

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***MONITORIZACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO
LASER METAL DEPOSITION (LMD)***

Estudiante	<i>Orue Llona, Xabat</i>
Director	<i>Ukar Arrien, Eneko</i>
Departamento	<i>Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2020/2021</i>

Bilbao, 10 de septiembre del 2021

Resumen

El proceso *Laser Metal Deposition* (LMD) es una tecnología de fabricación aditiva en auge que permite el recubrimiento y reparación de piezas dañadas, así como la fabricación de piezas tridimensionales de geometrías complejas. Sin embargo, la complejidad del proceso supone un reto a la hora de obtener piezas cero-defecto. Mediante la monitorización térmica, se pretende prever y evitar los posibles defectos que se pudieran producir, dado que esto determina, entre otras cosas, las distorsiones, la microestructura y las tensiones residuales de la pieza final. En este trabajo se efectúa la monitorización térmica del proceso LMD por hilo (LMD-w) mediante cámaras infrarrojas (IR) y pirometría. Además, se hace uso del registro de posición del brazo robótico en el que está montado el láser para conseguir los ciclos de calentamiento y enfriamiento a lo largo de las trayectorias de los movimientos realizados.

Palabras clave

LMD-w; Fabricación Aditiva (FA); Monitorización térmica; Termometría y Termografía; Radiometría; Cámaras infrarrojas (IR); Pirometría; Ciclos térmicos; Tekniker

Laburpena

Laser Metal Deposition (LMD) prozesua indar handia hartzen ari den fabrikazio gehigarriko teknologia bat da, non piezen estaldura eta konponketak egitea ahalbidetzeaz gain, geometria konplexuko hiru dimentsiotako piezak baimentzen dituen. Hala ere, prozesuaren konplexutasunak akats gabeko piezen ekoizpenean erronka bat suposatzen du. Monitorizazio termikoaren bidez, akats hauek aurreikusi eta saihestu nahi dira, honek zehazten baititu amaierako piezaren distortsioak, egitura metalurgikoa eta tentsio-hondarrak, besteak beste. Lan hau hari bidezko LMD (LMD-w) prozesuaren monitorizazio termikoan zentratzen da, zeinetarako kamera infragorriak (IR) eta pirometria erabili diren. Horrez gain, laserra muntatuta dagoen beso robotikoaren posizio erregistroa erabili da mugimenduen ibilbidean zeharreko beroketa eta hozketa zikloak lortzeko.

Gako-hitzak

LMD-w; Fabrikazio Gehigarria (FG); Monitorizazio termikoa; Termometria eta Termografia; Erradiometria; Kamera infragorriak (IR); Pirometria; Ziklo termikoak; Tekniker.

Abstract

Laser Metal Deposition (LMD) is a growing additive manufacturing technology that enables the coating (cladding) and repair of damaged parts, as well as the manufacture of three-dimensional parts with complex geometries. However, the complexity of the process is a challenge when it comes to obtaining zero-defect parts. By means of thermal monitoring, the aim is to foresee and avoid possible defects that could occur, given that this determines, among other things, the distortions, the microstructure and the residual stresses of the final part. In this work, thermal monitoring of the wire based LMD (LMD-w) process is carried out using infrared (IR) cameras and pyrometry. In addition, the position record of the robotic arm on which the laser is mounted is used to obtain the heating and cooling cycles along the path of the carried-out movements.

Keywords

LMD-w; Additive manufacturing (AM); Thermal monitoring; Thermometry and Thermography; Radiometry; Infrared cameras (IR); Pyrometry; Thermal cycles; Tekniker.

Agradecimientos

Aunque no descarte la posibilidad de seguir estudiando, este Trabajo Fin de Máster pone punto final a una época de mi vida que ha durado seis años; concretamente, cuatro del Grado y dos del Máster. Soy consciente que nada será igual de ahora en adelante, pero afronto la situación con ganas e ilusión, además de la incertidumbre que supone la situación en la que nos ha tocado vivir debido a la pandemia de la COVID-19. Dicho esto, resulta complicado hablar del futuro sin antes centrarme en el pasado, dado que han sido muchos los momentos difíciles por los que uno ha tenido que pasar para llegar hasta donde está hoy en día. Por ello, me gustaría aprovechar este pequeño espacio para agradecer públicamente a aquellas personas que han estado a mi lado en todo momento, ya que sin ellas nunca hubiese podido llegar hasta aquí.

En primer lugar, gracias **aita y ama** por darme todo lo que está en vuestras manos para satisfacer mis deseos y necesidades. No me refiero solo la parte material y económica, sino también a la emocional y afectiva. Sois para mí un ejemplo de amor incondicional, y es por ello que nada nos podrá separar. Soy consciente de que siempre habéis estado ahí para ayudarme y mostrar vuestro apoyo sin importar mis malos humores, quejas y agobios. Por ello, os agradezco al mismo tiempo que os pido perdón por cómo os he podido tratar en esas situaciones de tensión. Asimismo, quisiera agradecerlos por la educación y los consejos que me habéis dado, que con el tiempo los he podido entender y aplicar en la vida. La verdad es que habéis sido un pilar fundamental en el desarrollo de mi pensamiento crítico, lo cual es imprescindible en los tiempos que corren. Gracias a vosotros soy la clase de persona que conocéis, con sus cosas buenas y malas como todo el mundo, pero estando siempre orgulloso de uno mismo. En definitiva, orgulloso de ser vuestro hijo.

Dentro de la familia, no podría olvidarme de mi **tía Josefina**, que ha sido para mí como una segunda madre. Hay muchas cosas que destacaría de ella, pero me quedo con su generosidad y actitud positiva. Gracias a la felicidad que emana, consigue levantar el ánimo de las personas que se crucen en su camino, lo cual no es una excepción en mí. Por ello, gracias **izeko** por ser cómo eres y alegrar los días grises de mi vida. Igualmente, todos los primos y las primas son para mí una fuente de felicidad que juegan un papel importante en mi equilibrio emocional. Mi especial cariño a los jóvenes de la familia, entre los cuales están **Aietz, Garoa, Laiene y Maddi**. Todavía no sabéis leer para poder entender todo lo que os agradezco a través de este escrito, pero espero que un día sea así para que seáis conscientes de lo que aportáis en mi vida. Cada uno de vosotros sois como velas para un pasajero entre las tinieblas, y os aseguro que la luz que irradiáis es más que suficiente para iluminar mi camino. Sin el apoyo de vuestros haces, sería como un naufrago sin rumbo en busca de un faro. Así que, gracias a todos por mantener mi motivación de seguir en la dirección correcta marcando las coordenadas de mi destino.

Y qué decir de los **amigos**... Sin ellos nada sería lo mismo, dado que su apoyo ha sido indispensable en infinidad de ocasiones. No me refiero a los conocidos que uno pueda tener, sino a los verdaderos amigos que siempre están a tu lado. Tanto a las buenas como a las malas, porque es ahí donde se valora quien merece ser parte de tu círculo de amistad. En este sentido, la expresión en Euskara "**lagunek lau**" me viene como anillo al dedo, ya que no son muchos los confidentes que poseo. Al fin y al cabo, después de mucho tiempo aprendí cual es la virtud de un buen amigo, y es en base a ello con los que me he rodeado. Por eso me dirijo a vosotros, mis fieles compañeros que sois para mí como hermanos, al mostrar mi más sincero agradecimiento ante todo lo que me habéis aportado.

Por otra parte, me gustaría recalcar la labor de **Soraya Plaza y Aitzol Lamikiz** como responsables del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta, mediante la cual he podido adquirir muchos de los conocimientos que poseo sobre las tecnologías de fabricación. Asimismo, agradecerle a mi director del Trabajo Fin de Máster **Eneko Ukar** por proporcionarme el apoyo requerido a la hora de realizar las correcciones pertinentes. Gracias a ello he podido conocer mis puntos débiles, tanto a lo que se refiere a la parte científica-técnica como académica. Por lo tanto, gracias a los tres por contribuir en mi desarrollo académico.

