica de usuario instalada en el PC. La arquitectura de la Phoenix permite la instalación en campo de actualizaciones de software de la cámara.

8.1.1.5 Electrónica del sistema de adquisición de datos.

La Phoenix es capaz de transmitir datos a frecuencia desde 345Hz en matriz completa hasta 38 kHz disminuyendo la ventana.

El DAS incluye una tarjeta de procesado interfaz/sincronismo propia capaz de manejar los datos a frecuencias máximas de 40 mega píxeles por segundo. Esta cámara, tiene una configuración modular que permite una separación de 3 a 13 metros entre el cabezal de cámara y la electrónica DAS. Modos de sincronización, *windowing* y funciones de *trigger* del RTIE son elementos comunes al Sistema de Adquisición Digital (DAS). Algo que diferencia al sistema RTIE del sistema DAS es que este último cuenta con una provisión para dos canales de salida adicionales, cosa que permite al sistema electrónico DAS obtener las máximas prestaciones del FPA.

Con la Phoenix se pueden analizar imágenes de forma individual que cubran amplios rangos de temperatura siendo capaz de detectar cualquier diferencia mínima de temperatura que se produzca.

FLIR Lens Recommendation Calculator for Cooled R & D Cameras

Choose camera: Phoenix InSb (640)

Choose unit of measure: Meters

Object Distance: 2000 meters

Object Dimension: 2 meters

Number of pixels object should cover: 4 pixels

Calculate

Optimal lens focal length: 100 mm

Based on the focal length calculation, we recommend the following lens:

- Recommended Standard lens: 100mm
- Actual number of pixels on object using recommended lens: 4
- Horz. Field of View for recommended lens: 9.1

NOTE: The lens calculator is offered as a resource to help customers with lens selection — not as a guarantee of specific lens performance. The calculated result provides an estimate of detection / recognition range that may be expected. Actual range performance may vary based on how the camera is set up, environmental conditions, and/or operator experience.

Fig. 8.1.3: Imágenes de los catálogos de Indigo para la Phoenix

Camera Head Specifications				Phoenix-Near	Phoenix-Mid	Phoenix-Long	
Detector	Indium Gallium Arsenide (InGaAs)			Indium Antimonide (InSb)		Gallium Arsenide (GaAs) Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIP)	
Spectral Range	0.9 - 1.7 microns			1.5 - 5.0 microns		8.0 - 9.2 microns	
Cold Filter Bandpass	Not Required			3.0 - 5.0 μm standard		Not Required	
Resolution	320 (H) x 256 (V) pixels or 640 (H) x 512 (V) pixels			320 (H) x 256 (V) pixels or 640 (H) x 512 (V) pixels		320 (H) x 256 (V) pixels or 640 (H) x 512 (V) pixels	
Detector Size	30 x 30 μm for 320 x 256 25 x 25 μm for 640 x 512			30 x 30 μm for 320 x 256 25 x 25 μm for 640 x 512		30 x 30 μm for 320 x 256 25 x 25 μm for 640 x 512	
Well Capacity		High Gain	Low Gain	18 M electrons for 320 x 256 11 M electrons for 640 x 512		18 M electrons for 320 x 256 11 M electrons for 640 x 512	
	mid large	107 K electrons	3.5 M electrons 2.5 M electrons				
Integration Type	Snapshot			Snapshot		Snapshot	
Integration Time (Electronic Shutter Speed)	320 x 256: 500 ns to full frame time		640 x 512: 3 μs to full frame time	320 x 256: 9 μs to full frame time		640 x 512: <50 μs to full frame time	
Sensor Assembly f/#	Set by lens iris			f/2.5 standard, f/4.1 optional		f/2.5 standard	
Sensor Cooling	Thermoelectric (TEC) stabilization			Stirling closed cycle cooler; optional Liquid Nitrogen (LN ₂)		Stirling closed cycle cooler	
Lens Mount	C-mount			Bayonet Twist-Lock		Bayonet Twist-Lock	
Power Dissipation	< 25 Watts steady-state (25 °C)			40 Watts steady-state (25 °C)		45 Watts steady-state (25 °C)	

Fig. 8.1.4: Catálogos de Indigo, recuadro la Phoenix MWIR

8.2 APÉNDICE II: Manual de la Lente Hiperespectral

Algunas de las cosas descritas en este apéndice han sido presentadas en el capítulo 2 correspondiente a la caracterización del sistema IMSS, donde se ha presentado el sistema, su funcionamiento y los problemas asociados. En este apéndice sin embargo se hace una descripción más profunda de la presentación del software y sus prestaciones así como las funciones que implementa.

La lente hiperespectral IMSS es bastante robusta y ha sido testada durante varios cientos de horas en todo tipo de condiciones ambientales. El hecho de utilizar una única lente, posibilita el tamaño y peso reducido que caracterizan este sistema hiperespectral, usado en aplicaciones como prevención de amenazas aéreas. En la introducción resaltamos este hecho y algunas de sus aplicaciones. Una de ellas, es la detección de materiales de camuflaje, ya que el fondo compuesto por hierba, arena y polvo tienen un espectro muy similar mientras que no sucede lo mismo con el material camuflaje que es muy diferente en longitudes de onda más altas, de esta forma se consigue discernirlo obteniendo sus espectros .

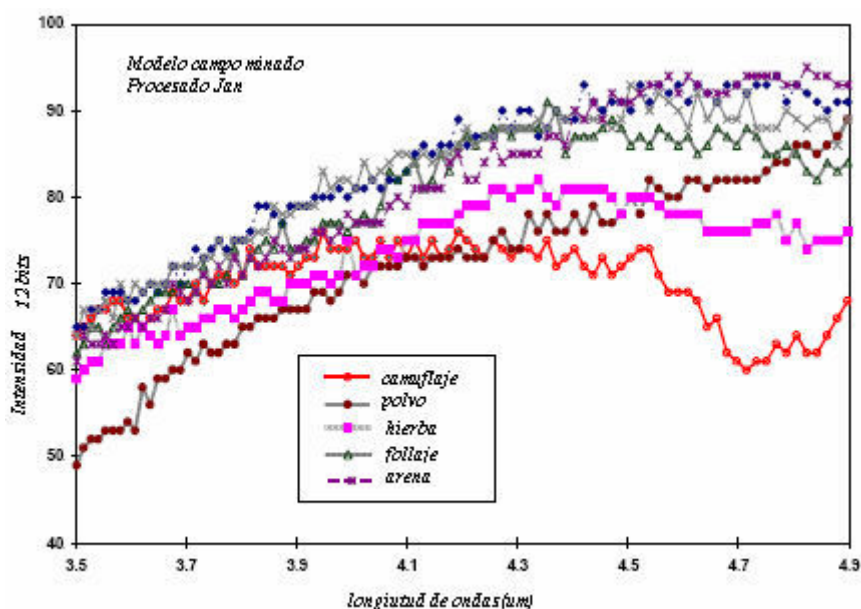


Fig. 8.2.1 Gráfica de aplicaciones de camuflaje.

El fabricante suele dar datos de ruido como el NESR (*Noise Equivalent Spectral Radiance*) medido con un monocromador; pero se hace necesario caracterizar el sistema y medir el ruido equivalente en las condiciones de medida para cada aplicación. Cuando se compara con otros sistemas se suele hacer mención a la ventaja que supone que este sistema se obtiene en función del ruido photon shot que aparece en una estrecha banda espectral frente al FTIR¹ que comprende toda la banda de paso espectral.

El siguiente diagrama de bloques muestra como se conectan los equipos y sus interfaces. El conector/cable RS232 une el controlador del motor de la lente IMSS, en la fuente de alimentación de la misma; y el PC², sirviendo de plataforma para el envío/recepción de tramas de control para el posicionamiento de la lente. El cable BNC entre la fuente de la IMSS, y el *Frame Grabber* envía la trama de captura (*trigger*) para habilitar la adquisición de un *frame* o una secuencia.

¹ Explicar otros sistemas

² Personal Computer

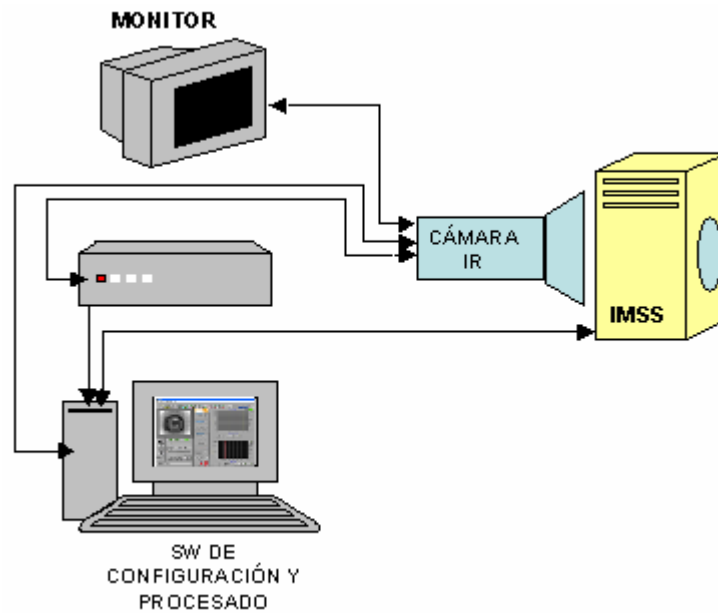


Fig. 8.2.2 Conexión del sistema completo.

8.2.1 Parámetros y prestaciones

Las principales variables de configuración y las prestaciones del sistema los listamos a continuación. Parte de la resolución de las imágenes y su tratamiento está relacionado estrechamente con ellos.

- Número de frames o tramas adquiridas
- Modo de captura: *Step mode* (paso a paso) o *Scan mode* (continuo)
- Funciones de control de la lente: espaciado, longitudes de onda, blanco...
- Visualización multiventana simultánea
- Adquisición en tiempo real y visualización en video
- Aumento digital *zoom*
- Visualización de la colección de datos hiperespectral.
- Histograma interactivo independiente de la imagen *sub-window*
- Tanto el espectro temporal como la longitud de onda son representados a la vez.
- Cada valor de píxel puede ser visualizado como un número digital o con su temperatura de calibración en grados centígrados °C.
- Para cada *frame* son visualizadas todas sus longitudes de onda.
- Pueden ser aplicados todos los algoritmos de procesado.

8.2.2 Software de la lente IMSS

Este software, está diseñado para operar con el sensor multispectral IMSS de PAT. El sistema lo componen: cámara+lente, ordenador, *frame grabber* y controladores de la aplicación.

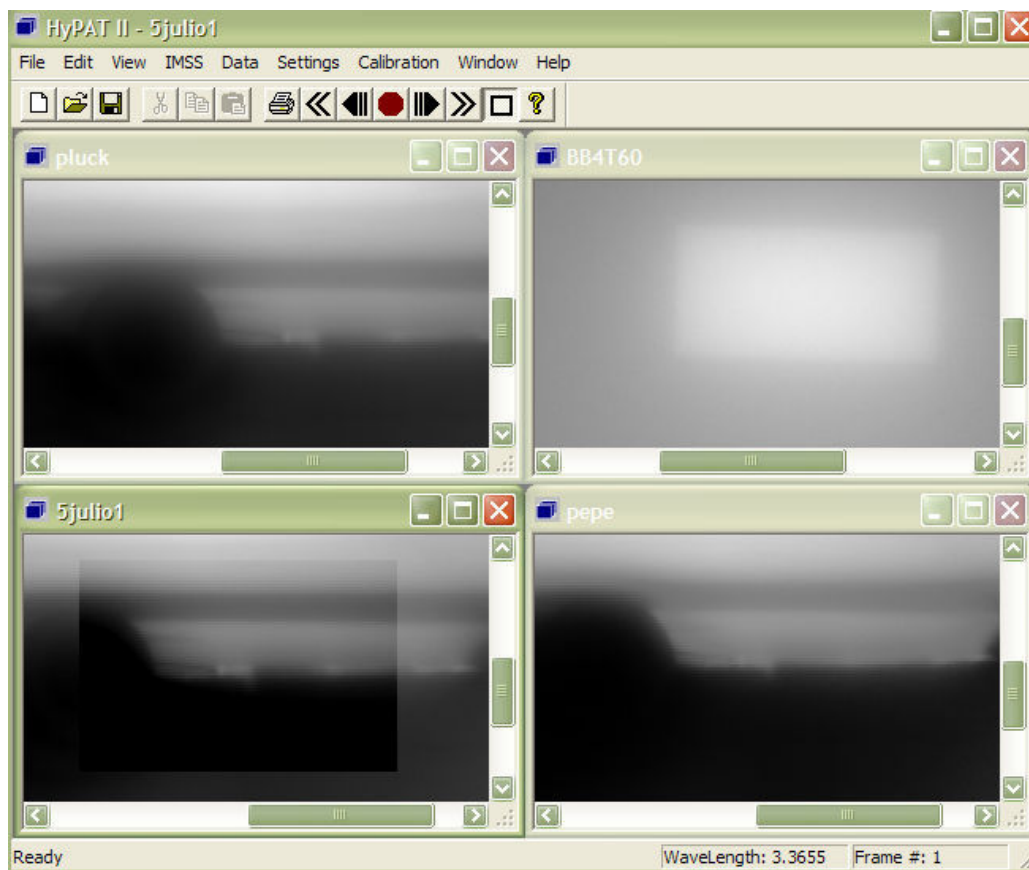


Fig. 8.2.3: Entorno gráfico del Software. Ejemplo imágenes tratadas.