En el ámbito profesional, agradecer a la **Fundación TEKNIKER**, y más concretamente a **Fernando Egaña** por darme la oportunidad de formar parte de la Unidad de Ingeniería Mecánica, donde la tutorización de **Iker Garmendia** y el soporte de **Jon Flores** han sido claves. La orientación recibida durante el trascurso del trabajo que se tiene entre manos ha hecho posible la implementación de la metodología para la monitorización térmica que se ha desarrollado. Parte del mérito lo tenéis también vosotros, ya que este trabajo es fruto del esfuerzo conjunto de los tres a pesar de que la mayor carga haya recaído sobre mis hombros como es lógico. Asimismo, quisiera agradecer la simpatía y el compañerismo del resto de **compañeros de Tekniker**, bien sea en la misma unidad como fuera de ella. Gracias a vosotros he podido estar a gusto en el ámbito laboral, y mantenerme motivado en todo momento. Por lo tanto, gracias a todos vosotros por contribuir en mi desarrollo profesional.

Por último, no quisiera terminar sin antes recalcar la posibilidad de que se me haya olvidado alguna persona que me haya ayudado de forma desinteresada. Por consiguiente, pido perdón de antemano a todos aquellos que se sientan aludidos. No era mi intención ofender a nadie, sino más bien mostrar mi gratitud. Dicho esto, agradezco vuestro apoyo indiferentemente del ámbito que fuese, porque sin ello la persona de quien recibís este agradecimiento no sería la misma en absoluto. Por lo tanto, gracias a todos vosotros por contribuir en mi persona aportando vuestro granito de arena.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contexto	2
1.2. Objetivos y Alcance	3
1.3. Beneficios	4
1.3.1. Contribuciones Científico-Técnicas y Plan de Difusión	4
1.3.2. Contribuciones Económicas y Plan de Implementación	4
1.3.3. Contribuciones Sociales y Medio Ambientales	5
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1. Fabricación Aditiva	7
2.1.1. Clasificación	8
2.1.2. LMD: Laser Metal Deposition	9
A. Fuente de Calor por Láser	10
A.1. Parámetros	11
A.2. Tipos de Láseres	15
A.3. Procesado de Materiales.....	20
A.4. Tendencias Futuras.....	22
B. Proceso de Aporte Metálico.....	23
C. Configuraciones.....	24
D. Aplicaciones y Líneas de Investigación.....	28
2.2. Necesidad de Monitorización.....	30
2.2.1. Monitorización Dimensional y Geométrica.....	31
2.2.2. Monitorización Térmica	33
2.3. Principios de Medición de Temperaturas	35
2.3.1. Conducción (Por Contacto)	35
2.3.2. Radiación (Sin Contacto)	36
A. Ondas Electromagnéticas y Espectro Electromagnético.....	37
B. Bases Geométricas de la Óptica Infrarroja.....	39
B.1. Reflexión y Refracción	39
B.2. Reflexión Especular y Difusa.....	40
B.3. Superficie Lambertiana.....	41
C. Radiometría y Radiación Térmica.....	41
C.1. Cuantificadores Radiométricos	41
C.2. Radiación del Cuerpo Negro.....	43

C.3.	Radiación del Cuerpo Gris	47
C.4.	Radiación del Cuerpo Real.....	48
D.	Emisividad.....	49
D.1.	Parámetros Influyentes de la Emisividad	50
D.2.	Técnicas de Medición y Ajuste de la Emisividad	55
D.3.	Errores de la Emisividad	56
2.4.	Particularidades de las Mediciones a Altas Temperaturas	57
2.4.1.	Cambios de Estado y Fase del Material.....	57
2.4.2.	Evolución de la Emisividad	58
2.4.3.	Necesidad de Instrumentos Sin Contacto	61
A.	Pirómetros.....	61
A.1.	Construcción y Funcionamiento.....	63
A.2.	Tamaño del Objetivo y Distancia de Medición.....	66
A.3.	Tipos de Pirómetros	67
A.4.	Fuentes de Interferencia	69
B.	Cámaras Termométricas	70
B.1.	Construcción.....	71
B.2.	Principio de Funcionamiento.....	74
B.3.	Factores de Influencia	75
B.4.	Algoritmos Internos.....	78
B.5.	Captura de Imágenes IR.....	82
2.5.	Trabajos en los que se han Medido Temperaturas en LMD	85
2.5.1.	Estimación de la Emisividad	85
2.5.2.	Medición de Temperaturas con Instrumentos Radiométricos	89
2.5.3.	Monitorización y Control Térmico del Proceso LMD	91
A.	Cámaras de Visión	91
B.	Cámaras Infrarrojas	92
3.	METODOLOGÍA.....	97
3.1.	Metodología Adoptada	97
1.	TAREA: Determinación de los Algoritmos Internos de las Cámaras.....	97
2.	TAREA: Calibración de la Emisividad	100
3.	TAREA: Estimación de Temperaturas	102
4.	TAREA: Determinación de los Ciclos de Calentamiento y Enfriamiento de la Pieza	106
5.	TAREA: Determinación del Tamaño y Distribución de Temperaturas en el Baño Fundido	108

3.2.	Planificación	109
3.2.1.	Fases del Proyecto.....	109
3.2.2.	Hitos del Proyecto	112
3.2.3.	Diagrama de Gantt	113
3.3.	Material e Instrumentos.....	114
3.3.1.	Material de Aporte	114
3.3.2.	Celda Robotizada de Fabricación Aditiva LMD-w.....	115
3.3.3.	Máquina TITAN®.....	116
3.3.4.	Instrumentos Calefactables.....	117
3.3.5.	Instrumentos Termométricos.....	117
A.	Instrumentos Termométricos que Funcionan por Contacto.....	117
B.	Instrumentos Radiométricos que Funcionan sin Contacto	118
B.1.	Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®	118
B.2.	Cámara FLIR A325 G®	119
B.3.	Cámara OPTRIS PI 05 M®.....	120
3.3.6.	Softwares.....	121
A.	ThermaCAM Researcher®.....	121
B.	PIX Connect®	122
C.	Matlab®	123
3.4.	Cálculos y Algoritmos	124
3.4.1.	Implementación de Algoritmos Internos de las Cámaras	124
3.4.2.	Corrección de Temperaturas de FLIR A325 G®.....	125
A.	Método de Ajuste $T_c - \varepsilon$	127
B.	Método de Ajuste $T_c - T_p$	128
3.4.3.	Procesado de Vídeos IR de OPTRIS PI 05 M®	129
3.4.4.	Ampliación del Rango de Temperaturas	135
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	139
4.1.	Resultados Científico-Técnicos.....	139
4.1.1.	Resultados de los Algoritmos Internos de las Cámaras.....	139
4.1.2.	Resultados de la Calibración de la Emisividad.....	141
4.1.3.	Resultados de la Estimación de Temperaturas	145
4.1.4.	Resultados de los Ciclos de Calentamiento y Enfriamiento de la Pieza	151
4.2.	Análisis de Riesgos.....	153
4.3.	Análisis Económico	156

4.3.1. Descargo de Gastos	156
4.3.2. Presupuesto.....	158
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	159
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
ANEXO I: Código de Programación.....	171 (p.8)
ANEXO II: Manual de Usuario.....	179 (p.12)

Lista de Figuras

Figura 1: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva [9].	8
Figura 2: Zona afectada por el calor (HAZ) de las distintas fuentes de calor [11].	11
Figura 3: Grados de absorción espectral para distintos materiales [12].	11
Figura 4: Modos de propagación: a) Gaussiano, b) Toroide y c) Multimodo [12].	12
Figura 5: Distribución de energía del modo de propagación gaussiano [12].	13
Figura 6: Relación de la divergencia y el diámetro en la calidad del haz [12].	13
Figura 7: Factor de limitación de difracción ($M2$) para diferentes modos de propagación [12].	14
Figura 8: Calidad del haz láser en función de la potencia de cada tipo de generador [13].	14
Figura 9: Construcción de los láseres de CO_2 [13].	16
Figura 10: Sistema de guiado del haz por tubos telescópicos [14].	17
Figura 11: Construcción de los láseres de CO_2 tipo Slab (Izq.), sellada (centro) y de flujo radial de Trumph GmbH (Drcha.) [13].	17
Figura 12: Formas del medio activo para los láseres de estado sólido [13].	18
Figura 13: Construcción de los láseres de estado sólido tipo fibra [13].	18
Figura 14: Construcción de los láseres de diodos de alta potencia (LDAP) [13].	19
Figura 15: Láseres excimer (Izq.) [15]; Sistemas de guiado del haz láser por galvanómetros (Drcha.) [14].	19
Figura 16: Procesados de material por láser en función de la potencia y la calidad del haz [12].	20
Figura 17: Material absorbente (arriba) y reflectante (abajo) [12].	21
Figura 18: Variación de la absorptividad espectral α para distintos materiales [12].	21
Figura 19: Variación de la absorptividad α en función de la temperatura para un láser de CO_2 (10,6 μm) [12].	22
Figura 20: Ilustración del proceso LMD [10].	23
Figura 21: Proceso de aporte de LMD-p (Izq.) y LMD-w (Drcha.) [17].	24
Figura 22: Suministro del hilo lateral (Izq.) y coaxial (Drcha.) [17].	25
Figura 23: Cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS (Izq.) y CoaxPrinter® de Precitec GmbH & Co. KG (Drcha.) [17].	26
Figura 24: Cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS en funcionamiento (Izq.), su reconstrucción de haces (Centro) y la focalización en función de la altura (Drcha.) [19].	26
Figura 25: Modelización de la distribución del polvo (Izq.) y su interacción con el haz láser (Drcha.) en el proceso p-LMD [17].	27
Figura 26: Principales campos de aplicación de la tecnología LMD [17].	28
Figura 27: Evolución del fenómeno del goteo de material obtenida con una cámara de alta velocidad durante el proceso LMD-w [26].	32
Figura 28: Evolución del fenómeno de rozamiento y enganche del hilo obtenida con una cámara de alta velocidad durante el proceso LMD-w [26].	32
Figura 29: Goteo de material (a), aporte adecuado (b) y rozamiento y enganche de hilo (c) del proceso w-LMD [19].	32
Figura 30: Imagen coaxial del baño fundido y determinación del ancho del baño para relacionar con su temperatura [19].	33
Figura 31: Polarización de las ondas electromagnéticas [30].	37
Figura 32: Filtrado de ondas electromagnéticas para polarización [30].	38
Figura 33: Espectro de ondas electromagnéticas [30].	38

Figura 34: Espectro de luz y denominación de rangos dentro del rango infrarrojo [31].	39
Figura 35: Ley de reflexión y refracción de una radiación IR en aire-Ge [30].	40
Figura 36: Reflexiones completamente especulares (a), parcialmente especulares (b) y difusas (c) [30].	40
Figura 37: Superficie Lambertiana [30].	41
Figura 38: Potencia radiante ($d\phi$) de un diferencial de superficie (dA) [30].	42
Figura 39: Relación entre el flujo de energía (ϕ) y su densidad espectral ($\phi\lambda$) [30].	42
Figura 40: Radiancia de cuerpos negros con temperaturas entre 400-1000 °C [30].	44
Figura 41: Radiancia de cuerpos negros con temperaturas entre 100-5.800 K en escala logarítmica [30].	44
Figura 42: Ley de Stefan-Boltzmann para el cálculo de la emitancia [30].	45
Figura 43: Fracción de la radiación emitida en una banda espectral [30].	45
Figura 44: Fracción de la radiación emitida en función de $\lambda \cdot T$ en un intervalo espectral λ_1, λ_2 [30].	46
Figura 45: Emitancia espectral del cuerpo negro (Azul) y el cuerpo gris ($\varepsilon = 0,6$) (Naranja) a 1.000 °C.	47
Figura 46: Emisividad (a) y radiancia (b) espectral de distintos emisores de radiación [30].	48
Figura 47: Comportamiento independiente de la emisividad del cuerpo negro (Izq. en rojo) y dependiente de una superficie real (Drcha. en azul) [30].	51
Figura 48: Ensayo de direccionalidad de observación rotando el objeto (a) y el diagrama polar de los resultados (b) [30].	51
Figura 49: Dependencia direccional de observación en la emisividad para distintos materiales [30].	52
Figura 50: (Izq.) Influencia de las ranuras en la emisividad (a) y las contribuciones (b); (Drcha.) Distribución de la emisividad en una superficie con ranuras de 60° [30].	52
Figura 51: Dependencia de la emisividad de distintos materiales con respecto a la longitud de onda [30].	53
Figura 52: Dependencia de la emisividad de distintos materiales con respecto a la temperatura [30].	53
Figura 53: Desviaciones en temperatura de pirómetros de distinto rango espectral con $\varepsilon = 0,1$ [39].	56
Figura 54: Evolución de la emisividad a 2,3 μm por el primer (Izq.) y segundo (Drcha.) de los pasos del tratamiento de austenización [46].	58
Figura 55: Evolución de la emisividad espectral en la dirección normal de probetas de Cu para temperaturas de calentamiento de (a) 573K, (b) 673K, (c) 773K y (d) 873K [47].	59
Figura 56: Análisis micromorfológico de probetas de Cu con microscopio SEM a (a) 573K, (b) 673K, (c) 773K y (d) 873K [47].	60
Figura 57: Modelización del comportamiento óptico de una superficie de buen acabado (Izq.) y rugosa (Drcha.) [49].	60
Figura 58: Pirómetros IMPAC [39].	61
Figura 59: Tiempo de respuesta de los pirómetros [39].	62
Figura 60: Construcción de los pirómetros [39].	63
Figura 61: Señal de salida de los pirómetros con respecto a la temperatura [39].	63
Figura 62: Pirómetro de fibra óptica [39].	64
Figura 63: Transporte de la radiación por la fibra óptica [39].	64
Figura 64: Comparativa entre las configuraciones mono-fibra y multi-fibra [39].	65