8.2.2.1 Programa HyPAT II

La primera configuración necesaria, es la de la lente. Describiremos seguidamente las funciones de control de la IMSS, durante la captura de datos, almacenamiento en el PC y las funciones de post-procesado para crear un espectro del blanco de interés en la escena; así como las utilidades necesarias que describen el tratamiento posterior. Los pasos importantes han sido ya descritos en el cuerpo del proyecto, en estos apartados ampliamos su descripción.

8.2.2.1.1 Menú *View*

El software proporciona la capacidad para seleccionar opciones de video, brillo, y visualización de las imágenes.

8.2.2.1.2 Ajuste de Histogramas

Los histogramas son un modo gráfico muy útil para variar el contraste de las imágenes y ajustar la paleta a los niveles digitales de cada imagen. Los histogramas son independientes para cada imagen dentro de la colección capturada. El HyPAT II permite hacerlo directamente con los niveles máximo y mínimo del rango de la imagen. Las barras rojas delimitan la zona de intensidad ente el blanco y el negro con 8 bit, permitiéndose a su vez hacer un promedio a 2 desviaciones típicas de la media.

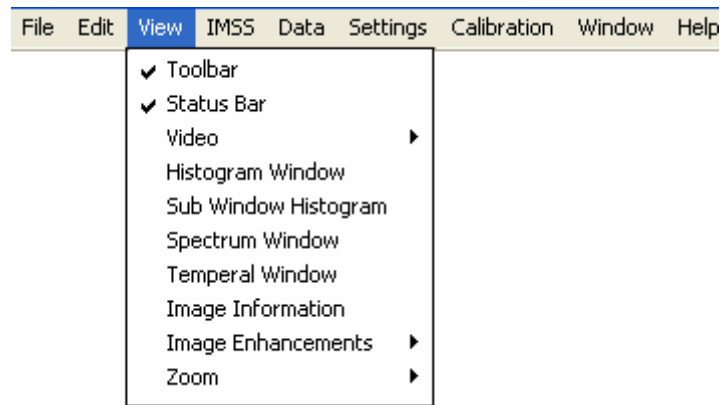


Fig. 8.2.4: Menú View, opciones de histogramas y Parámetros de imagen.

Para ajustar el histograma de la imagen almacenada, a una zona concreta con la opción *box tool* seleccionando *Sub Window Histogram*.

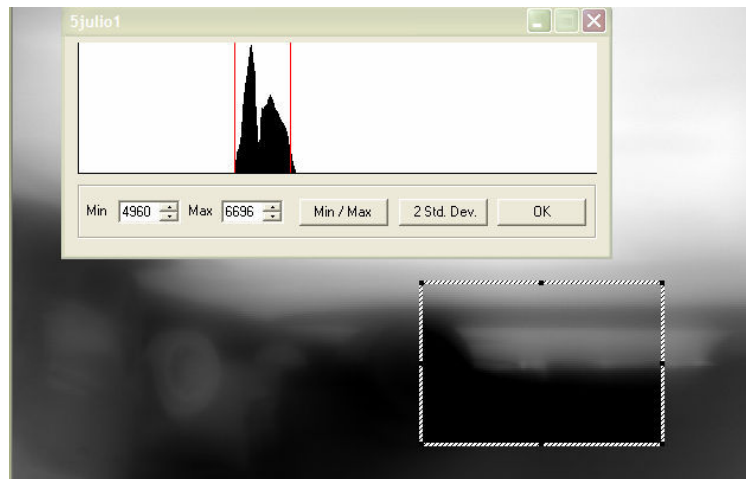


Fig. 8.2.5: Histograma de la imagen completa

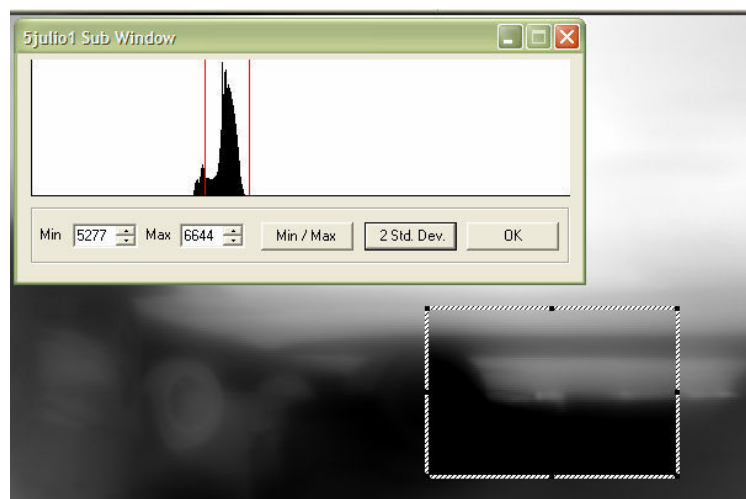


Fig. 8.2.6: Histograma de la zona seleccionada de la escena.

8.2.2.1.3 Ventana de Espectro

Esta opción nos permite obtener el espectro de la imagen. Cuando el fichero de datos es IMSS, entonces se visualiza el espectro de las imágenes a cada longitud de onda, mientras que si la imagen corresponde a una captura temporal de una única longitud de onda, la representación es simplemente un histórico de los valores de intensidad de cada píxel en la colección de datos.

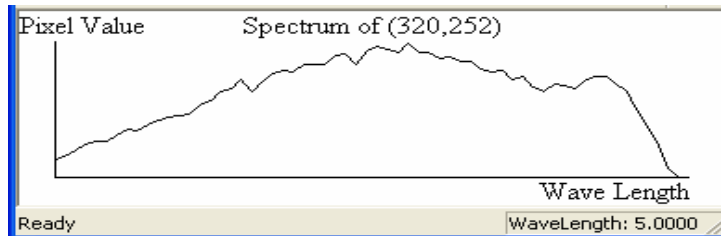


Fig. 8.2.7: Espectro en el píxel correspondiente al tubo de escape.

8.2.2.1.4 Información de la imagen

Los parámetros estáticos de la imagen, como tamaño, rango de niveles de intensidad, formato...etc. y la colección hiperespectral, se presentan en una ventana como tabla de características. Esta incluye el tamaño de la imagen, el número de tramas, la resolución de bit, valores de intensidad máxima y mínima, media, y la desviación estándar. Para la opción IMSS, las variables descritas serían las longitudes de onda del rango, el modo de operación, la resolución espacial, centro de magnificación, blanco...etc

8.2.2.1.5 Control de la Lente y adquisición de datos

Esta opción es una de los pasos básicos en la caracterización de la lente y en definitiva, del sistema por eso ha sido desarrollada en el capítulo 2. La ventana de configuración de la lente y la captura de imágenes, se divide en 4 secciones: Parámetros de la lente, posición actual de la lente, posiciones de la lente y rango del blanco.

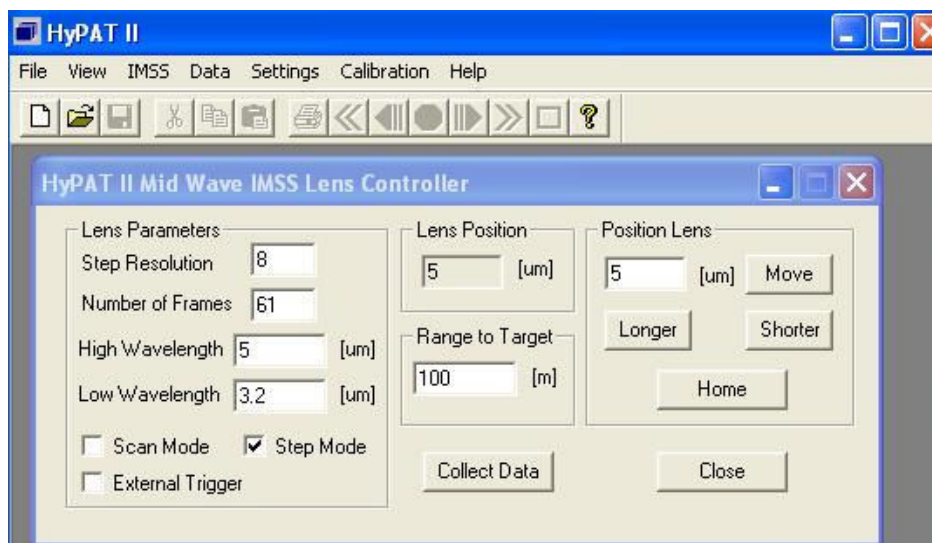


Fig. 8.2.8: HyPAT II versión antigua. Menú IMSS/ Lens Control

- *Lens Parameters*, parámetros de la lente. Existen dos modos de controlar las lentes, modo *Scan* y modo *Step*. La unidad IMSS proporciona un pulso de disparo TTL al inicio de la secuencia de adquisición, esta señal de *trigger* se produce únicamente al inicio de una colección en modo *Scan*, y para cada trama de adquisición en el modo *Step*. También existe la posibilidad de alimentar con un *trigger* externo para controlar los comandos de inicio del movimiento de la lente, pero esta opción obligaba a reconfigurar parámetros de la cámara, como NUC...etc.
- *Lens Position*, posición de la lente.
- *Position Lens*, recorrido de la lente.
- *Range to target*, rango del blanco. La distancia hiperfocal teórica está del orden de los 40 pies
- *Collect Data*, inicio de captura. Antes de la adquisición, el software a partir del rango y los parámetros dados, calcula e informa sobre el número mínimo de *frames* necesarios, limitando la velocidad y condicionado por las capacidades de almacenamiento del sistema.

8.2.2.1.6 Medida de Temperatura

A continuación describiremos el procedimiento para medir la temperatura de objetos en el campo de visión.

Seleccionando el menú *calibration* y referenciando los ficheros que contienen los escenarios a temperaturas fría y caliente, así como el actual. Tras la calibración, seleccionando “*Settings, Pixel Value*” se cotejan las temperaturas. Se puede extraer un fichero de calibración a partir del proceso. Cuando este fichero está abierto, el valor de cada píxel se muestra en la esquina inferior izquierda de la ventana.

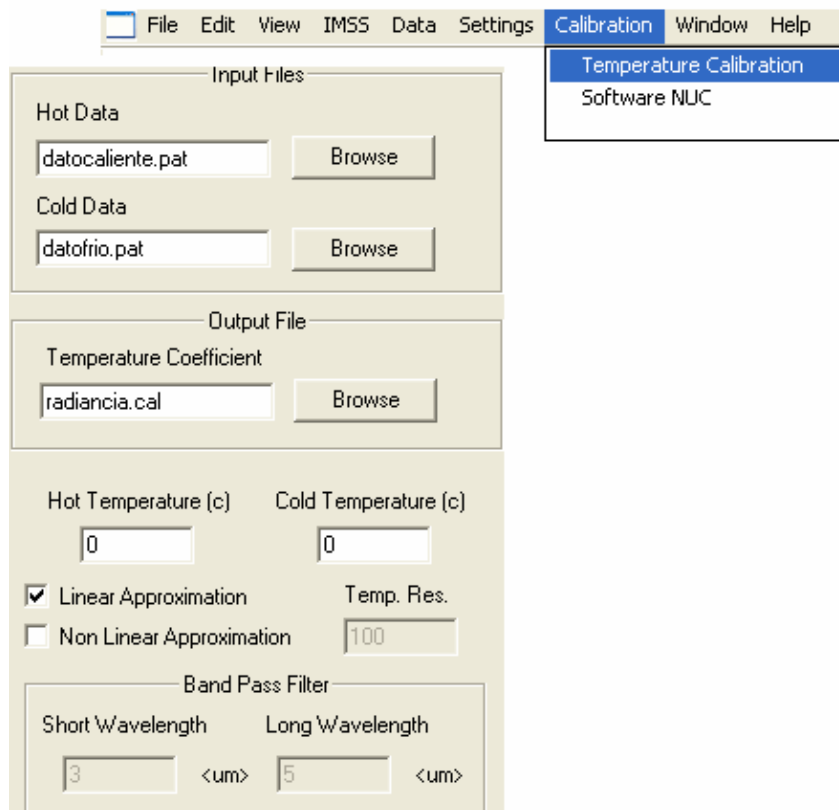


Fig. 8.2.9: Vinculación de ficheros de calibrado en radiancia.

8.2.2.1.7 Extracción Espectral

Ha sido desarrollada una variedad de opciones que posibilitan la rápida extracción del espectro de una región deseada sin grabar el campo de visión del sistema, accesibles desde el ejecutable Hypatt.exe. Los archivos manejables, tienen extensión ***.pat**; directamente al abrirlos, de forma automática distribuye a una desviación estándar por encima y por debajo de la media, la escala de grises del rango. Esta distribución no siempre es la óptima para todas las imágenes, por tanto se puede ajustar el histograma, con el *menú View*, modificando el rango para la asignación de grises.