Figura 65: Diagrama del tamaño del objetivo en función de la distancia de medición [39].	66
Figura 66: Ajuste del tamaño del objetivo en función del tamaño de la superficie de interés [39].	67
Figura 67: Funcionamiento de los pirómetros de dos colores [39].	68
Figura 68: Fuentes de interferencia en los instrumentos radiométricos [39].	69
Figura 69: Aplicación de cámaras termográficas en Medical Infrared Imaging para la detección de cáncer de mamas [55].	70
Figura 70: Diagrama de bloques simplificado de una cámara IR [56],[57].	71
Figura 71: Diferentes resoluciones del disponibles en el mercado [28].	71
Figura 72: Tamaño mínimo del objetivo apreciable [28].	72
Figura 73: Efecto de la lente en el campo de visión de una cámara T335 de resolución 320x240 px a 12m [28].	72
Figura 74: Normalización de ganancias y cero offsets [56], [57].	73
Figura 75: Principio de funcionamiento de cámaras IR [28].	74
Figura 76: Imagen térmica de un gato [53].	74
Figura 77: Efecto de la emisividad en superficies de distinto color [28].	75
Figura 78: Efecto de la emisividad en la imagen térmica [28].	75
Figura 79: Fuentes de error en el análisis radiométrico procedente se las reflexiones [28].	76
Figura 80: Estimación de la temperatura aparente reflejada [28].	77
Figura 81: Efecto de la emisividad en la medición de la temperatura [28].	77
Figura 82: Composición de la señal detectada por los sensores de una cámara IR [59].	79
Figura 83: Fuentes de error en el análisis termográfico procedente se las reflexiones [28].	82
Figura 84: Rango, campo y nivel de temperaturas [28].	83
Figura 85: Ajuste térmico manual para un contraste adecuado [28].	83
Figura 86: Paletas de colores de diferentes contrastes [28].	84
Figura 87: Ciclo de calentamiento y enfriamiento de un punto de la pieza fabricada por LMD [45].	85
Figura 88: Emisividad direccional para una probeta a 740K [62].	86
Figura 89: Comparación de la emisividad espectral en la dirección normal calculada con la relación (42) de Hagens-Rubens y los datos experimentales para probetas de hierro comercial Armco a 556K y 740K [62].	87
Figura 90: Regresión lineal de $Stot = IbbTap$ [65].	88
Figura 91: Mapa térmico del proceso de corte aplicando las calibraciones de un cuerpo negro [66].	89
Figura 92: Variaciones de temperatura en función de la emisividad y la longitud de onda para termometría de radiación de banda reducida (a), radiación total (b), banda ancha (c) y el pirómetro de dos colores (d) [67].	90
Figura 93: Configuración de cabezal de aporte empleado una cámara CCD [69].	91
Figura 94: Comparativa de los niveles digitales en la monitorización del baño fundido de forma coaxial entre una cámara CMOS en el rango visible (Izq.) y un sensor PbSe no refrigerado operando en el rango MWIR (Drcha.) [76].	93
Figura 95: (a) Mapa de solidificación; (b) Representación esquemáticas del baño fundido [22].	93
Figura 96: (Izq.) Primera configuración off-axis y una segunda on-axis; (a) Imagen de la configuración off-axis; (b) Imagen de la configuración on-axis [77].	94
Figura 97: Control térmico por altura con una cámara VIS a 45° [23].	94
Figura 98: Cámara MWIR a 60° (Izq.), cámara de visión a 60° (central) y cámara SWIR a 40° [45].	95
Figura 99: Comparativa de la evolución del proceso de aporte de la cámara MWIR y SWIR [45].	95

Figura 100: Disposición de cámara IR off-axis fuera d la zona de trabajo empleado por Hassler et al. [78].	96
Figura 101: (a) Esquema de los instrumentos ópticos; (b) Medición de la temperatura de la cámara IR [80].	96
Figura 102: Calibración de la emisividad con el método del taladrado de agujeros.	100
Figura 103: Colocación del puntero del pirómetro en cordón oxidado por a la falta de control atmosférico.	102
Figura 104: Adquisición a 90° tanto del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® como la cámara FLIR A325 G® para la determinación de ciclos de calentamiento y enfriamiento de piezas de <i>Ti4Al6V</i> fabricados mediante LMD-w.	104
Figura 105: Integración a 60° de la cámara OPTRIS PI 05 M® en el cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS.	107
Figura 106: Diagrama de Gantt del proyecto.	113
Figura 107: Bobina de <i>Ti6Al4V</i> (Izq.) y su montaje en el alimentador de hilo (Drcha.).	115
Figura 108: Posicionador IRBP A® (Izq.) [85] y brazo robótico IRB 4600® de ABB (Drcha.) [86].	115
Figura 109: Celda robótico de 8 GDL de ABB: a) Alimentador de hilo, cabezal, fibra, posicionador y robot; b) Cámara de atmósfera inerte [19].	116
Figura 110: Máquina TITAN® de Tekniker con la puerta cerrada (Arriba) y abierta (Abajo).	116
Figura 111: Mesa térmica (Izq) y horno calefactable (Drcha).	117
Figura 112: Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® [88].	118
Figura 113: Cámara FLIR A325 G® [89].	119
Figura 114: Cámara OPTRIS PI 05 M® [90].	120
Figura 115: Interfaz del Software OPTRIS PIX Connect® [92].	123
Figura 116: Adquisición de señales de temperatura del pirómetro (Arriba en rojo), así como la señal de temperatura original (Centro en negro) y de salida (Abajo en azul) de la cámara.	125
Figura 117: Remuestreo, ajuste, final y saturación de las señales de temperatura.	126
Figura 118: Ajuste polinómico de grado 3 para la nube de puntos $Tc - \varepsilon$ de dos registros.	127
Figura 119: Ajuste polinómico para nube de puntos $Tc - Tp$ de dos registros.	128
Figura 120: Imágenes IR ajustadas de la cámara FLIR A325 G® (Izq.) y OPTRIS PI 05 M® (Drcha.).	129
Figura 121: Procesado de videos IR de la cámara OPTRIS PI 05 M® a través del software PIX Connect®.	130
Figura 122: [Arriba, Izq.] Distribución horizontal; [Arriba Drcha.] Distribución Vertical, con interpolación gaussiana (Rojo), polinómica sin restricciones (Amarillo) y con restricciones (Morado); [Abajo] Superposición de distribuciones (Izq.) e distribución 2D cartesiana (Drcha.) para la interpolación polinómica sin restricciones.	130
Figura 123: Seguimiento de puntos del registro de posición para la interpolación 2D cartesiana: Original (Izq.), Despreciando la componente en Y (Centro) y mostrando en el plano XZ (Drcha.).	131
Figura 124: Mallado de la pared sin filtros (sF) con una discretización de 150x50.	132
Figura 125: Perfiles de temperaturas en el TCP según el registro original sin filtro (sF, Arriba en rojo), el funcionamiento del láser (fL, Central en azul) y inicio y final del funcionamiento del láser (IniFinL, Abajo en verde).	132
Figura 126: Resultados del ajuste de todos los registros según el inicio de funcionamiento del láser y final común según el registro más corto.	133
Figura 127: Representación tridimensional (Izq.) y coordenadas (Drcha.) tras la recolocación y reorientación del registro de posición sin filtros (sF) del robot ABB.	133

Figura 128: Evaluación del mallado según la interpolación polar al inicio de la tercera capa.....	134
Figura 129: Videos IR originales (Arriba), procesadas (Centro) y diagramas t-T en los puntos seleccionados (Abajo) de la cámara FLIR A325 G® [Izq.] y OPTRIS PI 05 M® [Drcha.].....	135
Figura 130: Superposición de temperaturas para el punto seleccionado de la pared.	136
Figura 131: Corrección de temperaturas con el ajuste $T_c - \varepsilon$ (Izq.) y $T_c - T_p$ (Drcha.).....	137
Figura 132: Corrección del primer fotograma de Matlab® (ML) y su diferencia con el software (SW) en el rango R2.....	140
Figura 133: Valor de los píxeles del primer fotograma para el rango R2 de la cámara FLIR A325 G® obtenidas con el software (Arriba), y Matlab® sin corrección (Central) y con corrección (Abajo).....	141
Figura 134: Influencia de las emisiones del entorno en la pared sin chapa reflectante (arriba) y con chapa reflectante (abajo).	142
Figura 135: Oxidación de la pieza al extraer del horno a 700°C (Izq.) y 900°C (Drcha.).....	143
Figura 136: Evolución de temperaturas (Arriba) y sus errores (Abajo) para la variación de ε en la prueba transitoria a 900 °C.	144
Figura 137: Evolución del parámetro ε (Arriba) y la estimación de la emisividad (Abajo) en la prueba transitoria a 900 °C.....	144
Figura 138: Imagen IR midiendo temperaturas del cuerpo negro ($\varepsilon = 1$) en el rango espectral 7,5 ÷ 13 μm	146
Figura 139: Evolución de la emisividad durante el proceso de aporte de paredes delgadas en ausencia de atmósfera protectora según el método de ajuste $T_c - \varepsilon$	147
Figura 140: Resultados del método de ajuste $T_c - \varepsilon$	148
Figura 141: Método de ajuste $T_c - T_p$ con polinomios de grado 3 (Verde), 2 (Amarillo) y 1 (Naranja).	149
Figura 142: Resultados del método de ajuste $T_c - T_p$	150
Figura 143: [Izq.] Interpolación 2D cartesiana según los puntos de adquisición (Arriba) y discretización (Abajo);	[Drcha.]
Interpolación 2D polar según los puntos de adquisición (Arriba) y discretización (Abajo).	151
Figura 144: Evolución térmica del punto (-20,0) sin corregir (Verde), y corregidas con ε_{var} (Naranja) y $\varepsilon_{Pol. 3}$ (Morado).....	152

Lista de Tablas

Tabla 1: Clasificación de procesos no convencionales [11].....	10
Tabla 2: Comparativa de las distintas fuentes de calor [11].	11
Tabla 3: Comparativa de los distintos tipos de láseres [13].....	15
Tabla 4: Particularidades del proceso LMD con polvo e hilo [20].	27
Tabla 5: Tipos de monitorización y control del proceso LMD [19].....	31
Tabla 6: Conductividad y calor específico de algunos materiales [28], [29].	36
Tabla 7: Modos de transferencia de calor por radiación [28].	37
Tabla 8: Longitudes de onda λ de cada uno de los rangos del espectro visible e infrarrojo [32].....	39
Tabla 9: Revisión de cuantificadores radiométricos [30].	41
Tabla 10: Ejemplos de bandas de emisión [30].	46
Tabla 11: Diferencias entre el cuerpo negro y el cuerpo gris [33].	47
Tabla 12: Fracciones de comportamientos idealizados [28].	50
Tabla 13: Parámetros influyentes de la emisividad [30].	50
Tabla 14: Valores de emisividad ε para algunos materiales según el estado y la temperatura [34]....	54
Tabla 15: Densidad y puntos de fusión de algunos materiales [42], [43].	57
Tabla 16: Fuentes de interferencia y posibles soluciones [28].	69
Tabla 17: Rangos de espectro y temperatura de los materiales del detector [56].	73
Tabla 18: Modos de procesamiento de la cámara FLIR A325 G [®] según el parámetro IRFormat [58]. .	78
Tabla 19: Rangos y parámetros de calibración de la cámara FLIR A325 G [®]	78
Tabla 20: Parámetros de compensación atmosférica de la cámara FLIR A325 G [®]	80
Tabla 21: Rangos y Parámetros de compensación del valor del píxel de la cámara FLIR A325 G [®]	81
Tabla 22: Pruebas para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325 G [®]	98
Tabla 23: Parámetros constante en los ensayos para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325G [®]	98
Tabla 24: Pruebas del software ThermaCAM Researcher [®] para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325 G [®]	99
Tabla 25: Pruebas de Matlab [®] para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325G [®]	99
Tabla 26: Pruebas para la calibración de la emisividad.....	100
Tabla 27: Parámetros constantes para la determinación de ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza.....	103
Tabla 28: Pruebas para la estimación de temperaturas.....	103
Tabla 29: Pruebas para la determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza.	106
Tabla 30: Hitos del Trabajo de Fin de Máster.	112
Tabla 31: Composición química del material Ti ₆ Al ₄ V [43].	114
Tabla 32: Propiedades físicas y mecánicas de piezas de Ti ₆ Al ₄ V fabricadas por LMD [43], [83], [84].	114
Tabla 33: Especificaciones técnicas de la máquina TITAN [®] de Tekniker.....	116
Tabla 34: Especificaciones del termopar de tipo K [87].	117
Tabla 35: Especificaciones técnicas del Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22 [®] [88].....	118
Tabla 36: Especificaciones técnicas de la cámara FLIR A325 G [®]	119
Tabla 37: Especificaciones técnicas de la cámara OPTRIS PI 05 M [®]	120
Tabla 38: Observaciones de las pruebas de calibración para la estimación de la emisividad.	141

Tabla 39: Observaciones de las pruebas para la estimación de temperaturas.....	145
Tabla 40: Desviaciones del método de ajuste $T_c - \varepsilon$	147
Tabla 41: Desviaciones del método de ajuste $T_c - T_p$	149
Tabla 42: Resultados finales para el punto (-20,0).....	152
Tabla 43: Lista de riesgos y su clasificación.....	153
Tabla 44: Matriz de probabilidad e impacto de los riesgos.	154
Tabla 45: Medidas a tomar de cada riesgo según el nivel de gravedad (G).....	155
Tabla 46: Gastos de Horas Internas.....	156
Tabla 47: Gastos de Amortizaciones.	157
Tabla 48: Gastos de materiales.	157
Tabla 49: Desglose del Descargo de Gastos.	158
Tabla 50: Desglose del Presupuesto.....	158

Lista de Tablas del Anexo II

1. Tabla del Anexo II: Datos de entrada del código de programación de Matlab® para la monitorización térmica del proceso Laser Metal Deposition (LMD).	180 (2/12)
2. Tabla del Anexo II: Datos de entrada de la función f_Imp_Reg_Temperaturas (Azul) y variables de salida de la operación de importación y carga de datos (Verde).....	182 (4/12)
3. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_Conversion_TTc.....	183 (5/12)
4. Tabla del Anexo II Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_TempLinearMode.....	183 (5/12)
5. Tabla del Anexo II: Datos de entrada particulares (Morado) y genéricos (Azul), y datos de salida de las funciones f_Final_Total (Verde) y f_Saturacion_Total (Naranja).....	184 (6/12)
6. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_Procesado_OPTRIS..	186 (8/12)
7. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_Mallado.	187 (9/12)
8. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_Combinacion_FO.....	188 (10/12)
9. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_Correccion_Temp....	188 (10/12)

Lista de Acrónimos

AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing File
AWJM	Abrasive Water Jet Machining
BPP	Beam Parameter Product
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNC	Control Numérico por Computadora
DED	Directed Energy Deposition
DMLD	Direct Metal Laser Deposition
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
EBM	Electron Beam Melting
ECG	Electrochemical Grinding
ECM	Electrochemical Machining
EM	Electromagnético/a
FA	Fabricación Aditiva
FDM	Fused Deposition Modelling
FPA	Focal Plane Array
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
GDL	Grado De Libertad
HAZ	Heat Affected Zone
HS	Hot Spot
IR	Infrared Radiation
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDAP	Láser de Diodos de Alta Potencia
LENS	Laser Engineering Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
LMD-p	Powder-based Laser Metal Deposition
LMD-w	Wire-based Laser Metal Deposition
LOWTRAN	LOW resolution atmospheric TRANsmission
LPF	Laser Powder Fusion
LWIR	Long Wavelength Infrared Radiation
MIRI	Medical Infrared Imaging
MJF	Multi Jet Fusion
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MP	Melt Pool
MWIR	Mid Wavelength Infrared Radiation
NDT	Non-Destructive Testing
NIR	Near Infrared Radiation
NUC	Non Uniformity Correction
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Personal Computer
PID	Proporcional, Integral y Derivativo
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector
RH	Relative Humidity
SEM	Scanning Electron Microscopy

SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language
SW	Software
SWIR	Short Wavelength Infrared Radiation
TCP	Tool Centre Point
TFM	Trabajo Fin de Máster
USM	Ultrasonic Machining
UV	Ultravioleta
VIS	Visible Spectrum
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
WJM	Water Jet Machining
XRD	X-Ray Diffractometer

1. INTRODUCCIÓN

El documento que se tiene entre manos pertenece a la memoria del Trabajo Fin de Máster (TFM) titulado “*Monitorización Térmica del Proceso Laser Metal Deposition (LMD)*”. Se trata de un proyecto de naturaleza científica-tecnológica realizado en colaboración con la Fundación TEKNIKER.

En el presente apartado correspondiente a la **introducción**, se describe el contexto del trabajo (Ver 1.1) con el fin de situar al lector en el entorno en el que se ha realizado el mismo. Posteriormente, se exponen los objetivos y el alcance del proyecto (Ver 1.2). Para finalizar, se presentan los posibles beneficios que pudiera generar su realización (Ver 1.3), entre los cuales destacan las contribuciones científico-técnicas (Ver 1.3.1), las económicas (Ver 1.3.2), así como las sociales y medioambientales (Ver 1.3.3).