- Deconvolución espacial. Hay dos técnicas implementadas en el software. Ambas referidas a los algoritmos en los que se basan. La primera es la llamada JAN. Corresponde a una estrecha y no lineal deconvolución que conlleva una considerable cantidad de tiempo. Este algoritmo tiene precargadas las funciones necesarias y aunque más pesado, es el más preciso. La otra opción, es mediante el uso de la convolucion *kernel* que está implementada con una opción de máscara intercambiable y de rápida respuesta. Aunque hay varias máscaras que han sido utilizadas con este software, hay dos especialmente fiables, la máscara HARRY y la máscara DENNIS, ambas de 5x5 kernels y que deben su nombre a sus desarrolladores. La máscara de deconvolución emula la función desenfoque espectro-espacial de la lente IMSS. Esta función desenfoque se usa de forma dependiente con la escena capturada, siendo necesario probar las diferentes máscaras hasta encontrar la óptima.

- Compensación de magnificación. Conforme la lente IMSS se traslada axialmente a lo largo del eje óptico, para focalizar las diferentes longitudes de onda, la longitud focal cambia, a su vez cambia el campo de visión y con ello se produce un cambio de magnificación del tamaño de la imagen en el plano focal.

- Creación de un fichero de *tracking* o seguimiento. El *software* HyPAT II permite al usuario especificar las regiones espaciales que serán analizadas para obtener un espectro infrarrojo. El fichero de seguimiento se crea seleccionando del *menú data*, la opción crear fichero de seguimiento. Para seleccionar los píxeles de interés se usa un icono circular con una línea cruzada, y queda marcada la localización y la intensidad de la selección, no siendo necesario la selección en cada trama. Si el blanco está fijo, bastaría seleccionar la primera y última trama, mientras que para blancos móviles o sin compensar la magnificación la cantidad de píxeles seleccionados será función del grado del movimiento.

- Generación del espectro. También en el *menú data* aparece la opción de crear un espectro del blanco de interés.

- Deconvolución espectral. Extenderemos el concepto de deconvolución espectral así como la metodología utilizada para datos hiperespectrales en el apartado 8.2.4.

8.2.3 Compensación para aplicaciones *close-range*, *blancos próximos*

La firma espectral medida de un objeto, depende por encima de su rango del la lente IMSS, a menos que la distancia entre el objeto y la misma se pueda considerar infinita. Para una buena aproximación, el DOE³ puede ser generalizado como una lente delgada, las relaciones ópticas para alcance cercano pueden ser derivadas de las ecuaciones de la lente y asumir que el producto entre la longitud focal y la longitud de onda para el DOE es una constante.

La aplicación de HyPAT II compensará la imprecisión espectral del blanco si se indica en la ventana correspondiente la distancia del mismo, si éste es asumido como infinito se arrastra un error que describimos a continuación.

Siendo o la distancia entre el blanco y la lente, la ecuación que relaciona la longitud focal de la IMSS y la distancia de la imagen i , de la lente al detector:

$$(1) \quad \frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

si el objeto está en el infinito, entonces la distancia a la imagen es igual a la longitud focal. Resolviendo para el objeto de rango o :

$$o = \frac{(i \cdot f)}{i - f}$$

pero tenemos que para DOE: $\lambda \cdot f = cte$; y sustituyendo esta expresión para la longitud focal f , para posteriormente despejar la longitud de onda en función de las variables.

$$(2) \quad o \cdot \left(i - \frac{cte}{\lambda} \right) = \frac{(i \cdot cte)}{\lambda}$$

$$(3) \quad \lambda_{REAL} = cte \cdot \frac{(i + o)}{i \cdot o}$$

La lente IMSS, asume que el objeto está en el infinito, cumpliéndose $i=f$. Y bajo esta premisa, la ecuación depende de la distancia focal:

$$(4) \quad \lambda_{IMSS} = cte \cdot \frac{(f + o)}{f \cdot o}$$

$$\lambda_{ERROR} = \lambda_{REAL} - \lambda_{IMSS} = cte \cdot \left(\frac{i + o}{i \cdot o} - \frac{f + o}{f \cdot o} \right) = cte \cdot \frac{f - i}{i \cdot f}$$

$$(5) \quad \lambda_{ERROR} = (\lambda_{IMSS} \cdot f) \cdot \frac{(f - i_{REAL})}{f \cdot i_{REAL}} = \lambda_{IMSS} \cdot \frac{\left(f - \frac{f \cdot o}{o - f} \right)}{\frac{f \cdot o}{o - f}} = -\lambda_{IMSS} \cdot \frac{f}{o}$$

El resultado da un error para la longitud de onda, función de la distancia al objeto, siendo siempre negativo y a su vez, independiente de la longitud de onda. Lo que significa que la medida de longitud de onda λ_{IMSS} es siempre menor que la λ_{REAL} y λ_{ERROR} .

³ device on evaluation

Indica la medida de error espectral teórica que presentaría el sistema IMSS como una función de la distancia si la condición de rango estuviese siempre activada en infinito = 10^{10} m. Con esta consideración la medida espectral de un blanco sufre un error aproximado del 0.5 % si el blanco está localizado a unos 14 m de la lente. Hicimos mediciones, incluidas en el capítulo 5, a una distancia de 23 m y 100m, para comparar la combustión de humos.

$$(6) \quad \frac{(\lambda_0 \cdot f_0)}{o}$$

Para corregir las medidas de distancia en la IMSS, el controlador de la lente añade este valor a la medida de longitud de onda. El numerador corresponde sencillamente a la constante del DOE. Para la radiancia del sistema IMSS, este producto tiene un valor aproximado de 412mm- μ m.

8.2.4 Procedimiento de calibración espectral

La precisión espectral de las medidas realizadas con el sistema hiperespectral IMSS, depende de tres factores principalmente:

- La posición espectral absoluta para una medida está en función de la localización del conmutador que provee la posición absoluta referenciada al ensamblaje de la lente.
- Cualquier mala alineación en el sistema tendrá efectos en la precisión de las medidas espectrales
- El conocimiento de la posición del blanco bajo observación implica un factor de corrección de las medidas tomadas.

La compensación de los datos por el efecto de la distancia a la IMSS, tiene acoplado un término adicional a la medida de la longitud de onda, que es inversamente proporcional a la posición del blanco.

$$\lambda_{rcorr} = \lambda_{IMSS} + \frac{FLAMPROD}{alcance}$$

Donde λ_{rcorr} (*Range-corrected*): longitud de onda medida con alcance corregido

λ_{IMSS} : longitud de onda medida sin corrección.

FLAMPROD: producto de la distancia focal por la longitud de onda de la IMSS.

alcance (*range*): distancia al blanco desde el DOE medida en milímetros.

Las no-linealidades espectrales son compensadas en el sistema por el cómputo del término de segundo grado de la corrección de la distancia o rango.

$$\lambda_{CORR} = \lambda_{rcorr} + (a_1 + a_2 \cdot \lambda_{rcorr} + a_3 \cdot \lambda_{rcorr}^2)$$

λ_{CORR} : longitud de onda tras la corrección.

Los sistemas de testeo de calibración son modificados durante su elaboración para determinar el valor de los tres coeficientes a_1 , a_2 y a_3 , que son usados para compensar los *offsets* espectrales del sistema y las no-linealidades.

8.3 APÉNDICE III: Datos medidos, ensayos y tablas de resultados.

El objeto de este apéndice, a modo de informe es la presentación de pruebas de ruido, resolución y comportamiento realizadas frente a diferentes focales que varían mecánicamente por la lente hiperspectral, y la comprobación de las prestaciones de la cámara Phoenix. Las características de las medidas y su metodología, están desarrolladas en el cuerpo del proyecto.

8.3.1 Pruebas Realizadas.

- Parámetros de Configuración
- Medida de la función de transferencia SiFT
- Medida del ruido temporal NETD, IETD
- Medida de la MTF
- Curvas I/λ
- Curva tamaño/ λ ,
- Curvas anchura miras %

Cámara IR:

- Características de respuesta: SiFT
- Medidas de resolución: MTF horizontal, IFOV
- Características de ruido: Medida de la NETD, IETD, FPN

Cámara IR+ lente IMSS:

- Características de respuesta: SiFT
- Medidas de resolución: MTF horizontal, IFOV
- Características de ruido: Medida de la NETD , IETD, FPN
- Alineamiento

Procesado de imágenes:

Determinación calibrado en temperatura:	100m turismo diesel orientación OE 23m furgoneta diesel orientación SN
Determinación de la ϵ de cuerpo gris:	100m turismo gasolina orientación SN
Fusión de imágenes:	23m furgoneta diesel orientación SN

FICHEROS		
FECHA	FORMATO	MEDIDAS
9 Febrero 07	*.bin	BB ¹ 2, BB4
20 Febrero 07	*.bin, *.txt	NUC, BPR
14 Abril 07	*.xls	Irradiancia BB2 20°C
16 Abril 07	*.doc	NETD, SiFT
21 Abril 07	*.m, *.mat	Manejo de ficheros
26 Abril 07	*.m, *.mat	IETD
22 Mayo 07	*.bin, *.fig	Magnificación
28 Mayo 07	*.m	Anchura de miras
3 Julio 07	*.aipd, *.bin, *.bmp, *.pat	Ensayos exteriores
4 Julio 07	*.aipd, *.bin, *.bmp, *.pat	Ensayos exteriores
5 Julio 07	*.aipd, *.bin, *.bmp, *.pat	Ensayos exteriores
9 Julio 07	*.m, *.mat	Promedios, dispersión referencias
20 Julio 07	*.bin	Referencias, Calibrado T°C
20 Agosto 07	*.doc	NETD, cambiando centro magnificación
23 Agosto 07	*.vi	SiFT, cambiando centro magnificación
31 Agosto 07	*.lsf	MTF
9 Octubre 07	*.xlsx	Comparativas MTF's
15 Octubre 07	*.doc, *.txt	LSF
17 Octubre 07	*.pat	Deconvoluciones de exteriores
18 Octubre 07	*.vi	Modificación MTF para IMSS
30 Octubre 07	*.bin	FPN
5 Noviembre 07	*.xlsx, *.bmp	Tablas FOV, IFOV, focal
31 Enero 08	*.m, *.mat	HiperIR.exe
8 Febrero 08	*.m, *.mat	Transmitancia, gases, Modtran

Tabla 8.3.1: Directorios de medidas y colecciones de datos.

PARAMETROS PRIMARIOS DE LAS MEDIDAS	
Nivel de contraste	-25.07
Nivel de Brillo	27.42

Tabla 8.3.2: Parámetros de la cámara en los ensayos exteriores. Enfoque en 4.2 μm.

¹ BBi: *Black Body*, cuerpo negro i=número de pulgadas

8.3.2 Ensayos en el Laboratorio.

8.3.2.1 Configuración de la Cámara sin Lente. B/C. (8F)

1. encender el SAI
2. arrancar la cámara y dejar 30' estabilizándose
3. medidas en bruto 12 bits, con 8 bits, si tiene efectos cambios en brillo y contraste. 50 tramas 1200ms. medida de la cámara sin lente ni colimador, con el cuerpo negro directamente enfrenteado.
4. la cámara tiene una respuesta no lineal, más bien del tipo logaritmo neperiano.
5. sonda en la rueda de miras, que marca la temperatura ambiente y registra el marco del BB, registro de ambas temperaturas, rueda y ambiente.
6. antes de activar el IRvista desactivo control automático de ganancia. PCI_1412, *frame grabber* digital, siempre para programas labview
7. T=19.3°C
8. H=40%
9. Se selecciona una zona activa en la imagen que calculará su media, lo que hemos llamado ROI
10. cuerpo negro de 4 pulgadas
11. brillo=-20.91
12. contraste=52.32
13. modo absoluto
14. mido entre 10° y 40°C, con incremento de 2.5 °C. autoescale z, represento la Sift de la cámara, niveles digitales mínimo 2700, máximo 7000. represento a 25°C en IRvista la imagen tomada, variando el cursor AGC, elijo las sigmas de la distribución uniforme, se suele tomar +- 3 sigmas. media 4400, desviación típica 5, 20 *frames*, consideraciones idénticas al tratar con matlab.

8.3.2.2 Configuración de la Cámara con Lente. (NUC, BPR.)

1. configuro hypatt con lente enfocada a 4micras, mira 4 barras.
2. phoenix ajuste lineal, ACG y deshabilito
3. BB=25°C
4. Tamb=19.1°C
5. H=37%
6. control lineal y capturo brillo=-24.28, contraste=65.16
7. control plateau capturo brillo=-24.31, contraste=65.32
8. control manual capturo brillo=-20.95, contraste=52.3, deshabilito ACG
9. capturo IRvista.exe 14 bits, NUC y BPR
10. repito configuración manual a 3.2 micras, pero se hace imposible, por la mala calidad en la imagen, por los efectos de reflejo que aparecen hasta ese momento no identificados, y que posteriormente se justificaran como el efecto narciso, y el calentamiento del cable de la sonda de la rueda de miras. mucho ruido, brillo depende del contraste y no se encuentra un par de valores que de una imagen nítida a esta longitud de onda. capturo brillo=-25.22, contraste=84
11. configurando a 5 micras, 3 sigmas, BB a 25°C. brillo=-24.43, contraste=58, al estar mejor enfocada a esta longitud de onda, se distinguió el reflejo causante del punto caliente en la imagen.