Posteriormente, se repasa el **estado del arte** en lo que respecta a todo lo relacionado con la ejecución del este trabajo (Ver 2). Empezando por la fabricación aditiva (Ver 2.1), se pasa a explicar sus necesidades de monitorización (Ver 2.2). El tercero de los subapartados del estado del arte habla de los principios de medición de temperaturas (Ver 2.3), seguido de los subapartados donde se detallan las particularidades de las mediciones a altas temperaturas (Ver 2.4). Para terminar, se exponen alguno de los trabajos en los que se han medido temperaturas del proceso LMD (Ver 2.5).

Tras este último subapartado del estado del arte, se define la **metodología** (Ver 3) que puede ser implementada en el desarrollo del presente trabajo. Primero, se describen las tareas de la metodología adoptada (Ver 3.1), donde se tienen en cuenta alguno de los trabajos analizados en el estado del arte. A continuación, se expone la planificación que se ha seguido (Ver 3.2), junto al material y los instrumentos que se han necesitado (Ver 3.3). Finalmente, se describen los cálculos y algoritmos que han sido implementados (Ver 3.4).

La parte final de la memoria refleja el **análisis de resultados** (Ver 4), donde se distinguen los resultados científico-técnicos (Ver 4.1), el análisis de riesgos (Ver 4.2) y el análisis económico (Ver 4.3). Finalmente, se exponen las **conclusiones y líneas futuras** (Ver 5) con el fin de extraer información relevante para la continuación del trabajo realizado. Asimismo, se exponen las **referencias bibliográficas** (Ver 6) que son la base de todos los fundamentos científicos y tecnológicos.

Adicionalmente, se incluyen dos anexos con el fin de ampliar la documentación referida a la herramienta de monitorización térmica que se ha desarrollado. La primera de ellas corresponde al **código de programación** (Ver ANEXO I: Código de Programación), mientras que la segunda es el **manual de usuario** (Ver ANEXO II: Manual de Usuario). Así, se pretende poner a disposición del lector la mayor cantidad de material disponible para la comprensión del presente trabajo.

1.1. Contexto

El presente documento corresponde a la memoria del **Trabajo Fin de Máster (TFM)** de la titulación *Máster Universitario en Ingeniería Mecánica* [1] junto al *Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta* [2] de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU) [3]. El trabajo se ha llevado a cabo en colaboración con la *Unidad de Ingeniería Mecánica* de la empresa Tekniker como parte de las prácticas obligatorias del segundo de los másteres mencionados.

El **centro tecnológico y de investigación Tekniker** [4] es una fundación privada sin ánimo de lucro que forma parte de *Basque Research and Technology Alliance (BRTA)* [5] junto a otros 13 centros tecnológicos (Azterlan, Azti, Ceit, Cidetec, Gaiker, Ideko, Ikerlan, Leartiker, Lortek, Neiker, Tecnalia, Tekniker y Vicomtech) y 4 centros de investigación cooperativa (CIC bioGUNE, CIC biomaGUNE, CIC energiGUNE, CIC nanoGUNE) pertenecientes a la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Gobierno Vasco, las Diputaciones Forales de Álava, Bizkaia y Gipuzkoa y el Grupo SPRI [6]. Entre ellos, Tekniker es el centro que se está especializado en la fabricación avanzada, ingeniería de superficies, ingeniería de producto y TICs para fabricación. A día de hoy, Tekniker cuenta con 25 entidades colaboradoras líderes en su sector con el fin de mejorar la coordinación de las estrategias y actividades de I+D+i. Su misión es la de impulsar la capacidad innovadora de sus clientes e incrementar su capital tecnológico para mejorar su competitividad de forma sostenible, a través de la generación y aplicación del conocimiento científico-tecnológico.

En cuanto a la temática, el trabajo se centra en la monitorización térmica del proceso **Laser Metal Deposition (LMD)**. Se trata de una de las tecnologías de fabricación aditiva (FA) en auge que ofrece grandes ventajas frente a los procesos productivos convencionales. Sin embargo, su implementación en la industria para la producción seriada todavía no es rentable, y es por ello que está orientado a la fabricación de piezas específicas con geometrías complejas. Además, no hay que olvidar que las propiedades mecánicas que se pueden conseguir con la tecnología LMD son inferiores. Por consiguiente, se requieren ensayos experimentales con un control del proceso exhaustivo, además de los análisis teóricos pertinentes.

Aquí, la **monitorización térmica** juega un papel importante a la hora de determinar la estabilidad del proceso e implementar un control en lazo cerrado con el fin de mejorar la calidad de las piezas finales. A diferencia de otras tecnologías FA como el *Powder Bed Fusion (PBF)*, la integración en máquinas cerradas no está realizada en LMD. Por consiguiente, su monitorización y control es un tanto complicada que requiere de soluciones particularizadas para cada caso. Dependiendo de la configuración que se dispone, la monitorización térmica será realizada con unos instrumentos determinados en una disposición aceptable. Esto quiere decir que los trabajos realizados por otros autores no son directamente aplicables en cualquier caso, y lo más probable es que se requieran de adaptaciones para su extrapolación.

A continuación, se define el alcance del presente trabajo, así como los objetivos que se pretenden conseguir con la elaboración de una herramienta de monitorización térmica de esta tecnología de FA.

1.2. Objetivos y Alcance

En base al contexto expuesto anteriormente (Ver 1.1), el **objetivo principal** es realizar la monitorización térmica del proceso *Laser Metal Deposition* (LMD) para un rango de temperaturas lo suficientemente amplio como para determinar los ciclos de calentamiento y enfriamiento de las piezas fabricadas. Para ello, se requiere ampliar el rango térmico mediante una combinación de instrumentos termométricos, entre los cuales se encuentran los pirómetros y las cámaras infrarrojas (IR). La razón de esto queda determinada por la limitación del rango que presentan estos dispositivos. Además, las variaciones de funcionamiento hacen que haya cierta imprecisión al superponer los datos adquiridos con cada uno de ellos. Por consiguiente, las mediciones son habitualmente tomadas de forma relativa e independiente. Mediante este Trabajo Fin de Máster (TFM) se pretende desarrollar una metodología lo suficientemente precisa como para poder combinar instrumentos termométricos teniendo en cuenta variaciones de parámetros intrínsecos del material de aporte durante el proceso LMD. De esta forma, se desea garantizar una mejor fabricabilidad, así como poder predecir de la calidad de las piezas resultantes.

Igualmente, se presenta una serie de **objetivos secundarios** con el fin de alcanzar el objetivo principal que se ha comentado. Así, resulta necesario abordar una serie de pasos intermedios que se detallan a continuación:

- Integración de sensores para la monitorización térmica.
- Determinación de algoritmos internos de las cámaras infrarrojas (IR).
- Calibración de instrumentos termométricos.
- Definición de metodología para la determinación de los ciclos térmicos.

En cuanto al **alcance de trabajo**, existen distintas variantes de la tecnología LMD (Figura 21) donde el material de aporte puede estar en forma de polvo (LMD-p) o hilo (LMD-w), siendo esta última de interés para el desarrollo del proyecto que se tiene entre manos. Por lo tanto, conceptos tecnológicos del proceso LMD-p quedan fuera del alcance de este TFM a pesar de presentar aspectos en común con LMD-w para la monitorización térmica. Dicho esto, la solución adoptada en el apartado 3 tendría que ser adaptada tal y como se ha comentado anteriormente.

Asimismo, el TFM se centra en la monitorización térmica; por lo que la monitorización dimensional y geométrica no son objeto de este estudio. En cuanto la configuración de monitorización, se ha optado por la opción offline donde se requiere de un postprocesado de datos a posteriori. Así, se consigue ampliar el conocimiento térmico de futuros procesos en base a experiencias anteriores.