12. se repiten las medidas en todo el rango de longitudes de onda, con el cuerpo negro a 30°C, porque en principio se culpa al efecto del narciso, por su forma circular y centrada en la imagen al colimador, conforme subimos la temperatura del cuerpo negro, el calentamiento de la lente que genera el efecto de verse a si misma se fue corrigiendo. llegamos a un compromiso entre este hecho y el límite de los detectores.
13. subimos a 40°C y volvimos a configurar a 3.4 micras, se veía bastante mejor pero sigue apareciendo un efecto asimétrico borroso en la imagen.

8.3.2.3 Configuración de la Cámara +Lente. SiFT, NETD básicas

Para NETD y Sift, se utilizan software implementado en LabView por el CIDA, tienen que ser compilados, se ajustan los parámetros, toma de medidas y presentación de resultados.

los parámetros necesarios y modificables son:

- T°C inicio/ fin
- incremento T°C
- cuerpo negro activo
- nº de fotogramas
- brillo y contraste
- fuente de medida

con la medida de sift también controlo el cuerpo negro, y un ajuste lineal de grises con una paleta de brillo y contraste y ROI.

Todas estas medidas se repitieron en agosto-07 tras determinar las características exteriores.

1. brillo=21
2. contraste =55
3. a 25°C Sift =4400, de 5 a 50°, incrementos de 5°C
4. fichero *.dat, hypatt, *lens controler*
5,20 => 98 F
8,20 =>61F
1,20=>489F
cambiando framerate =50Hz, cambia la aceleración de 4.5 a 20
selecciono 8,20, 61 frames
5. calculo Sift a 4.5 micras y 3.5, hago coincidir las temperaturas a 25° y el nivel digital de 4400 y represento
6. ROI: (374,225) (295,153)(7586,3713)
7. para NETD, mantengo los parámetros, hago para 25°C, Tfria 25°, incremento 2°, 200x200 píxeles y lambda =3.5 micras, NETD=0.045,IETD=0.731
8. barrido de 5 a 50° de 5 en 5 y repitiendo para las otras longitudes de onda lambda =4.5 micras, NETD=0.032,IETD=0.566
lambda =3.2 micras, NETD=0.049,IETD=0.886
lambda =5 micras, NETD=0.030,IETD=0.534, represente con y sin lente

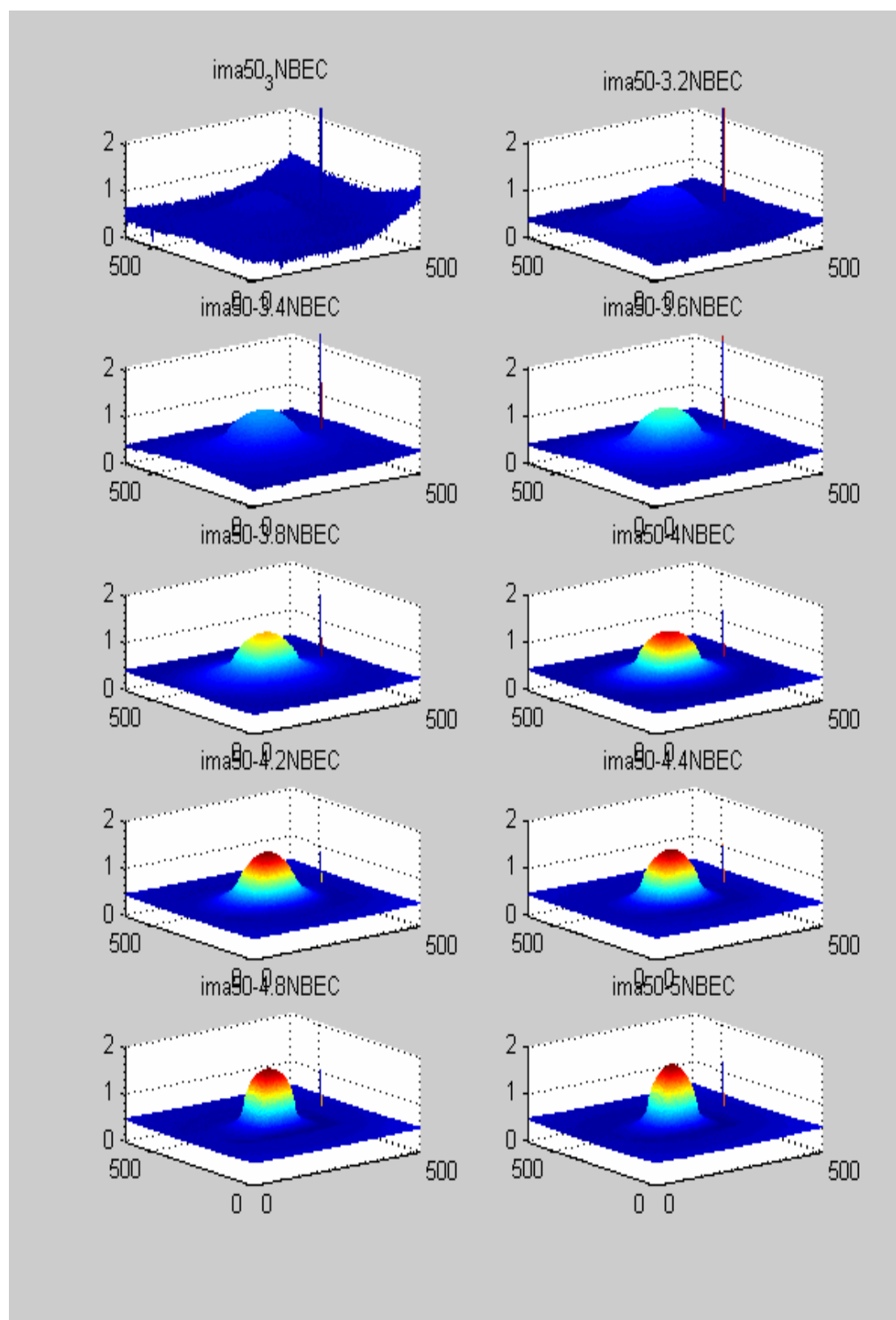


Fig. 8.3.1: Medidas cuerpo negro, mira rectangular 3 μm a 5 μm CON NUC, CON BPR

8.3.2.4 Cálculo de la SiFT de la lente

1. encender antes de abrir el programa, evitar calentamiento justo
2. selecciono con 4 barras mira, y con 4 micras enfoco seleccionando brillo y contraste.
3. hypatt.exe, menú imss, lens control, selecciono resolución, nº frames, longitudes de onda mínima y máxima, posición de inicio, modo step y rango target 100m
4. T=19.6°C
5. H=41%
6. delay 0ms
7. ROI (291,268),(377,213)
8. 20 frames con AGC en IR-vista, 3 sigmas

8.3.2.5 Consideraciones de Formatos de almacenamiento (capítulo 5)

Cálculo del tamaño de la imagen, cabeceras, formatos...

*.bin : tamaño 14896786 para 20 frames.

píxeles= 640x506 =322840 puntos en una imagen x 2bytes (resolución de 14 bits por pixel)x 20 Frames=12953600 bytes que ocupa la imagen.

tamaño-imagen+offset=19431865 bytes de cabecera

UNIX, labview LSB_MSB datos boca abajo (reshape en matlab)

fichero *.cal, fichero *.dat

8.3.2.6 Configuración Hypatt. (capítulo2)

fichero original, referencias 23 m lente IMSS

05_07_2007 12_13_57

60 Frames desde 5 hasta 3.220671

selección de longitudes de onda

Selección de 10 longitudes de onda

5.0000	4.6441	4.2883	3.9324	3.5765	
4.9703	4.6145	4.2586	3.9027	3.5469	5
4.9407	4.5848	4.2290	3.8731	3.5172	4.8
4.9110	4.5552	4.1993	3.8434	3.4876	4.6
4.8814	4.5255	4.1696	3.8138	3.4579	4.4
4.8517	4.4959	4.1400	3.7841	3.4283	4.2
4.8221	4.4662	4.1103	3.7545	3.3986	4
4.7924	4.4365	4.0807	3.7248	3.3689	3.8
4.7628	4.4069	4.0510	3.6952	3.3393	3.6
4.7331	4.3772	4.0214	3.6655	3.3096	3.4
4.7034	4.3476	3.9917	3.6358	3.2800	3.2
4.6738	4.3179	3.9621	3.6062	3.2503	

Tabla 8.3.4: longitudes de onda capturadas en modo *Scan* con IMSS

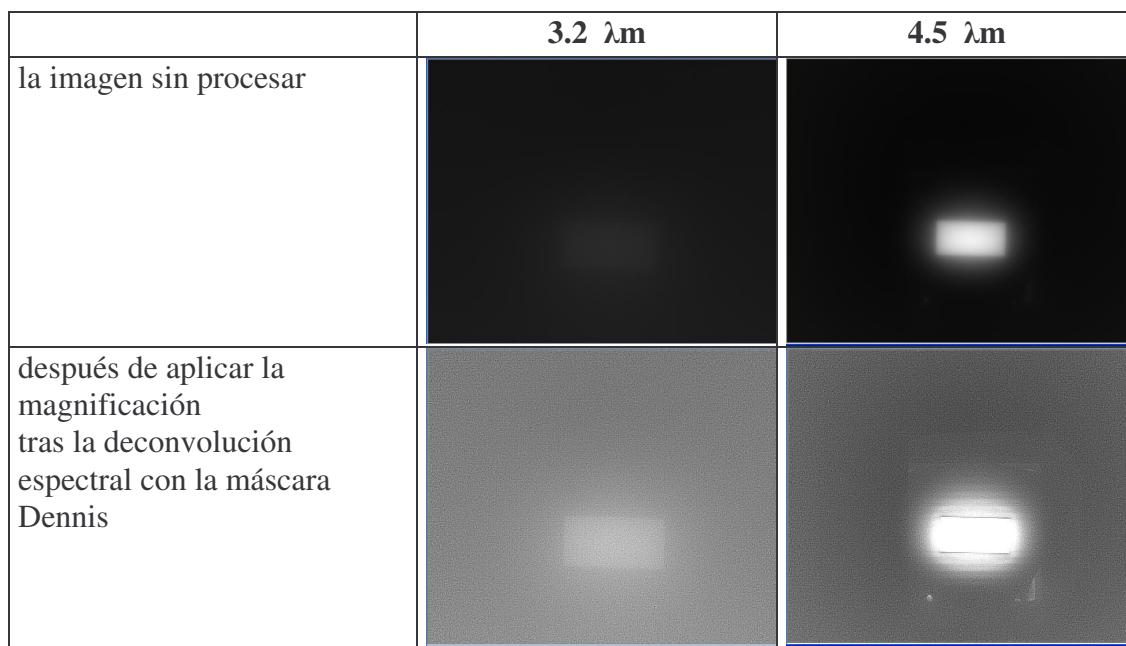


Fig. 8.3.2: Deconvolucion espacial aplicada a las miras, configuración laboratorio.

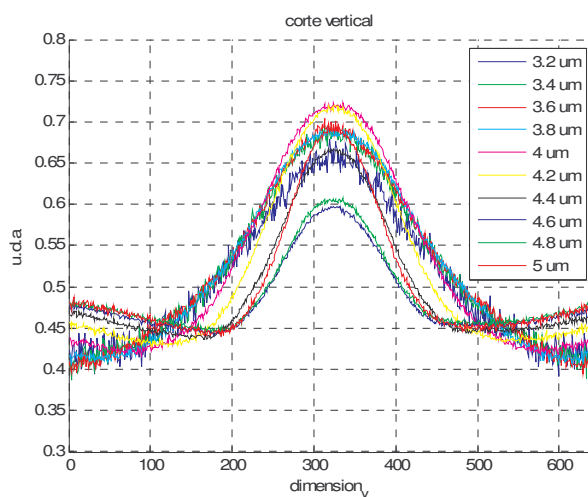


Fig. 8.3.3 Medidas con control automático de ganancia.

longitud onda	20°C	25°C	30°C	40°C
3,2	0,18	0,16	0,15	0,11
3,4	0,15	0,12	0,1	0,08
3,6	0,11	0,09	0,08	0,06
3,8	0,08	0,07	0,06	0,05
4	0,07	0,06	0,05	0,04
4,2	0,06	0,05	0,04	0,04
4,4	0,05	0,05	0,04	0,03
4,6	0,05	0,05	0,04	0,03
4,8	0,06	0,05	0,04	0,04
5	0,06	0,05	0,05	0,04

Tabla 8.3.5: Medidas de Ruido NETD.

8.3.3 Medidas Exteriores

8.3.3.1 Descripción.

03/07/07

Se toman imágenes con la cámara Phoenix de Indigo de 3 a 5 μm , para las distintas focales de la lente Janos (campos ancho y estrecho), y un barrido de longitudes de onda en el rango de 3.2 a 5 μm con la lente IMSS. A una distancia de 100m, con tres escenarios distintos, uno con un vehículo de gasoil, Renault diesel, con dos orientaciones diferentes Norte-Sur, y Este-Oeste. Otro con un vehículo de gasolina con orientación Este-Oeste, y otro con una furgoneta mercedes benz.

Se someten los vehículos bajo test a varios ciclos de aceleración, ralentí y parada, y se toman imágenes cada minuto para procesar la evolución de la temperatura del tubo de escape y registrar sus emisiones.

04/07/07

Este día tomamos imágenes de la furgoneta desde otra perspectiva para ver el tubo de escape y a diferentes distancias 100 y 23m. Con los mismos valores de brillo y contraste durante todas las pruebas, con ajuste lineal y sin control automático de ganancia. Las imágenes fueron registradas cada minuto en la opción Step y varios ciclos con la opción Scan, de la lente hiperespectral.

Para representar la evolución de la temperatura en el tubo de escape.

05/07/07

Con los valores de brillo y contraste estimados, y la configuración de la lente óptima desprendida de los ensayos en laboratorio con las miras, y para un centro de magnificación prefijado en el fichero de calibración del sistema ($x=242$, $y=320$), se toman imágenes del tubo de escape de la furgoneta a 23m de distancia, y sometiendo a la misma a diferentes ciclos de aceleración

Los equipos utilizados en las pruebas:

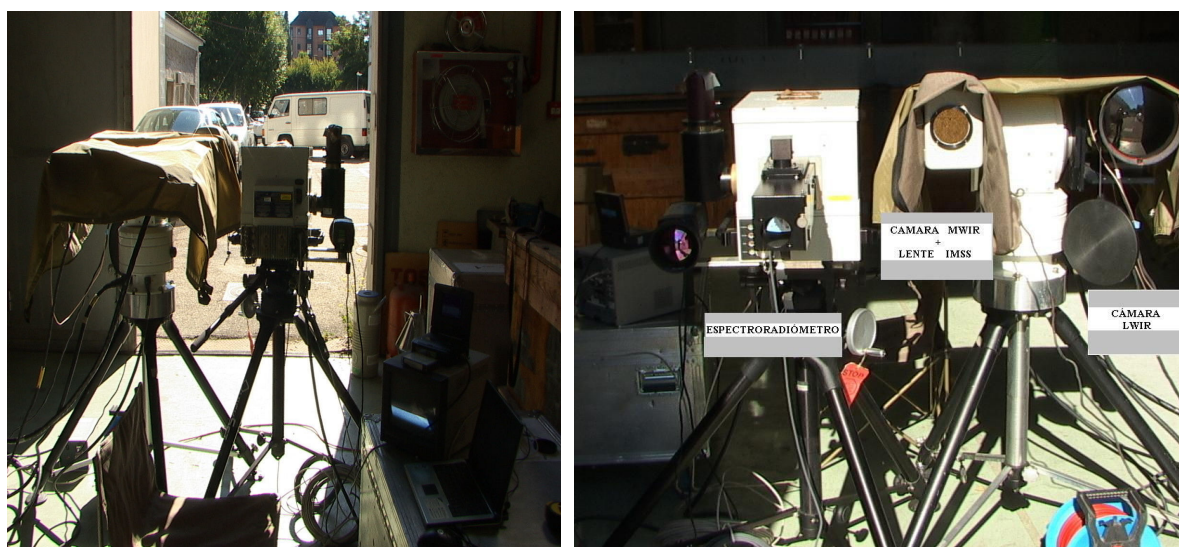


Fig. 8.3.4 Fotografía del instrumental durante las medidas exteriores.

8.3.3.2 Datos Meteorológicos durante las medidas exteriores.

Estación meteorológica

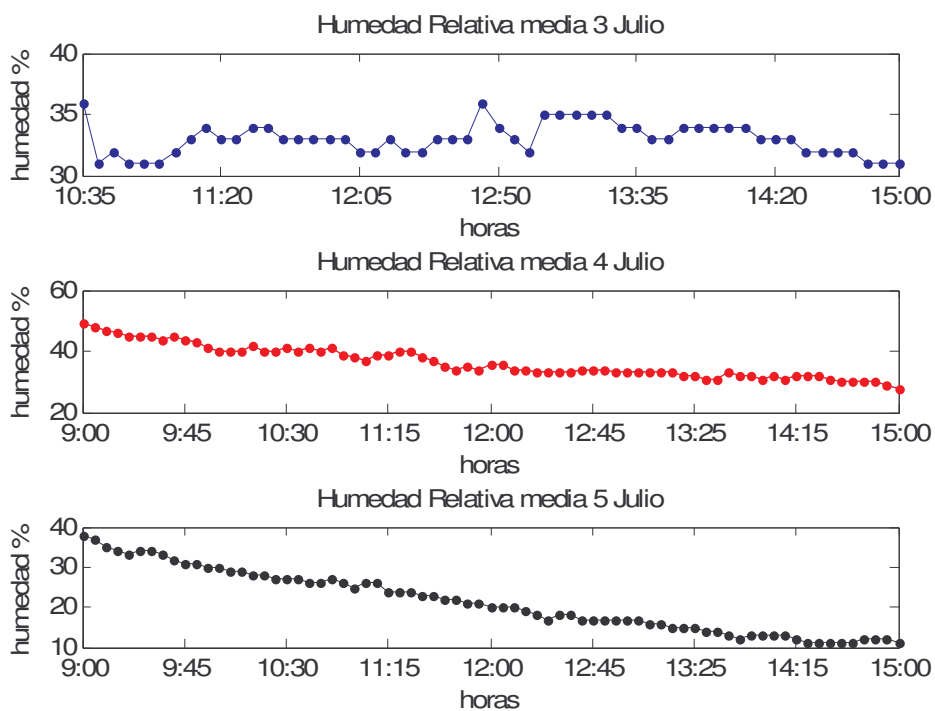


Fig. 8.3.5: Gráficas de la humedad relativa registrada en las horas de ensayos exteriores

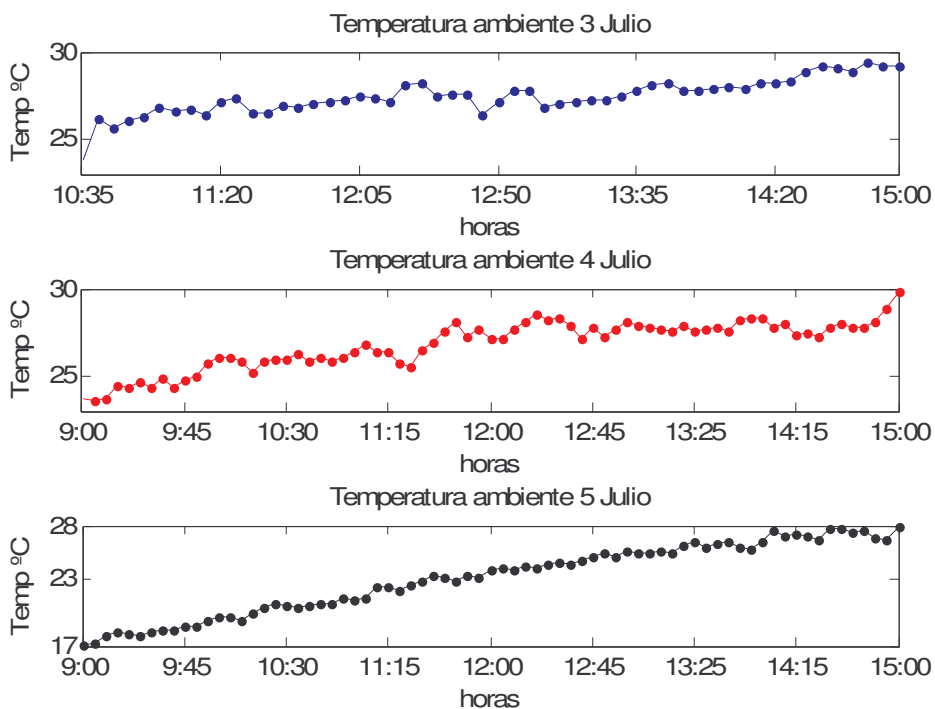


Fig. 8.3.6: Graficas del registro de temperatura ambiente

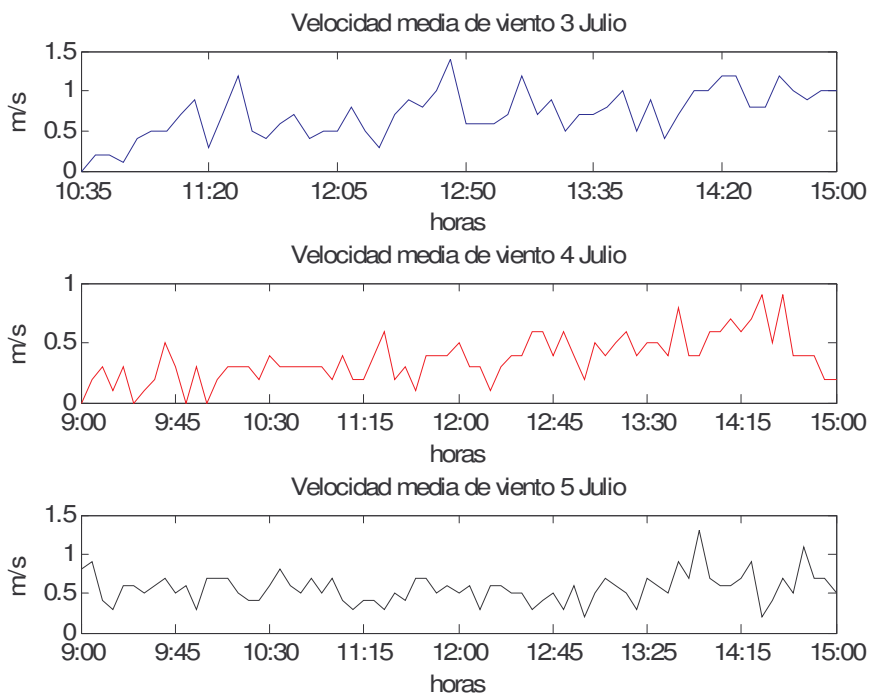


Fig. 8.3.7: Gráficas de la velocidad del viento registrada en los ensayos exteriores.

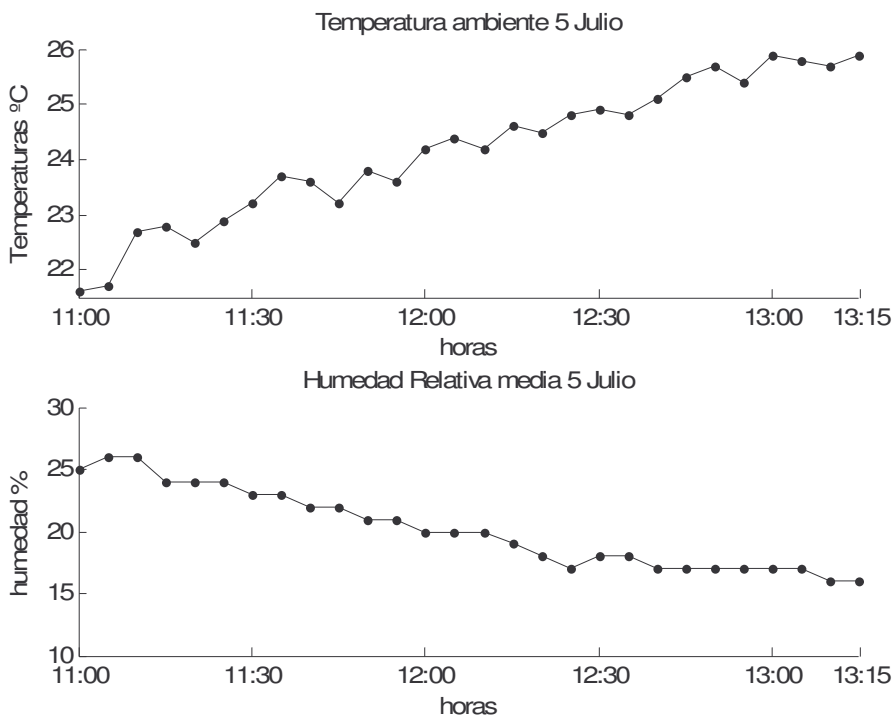


Fig. 8.3.8: Curvas ambientales durante el registro de los ciclos de acelerado.

8.3.3.3 Medidas sobre las Referencias (t_4AREAS, 20 JULIO)

longitudes de onda	mínimo	máximo	media	desviación típica	Área total
3,2	5119	6049	5540,312988	240,816345	323840
3,4	5103	6169	5589,445801	292,034241	" "
3,6	5079	6307	5640,43457	353,378113	" "
3,8	5057	6438	5683,27002	409,53894	" "
4	5012	6624	5731,827637	480,281982	" "
4,2	4974	6793	5779,91748	552,858521	" "
4,4	4903	6938	5821,777344	618,467224	" "
4,6	4811	7118	5869,32373	697,397095	" "
4,8	4679	7233	5905,157227	767,241821	" "
5	4640	7208	5924,006836	804,508972	" "

Tabla 8.3.6: Valores para la imagen completa.