Por último, tenemos las simplificaciones e idealizaciones realizadas que han sido necesarias para abordar la monitorización térmica del proceso LMD debido a su complejidad por ser una tecnología multiparamétrica. Siendo eso así, se ha optado por suponer ciertas propiedades intrínsecas del material constantes e independientes de la localización, es decir, constantes para toda la superficie analizada térmicamente.

Por lo tanto, todo lo que no se ha recopilado en este apartado queda fuera del alcance del presente trabajo y se plantea como una posible línea de investigación y trabajo (Ver 5).

1.3. Beneficios

Mediante el desarrollo de una herramienta de monitorización térmica del proceso LMD, se pretende lograr beneficios a distintos niveles que se detallan a continuación:

1.3.1. Contribuciones Científico-Técnicas y Plan de Difusión

El aumento en el control en la estabilidad térmica del LMD, así como el seguimiento continuo de los parámetros del proceso, lleva a la mejora del rendimiento del proceso productivo debido a la **ampliación del conocimiento científico y técnico**. Gracias a una herramienta que permita prever el comportamiento térmico in situ, se puede saber si el material está siendo fundido correctamente, el grado de dilución que el baño tendrá en el substrato o la tasa de enfriamiento del material, así como la microestructura resultante. Por consiguiente, las propiedades de las piezas finales dependen en gran medida en este aspecto. El control offline en cambio, permite analizar los datos con el fin de aplicar cambios correctivos y preventivos a posteriori. Bien sea de una forma u otra, las contribuciones científico-técnicas son evidentes debido al aumento de información del proceso que se consigue.

En cuanto al **plan de difusión**, se pretende poner a disposición del ámbito científico todos los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del presente trabajo. Para ello, la memoria del TFM que se tienen entre manos serán publicadas en el portal ADDI [7] de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) [8]. Esta plataforma corresponde a un Archivo Digital para la Docencia y la Investigación de la UPV, que nace con la intención de organizar, archivar, preservar y difundir en modo de acceso abierto la producción intelectual resultante de la actividad docente e investigadora ejercida en la Universidad. Aquí, se incluyen artículos científicos, Tesis Doctorales, Trabajos Fin de Máster (TFM) y Trabajos Fin de Grado (TFG), entre otros. Mediante esta herramienta, se pretende dar a los autores el control sobre la integridad de su obra, además del derecho a ser citado y reconocido adecuadamente por su trabajo.

1.3.2. Contribuciones Económicas y Plan de Implementación

Por otra parte, el aumento del control térmico del proceso LMD también supone unos **beneficios económicos** debido a la disminución de pruebas de ensayo y errores iniciales en la puesta en marcha. En ausencia de una herramienta que permita conocer la estabilidad del proceso, hacen falta realizar ensayos experimentales para ajustar los parámetros productivos y conseguir la estabilidad requerida. Por lo tanto, una monitorización térmica del proceso LMD permite reducir los costes económicos en térmicos de tiempo y dinero. Además, gracias a la mejora de la calidad de las piezas finales, se contribuye al valor intrínseco de las mismas.

El **plan de implementación** de este trabajo recae en la integración de la herramienta de monitorización térmica desarrollada en la cadena productiva. Otras tecnologías de fabricación aditiva como el *Powder Bed Fusion* (PBF) permiten este aspecto por su disposición en máquina de fabricación aditiva (FA) cerradas del mercado. La tecnología *Laser Metal Deposition* (LMD) en cambio, presenta una mayor complejidad para la integración, por lo que su despliegue en la industria no es del todo directo. Sin embargo, herramientas de este tipo contribuyen en su implantación y la posterior mejora en la rentabilidad de la producción.

1.3.3. Contribuciones Sociales y Medio Ambientales

Por último, estaría la parte social y medio ambiental, que sería una consecuencia indirecta del razonamiento anterior. Empezando por las **contribuciones sociales**, resulta evidente la reducción de riesgos de ejecución que se consigue gracias al control obtenido con una herramienta de monitorización térmica. Bien es cierto que implementación in situ de una herramienta de este tipo puede evitar riesgos por completo, pero la offline también permite ampliar el conocimiento de cara a evitar futuros problemas. Además, como se agiliza el proceso de puesta en marcha, el tiempo de trabajos innecesarios es reducido o incluso eliminado. Por lo tanto, la contribución social que se consigue es a nivel operacional mejorando las condiciones de trabajo.

Por otra parte, estaría la parte **medio ambiental**. Gracias a la disminución de las pruebas de validación iniciales, se reduce el consumo energético, así como el empleo innecesario del material de aporte. Consecuentemente, la contaminación y generación de residuos es menor, proporcionando un desarrollo social sostenible con el medio ambiente.

2. ESTADO DEL ARTE

El presente apartado que se divide en cinco, y trata sobre el estado del arte de los aspectos relacionados con el presente trabajo. El primero de ellos habla sobre la **fabricación aditiva** (Ver 2.1), donde se realiza una clasificación de las distintas tecnologías (Ver 2.1.1) para centrar la atención en el proceso LMD (Ver 2.1.2). A continuación, se exponen las **necesidades de monitorización** (Ver 2.2), donde se describen las particularidades de la monitorización dimensional y geométrica (Ver 2.2.1) y la térmica (Ver 2.2.2). Hilando con este último, se explican **principios de medición de temperaturas** (Ver 2.3). Aquí, se distinguen las mediciones por contacto que se basan en conducción (Ver 2.3.1) y las de sin contacto por radiación (Ver 2.3.2). Una vez terminado con este subapartado, se detallan las **particularidades de las mediciones a altas temperaturas** (Ver 2.4), donde se expone la influencia de los cambios de estado y fase del material (Ver 2.4.1), así como la evolución de la emisividad (Ver 2.4.2) y la necesidad de instrumentos sin contacto (Ver 2.4.3). Finalmente, se exponen alguno de los **trabajos en los que se han medido temperaturas en del proceso LMD** (Ver 2.5). En esta última, se distinguen aquellos trabajos en los que se ha realizado una estimación de la emisividad (Ver 2.5.1), medición de temperaturas con instrumentos radiométricos (Ver 2.5.2), así como la monitorización y el control térmico del proceso LMD (Ver 2.5.3).

2.1. Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva (FA), o *additive manufacturing* (AM) en inglés, es un proceso productivo avanzado en el que el material es añadido capa a capa partiendo de un diseño CAD hasta conseguir la geometría tridimensional deseada. Esto ofrece muchas ventajas frente los procesos de fabricación convencionales que suelen ser sustractivos (torneado, fresado, rectificado...). Entre ellos destaca la **disminución del peso** de los componentes que se consigue gracias a la posibilidad de fabricar piezas íntegras sin necesidad de partición en subconjuntos y un mejor aprovechamiento del material. La **flexibilidad** es un factor clave a la hora de evaluar la fabricabilidad de un componente, y en este sentido, FA es una opción que permite la producción de geometrías distintas de gran complejidad en un mismo lote o cadena de producción. Además, se consigue una **disminución del lead time** debido al menor número de pasos para la elaboración de una misma pieza. Por todo ello, las distintas tecnologías de fabricación aditiva están siendo expandidas en infinidad de industrias como la aeronáutica y la automoción, tanto para la producción como la reparación de los componentes de alto valor añadido.

Sin embargo, no hay que olvidar que los procesos FA proporcionan unas **propiedades mecánicas y calidades superficiales inferiores** a los procesos de fabricación convencionales. Esto hace que habitualmente su aplicación esté limitada a campos donde las exigencias de seguridad sean menores. En este sentido, se está realizando un esfuerzo importante por parte de empresas y universidades para

maximizar la fiabilidad y durabilidad de los componentes fabricados por estas tecnologías, donde los ensayos experimentales de fractura y fatiga juegan un papel importante a la hora de verificar los cálculos resistentes. Por consiguiente, la **inversión tecnológica e intelectual** en el desarrollo de estas tecnologías ha aumentado sustancialmente en los últimos años.