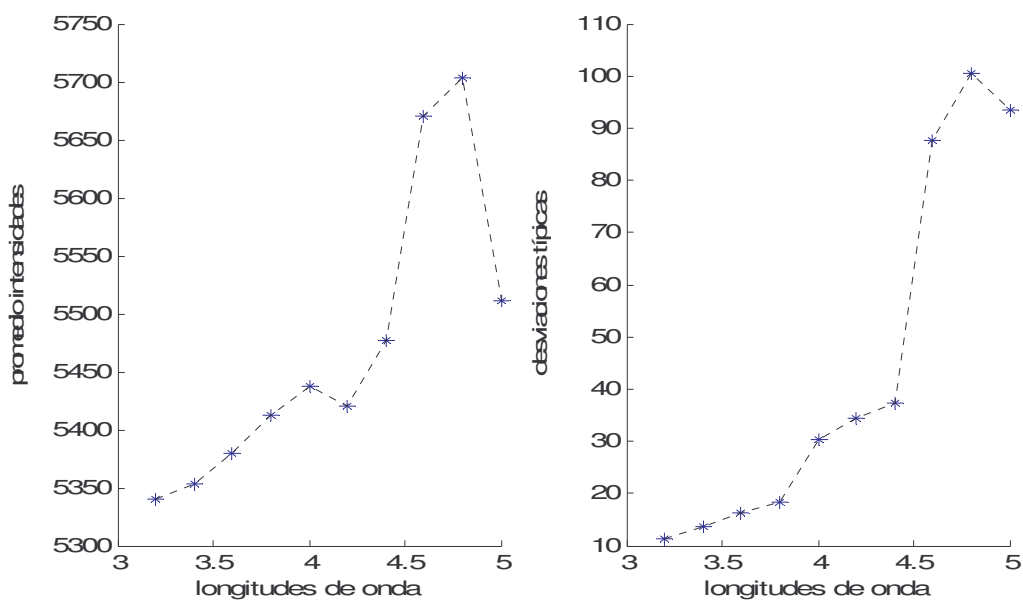


Fig. 8.3.9: Intensidades en función de la longitud de onda.

8.3.4 Obtención de la magnificación del sistema.

Presentamos en este anexo algunas de las pantallas y resultados que no se han incluido en el texto del proyecto y que sin embargo pueden servir para aclarar cómo se han obtenido muchos de los datos presentados.

8.3.4.1 Curvas de medida sobre cortes transversales

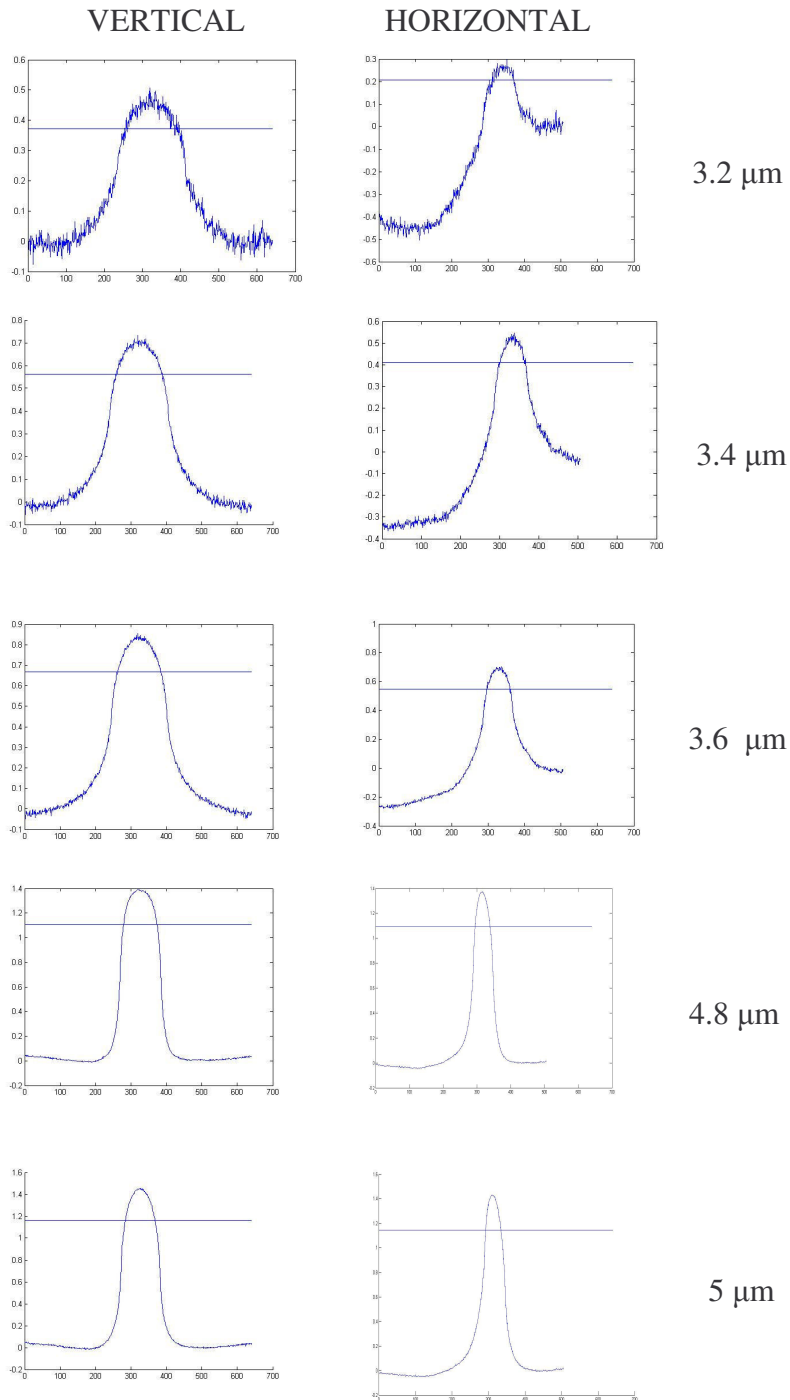


Fig. 8.3.10: Porcentajes obtenidos a partir del máximo en el corte transversal.

Pixel x_50%	Nivel_50%	anchura_v'	anchura_h'
325.2336	0.9929	133.8710	56.4516
325.2336	1.1869	130.6452	62.9032
325.2336	1.2998	122.5806	62.9032
325.2336	1.3915	120.9677	58.0645
325.2336	1.4444	116.1290	59.6774
325.2336	1.5326	101.6129	53.2258
325.2336	1.6455	100.0000	53.2258
326.7290	1.7513	96.7742	47.9839
325.2336	1.8395	91.9355	43.7500
325.2336	1.9030	83.8710	40.9274

Tabla 8.3.7: Valores de anchuras medidos a partir de la mitad del máximo.

8.3.4.2 Constelación de medidas de magnificación a partir de las anchuras con algoritmo.

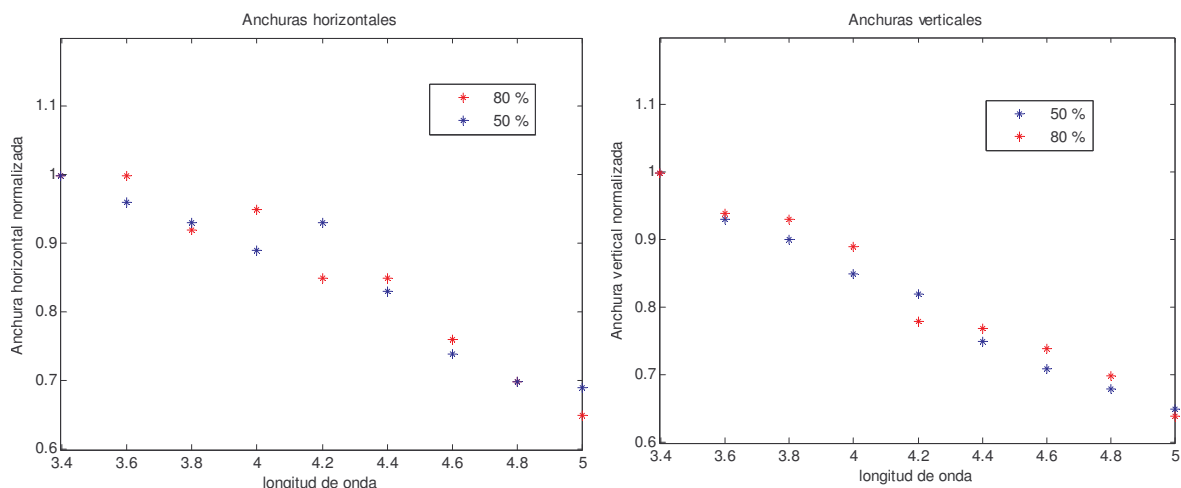


Fig. 8.3.11: anchuras normalizadas. Vertical y horizontal

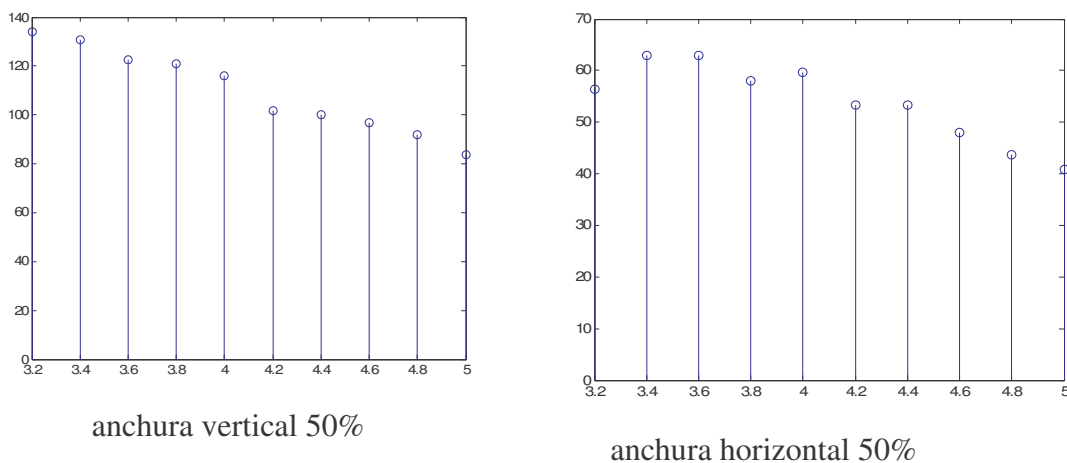


Fig. 8.3.12: Anchuras cuerpo negro 2 pulgadas. 50%

Implementamos una función en matlab a partir de la recta de desplazamiento del centro de magnificación en la colección de imágenes hiperespectrales, y magnificando con un escalado regular.

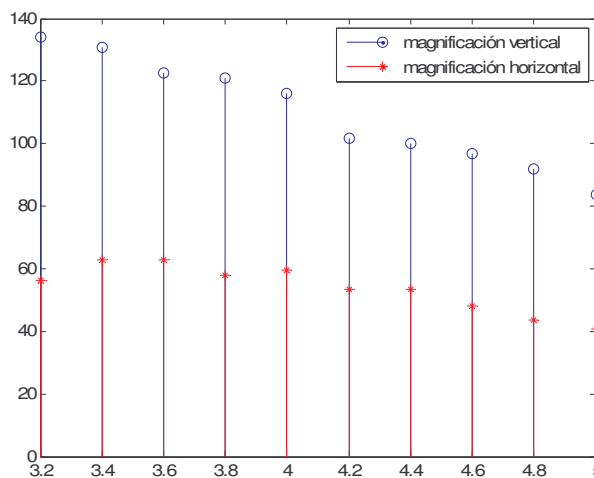
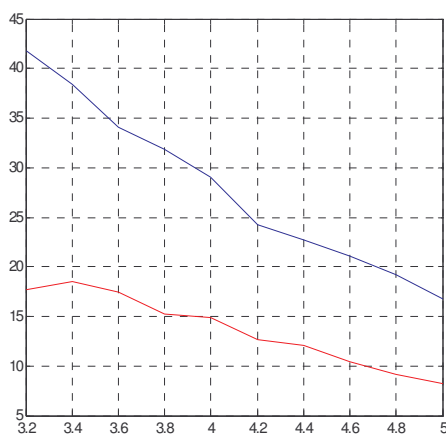
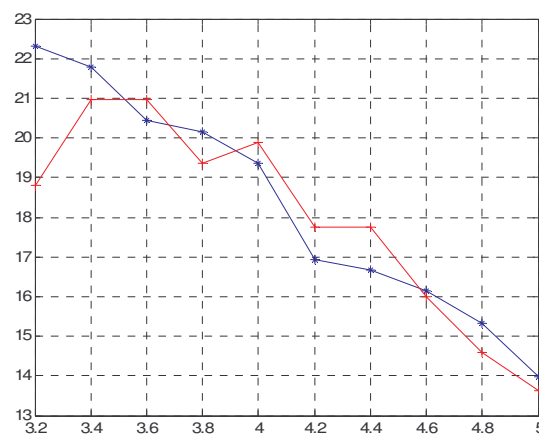


Fig. 8.3.13: Rectas de magnificación para abscisas y ordenadas.



curva= anchura / longitud de onda



curva roja= anchura_h/3

curva azul= anchura_v/6

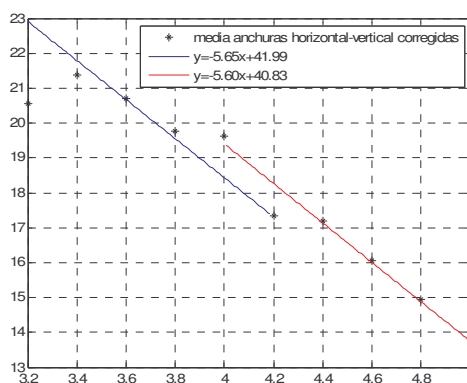
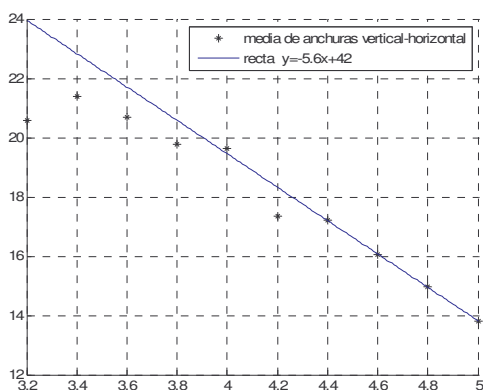


Fig. 8.3.14: Rectas de interpolación y desnormalización con la dimensión real de la mira.

8.3.4.3 Presentación de la rutina de cálculo de anchuras en función de λ .

El capítulo 5, describe las aplicaciones que se han implementado en *Matlab* para determinar las diferentes curvas y anchura. La pantalla que se presenta sobre cada fotograma obtenido en el archivo de captura es el correspondiente a las siguientes figuras, donde además de los parámetros extraídos de la cabecera del fichero y los introducidos en el software aparecen las graficas en 2 y 3 dimensiones así como sus perfiles horizontal y vertical, cortados en el máximo de intensidad.

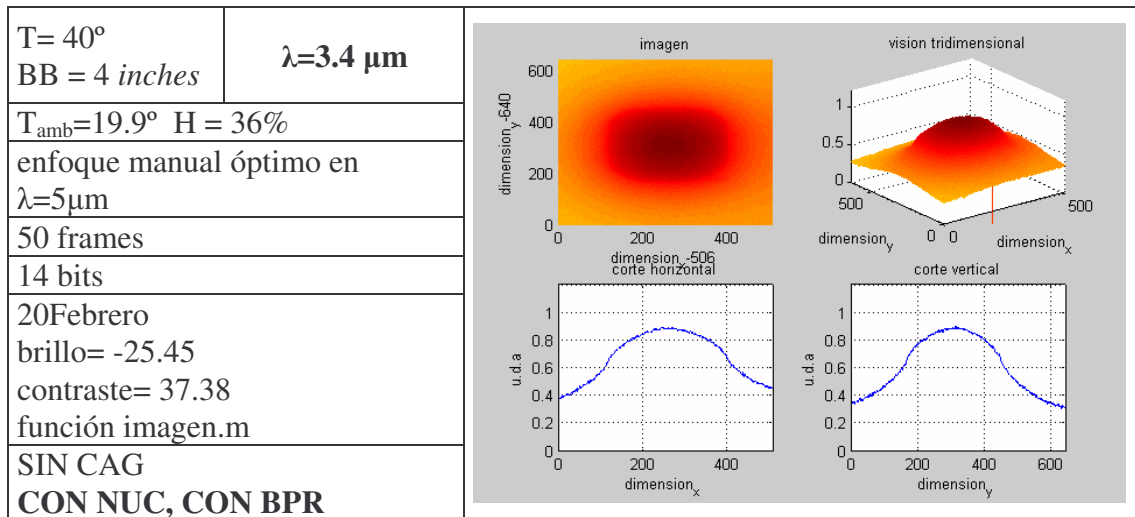


Fig. 8.3.15: Tabla de parámetros y ventana de resultados gráficos. $\lambda=3.4 \mu\text{m}$

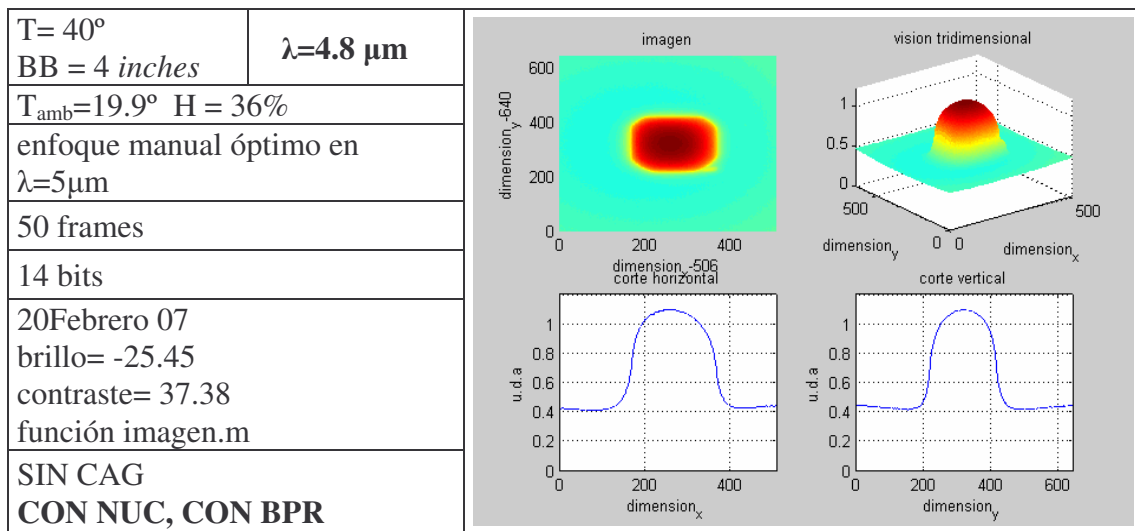
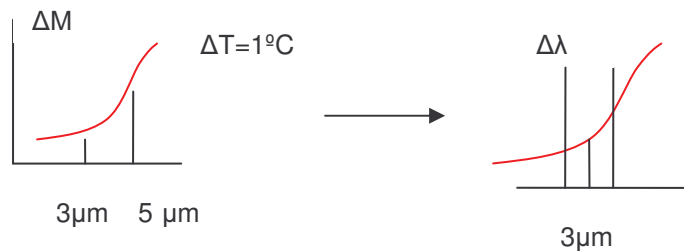


Fig. 8.3.16: Tabla de parámetros y ventana de resultados gráficos. $\lambda=4.8 \mu\text{m}$.

8.3.5 Determinación del centro de magnificación.

Calculo de la irradiancia del cuerpo negro.



integración de 3 a 5 = $1.74674 \cdot 10^{-4}$; paso 0.01

$$\int_{3\mu m}^{5\mu m} \rightarrow (\sum \text{valores}) \cdot \text{paso} \Rightarrow \Delta M = \sigma \cdot (T_T^4 - T_B^4); \quad \frac{\partial}{\partial T} M = W \cdot \lambda \cdot \frac{C_2}{\lambda \cdot T^2}$$

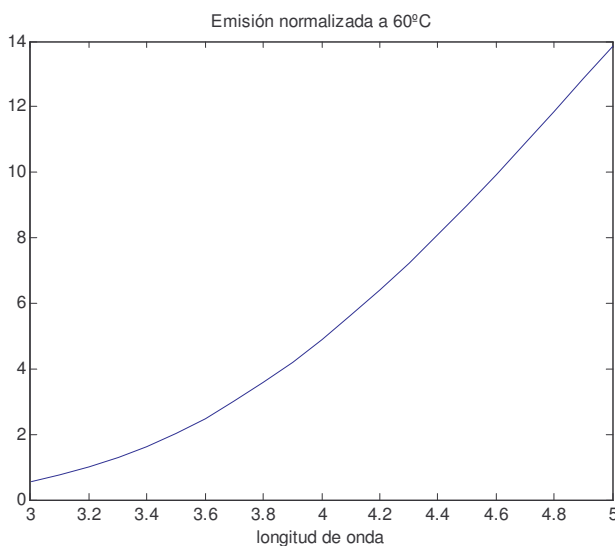


Fig. 8.3.17: Emisión normalizada a 60°C

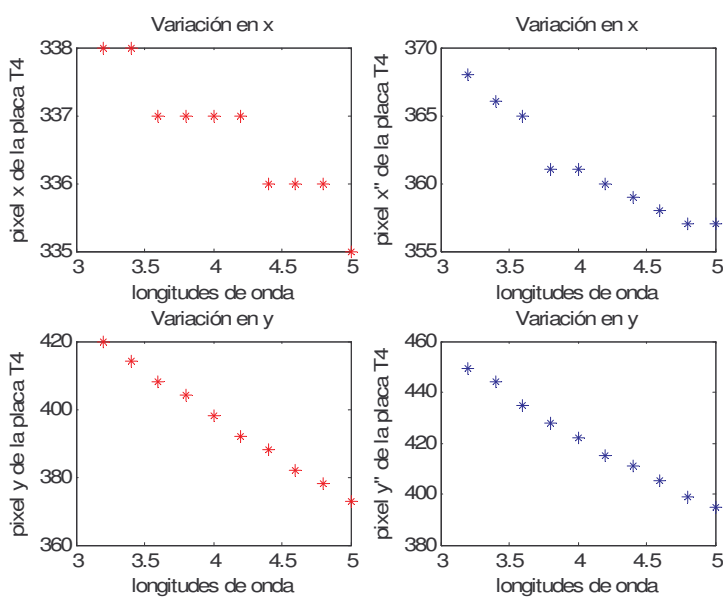


Fig. 8.3.18: Variación de cada coordenada con la longitud de onda.

8.3.6 Medidas de Transmitancia debida a determinados gases.

La simulación con MODTRAN además de la Transmitancia total, también proporciona las curvas propias de los gases más significativos. Se muestran las curvas para el agua H₂O sin aerosoles, dióxido de carbono CO₂ sin aerosoles, ozono, N₂, y los aerosoles correspondientes a nubes y lluvia. (AER-HYD , AER-HYD TAU-ABS).

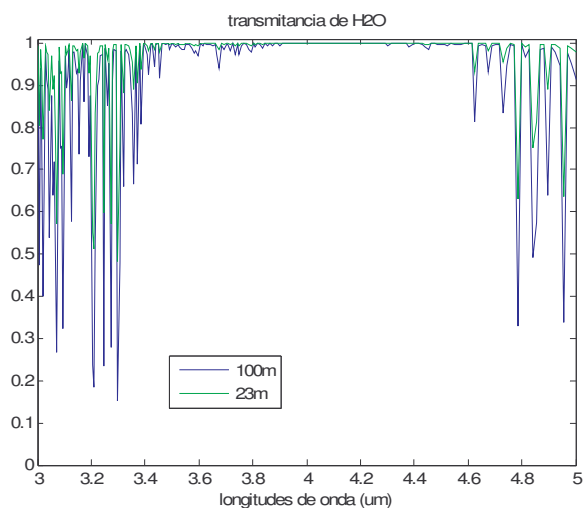


Fig. 8.3.19: H₂O sin aerosoles

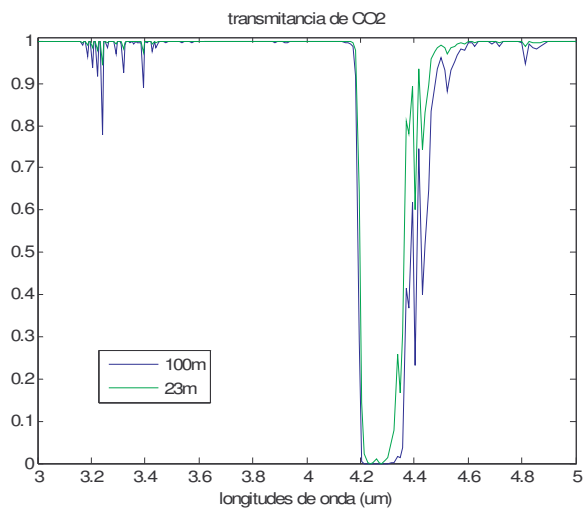


Fig. 8.3.20: CO₂ sin aerosoles

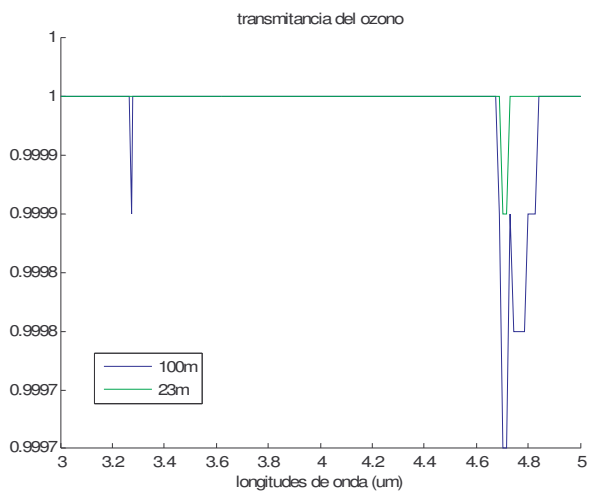


Fig. 8.3.21: ozono

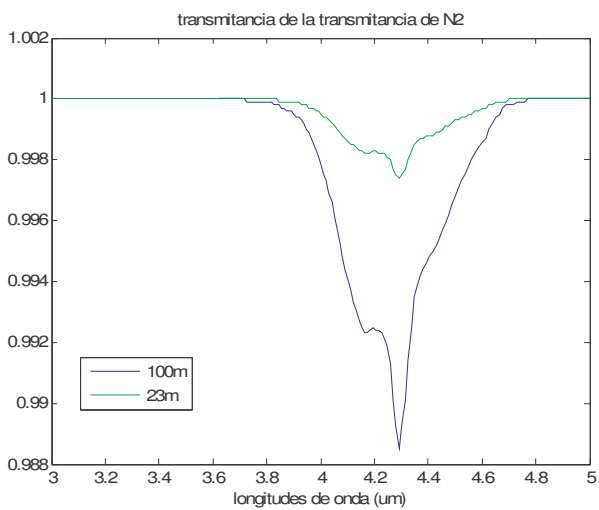


Fig. 8.3.22: N₂

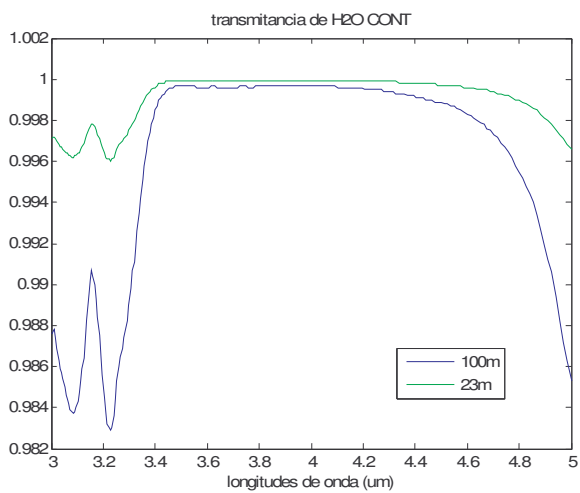


Fig. 8.3.23: H₂O cont sin aerosoles

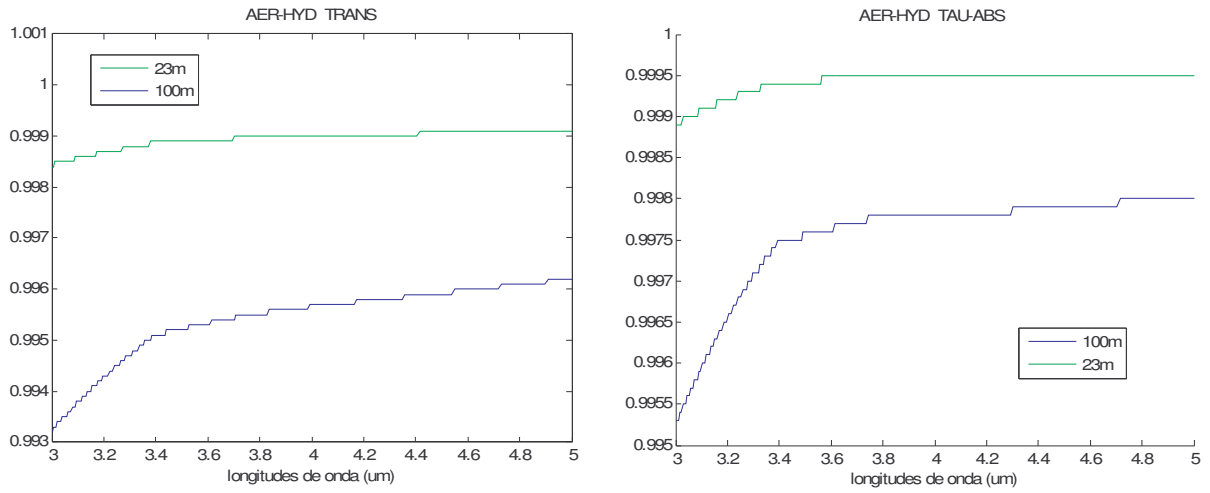


Fig. 8.3.24: AER-HYD TRANS y AER-HYD TAU-ABS

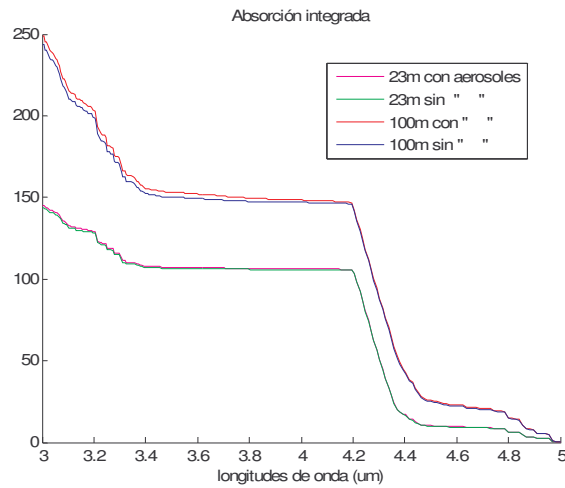


Fig. 8.3.25: Absorción a distintas distancias y con/ sin aerosoles

8.3.7 Banco de optikos, medida lsf, mtf, ficheros de configuración

LSF 4.02

File: mtf_4_2um_b.LSF

Date: Friday, August 31, 2007

Time: 12:42:44

Measurement Device Dimension: 2D

Measurement Device Type: Electronic

Measurement Device Name: HiDef Accura

Pedestal Mode: New Pedestal When Measurement conditions change

Calibration Mode for LSF: No Dark Current correction

LSF Display: Normalized signal level

LSF Units:mRad

LSF Slit Width: 0.23

LSF Equivalent Array Length (X): 130.62

LSF Equivalent Array Length (Y): 4.16

Remove Flicker: Yes

Remove Jitter: No

Sloping Slit Correction: No

Lens Type: Nikon 50mm

Lens Focal Length(mm): 100.00

Lens f/no: 1.40

Lens Focus Setting(m):9999.00

Lens Extension Tube(mm): 0.00

Frame Averaging Direction: X-Axis

Minimum X Co-ordinate for Frame: 237.00

Maximum X Co-ordinate for Frame: 312.00

Minimum Y Co-ordinate for Frame: 346.00

Maximum Y Co-ordinate for Frame: 355.00

Normalise MTF: At 0 Cycles

Calculate PTF: Yes

Phase Frequency: 0.00

Number of Points for MTF Display: 50.00

Maximum Frequency for MTF Display: 3.90

Use Lens/User/Display Polynomial Correction: No

Data Display Type:625

Use Sampled System: Yes

MTF Measurement Type: 2

Scan Negative Direction: 0

Ft Min Pos: 0.000

Ft Max Pos: 0.000

Scan Magnification: 1.000

Number of Scan Points: 15

Scan Range: 0.20

Number of Scan Points: 50

Scan Range: 30.00

Number of Scan Points: 10

Scan Range: 0.03

CCD Sensor Cell Size X: 0.000
CCD Sensor Cell Size Y: 0.000
Image Space Scale Unit (0 - Pixel; 1 - mm): 2
Using Image Space Coordinates (0 - No; 1 - Yes): 0
Pixel Clock Rate: 34.4828
Maximum LSF Intensity: 1024

<i>Position(mRad)</i>	<i>LSF</i>		
<i>[...]</i>			
<i>Frequency(lp/mRad)</i>	<i>MTF</i>	<i>PTF</i>	
<i>[...]</i>			
<i>Index</i>	<i>Frequency(lp/mRad)</i>	<i>MTF</i>	
<i>[...]</i>			

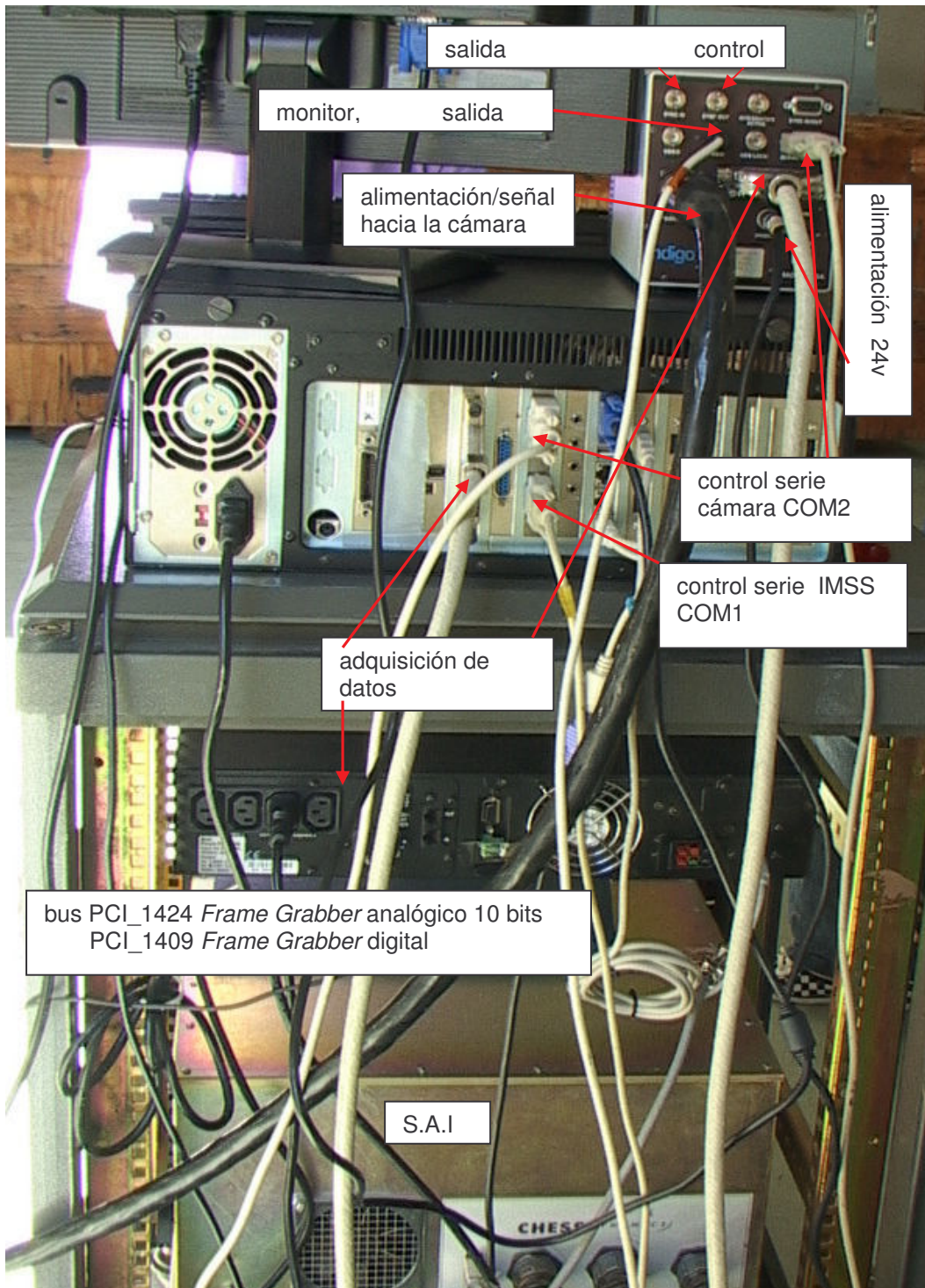
8.3.8 Fichero de calibración de Hypatt

PACIFIC ADVANCED TECHNOLOGY HyPAT II CONFIGURATION FILE
MODIFIED 11/12/99

[SERIAL #]98
[IMSS]MID
[CALIBRATION]
A= 0.0
B= 0.0
C= 0.0
K= 408.0
[PITCH] 2.500000
[VELOCITY] 14.500000
[ACCELERATION] 20.000000
[MAGNIFICATION]
X= 128
Y= 123
[INFINITY] 100
[BINRES] 0.000913
[HOMEOFFSET] 77.800000
[IMSS TRIGGER]LOW
[COM]COM1
[FRAMERATE] 60.000
[ROI]
X= 256
Y= 256
[INTEGRATION TIME]0.0
[BIT RESOLUTION] 12
[BIT OFFSET]2
[STORAGE TRIGGER] HIGH
[INSTRUMENT FUNCTION] [...]

8.3.9 Conexiones PC- Cámara IR

Imagen del controlador de la cámara, conexiones con el PC y el *Frame Grabber*



LUGAR DE MEDICIONES:

CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE LA ARMADA

Denominación Laboratorio: Laboratorio de Termovisión del CIDA

Mediciones exteriores en las instalaciones

C/. Arturo Soria, 289 28033 MADRID Teléfono: 91 302 06 40