Dentro de este apartado se realiza una **clasificación de las tecnologías FA** disponibles en el mercado (Ver 2.1.1), seguido de una explicación detallada del **proceso LMD** (Ver 2.1.2), que es la base del trabajo realizado. Por ello, a partir de aquí, los subsiguientes apartados se centran en esta tecnología, incluyendo la explicación de la **fuerza de calor procedente del láser** (Ver A), junto a la descripción del **proceso de aporte metálico** (Ver B) y las distintas **configuraciones** (Ver C). Para terminar, se incluyen los principales **campos de aplicación** del proceso LMD, así como las **líneas de investigación** en las que se está trabajando a día de hoy, y en lo que se quiera ahondar de cara a futuro (Ver D).

2.1.1. Clasificación

Dentro de la fabricación aditiva (FA) existen distintas tecnologías que ofrecen la posibilidad de fabricar piezas, las cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos (Figura 1):

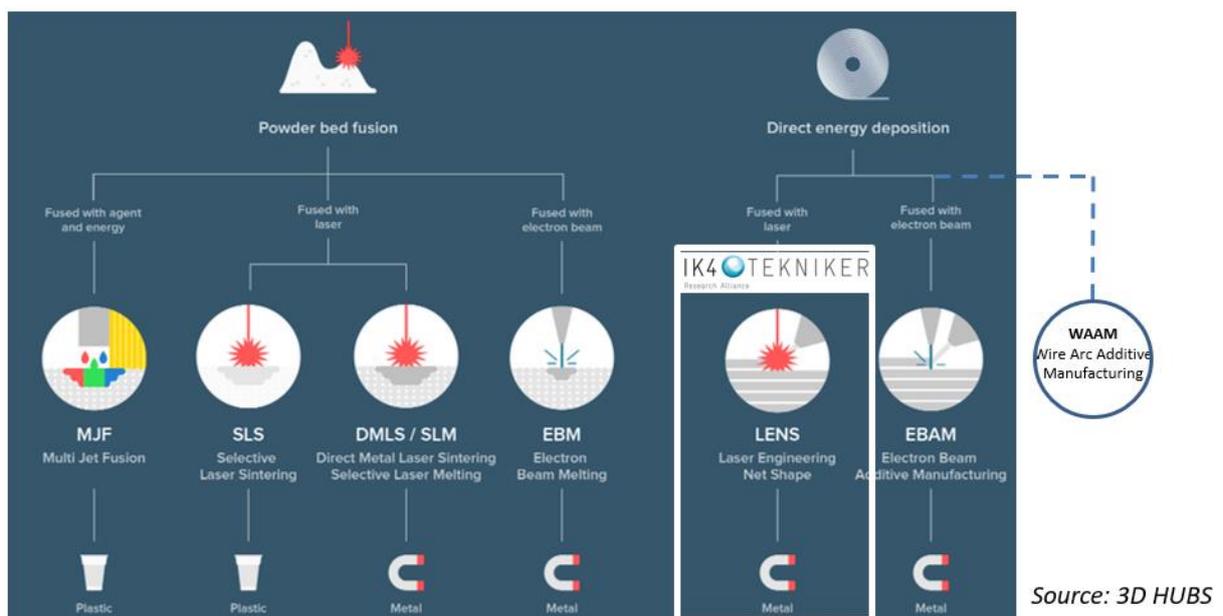


Figura 1: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva [9].

El primero de ellos es el **Powder Bed Fusion (PBF)** que consiste en la unión de las partículas de polvo que han sido depositadas sobre el espacio de trabajo bien sea a través de agentes aglutinantes como en el *Multi Jet Fusion* (MJF), un haz láser como en *Selective Laser Sintering* (SLS) para materiales poliméricos y *Selective Laser Melting* (SLM) para materiales metálicos o a través de un haz de electrones como en el *Electron Beam Melting* (EBM).

El segundo gran grupo sería el de **Direct Energy Deposition (DED)**, que se trata de una tecnología que añade material a través de una boquilla en forma de polvo o hilo que es fundido y depositado sobre un baño fundido (*melt pool*) generado sobre la superficie deseada. Para ello, existen distintas posibilidades: bien sea con un haz láser como en el caso del *Laser Metal Deposition (LMD)*, un haz de electrones como es el caso del *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*, o incluso se puede hacer uso de un arco eléctrico con el fin de fundir el material que se desea añadir como en *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*.

2.1.2. LMD: Laser Metal Deposition

La tecnología *Laser Metal Deposition (LMD)* [10] es un proceso de **fabricación aditiva DED** basado en la deposición de material a través de la fusión de polvo o hilo metálico con un haz láser (Ver A). Mediante la fuente de energía proveniente del haz láser, en combinación con una boquilla lateral o coaxial por la que se suministra el material de aporte, se construye la geometría tridimensional capa a capa partiendo de un diseño CAD (Ver B). Debido a la diversidad de aplicaciones de LMD, en la literatura se pueden encontrar distintos nombres para denominar a esta tecnología:

- Laser cladding.
- Laser deposition.
- Laser consolidation (LC).
- Laser Powder Fusion (LPF).
- Laser Engineering Net Shaping (LENS).
- Direct Metal Laser Deposition (DMLD).

La principal característica del proceso LMD es la posibilidad de **producir piezas 3D**, además de **reparar componentes de alto valor añadido** con una adhesión excelente con el material base. Comparando con el resto de los procesos FA la tecnología LMD presenta una **dilución reducida** (< 5%) gracias a la focalización del haz láser y la eficiencia del material de aporte. En cuanto a las distorsiones, son relativamente menores gracias al **control de la zona afectada por el calor (HAZ)** que se consigue.

A diferencia de los procesos de fabricación convencionales, las piezas fabricadas por LMD no presentan uniones de tipo soldadas o atornilladas debido a la integración de la geometría tridimensional. Esto hace que **no haya uniones que pudieran generar concentración de tensiones**, lo cual es un aspecto crítico en la iniciación y propagación de grietas por fatiga. Generalmente, todos los componentes trabajan bajo cargas cíclicas que repercuten en su vida útil. Por ello, esta ventaja es de vital importancia en componentes que estén dirigidos a aplicaciones como la aeronáutica. Sin embargo, todavía existen problemáticas asociadas con la porosidad interna y las faltas de fusión localizadas que limitan la aplicación del proceso en piezas de alta responsabilidad.

Por otra parte, hay que tener en cuenta la **flexibilidad** que ofrece esta tecnología desde el punto de vista de materiales que se pueden procesar, así como las geometrías que se pueden conseguir. A priori, se puede fabricar prácticamente cualquier geometría que pueda ser diseñada mediante un programa CAD, lo cual ofrece un gran abanico de posibilidades. Esto hace que el **ahorro de la energía y el tiempo**,

además del **aprovechamiento del material** puedan ser significativos, dando lugar a una disminución de la huella de carbono en la cadena productiva.

Sin embargo, no hay que olvidar que el *Laser Metal Deposition* es una tecnología aún en desarrollo que **no proporciona unas propiedades mecánicas e integridad superficial tan buenas** como los procesos de fabricación convencionales. Esto hace que se requieran operaciones de acabado posteriores para conseguir piezas funcionales que pudieran ser utilizadas en aplicaciones industriales, lo cual aumenta los costes de producción. Aunque es cierto, que el cómputo total de los costes suele ser menor que los procesos convencionales, la diferencia es sustancial con respecto a una pieza sin operaciones de acabado recién fabricada por LMD.

A. Fuente de Calor por Láser

Tal y como se ha comentado en el apartado correspondiente a la clasificación (Ver 2.1.1), la fuente de calor con la que se lleva a cabo el proceso de aporte puede ser diferente dependiendo de la tecnología FA del que se trate. En el caso del LMD, el calor es suministrado por un haz laser, cuyo nombre viene de sus siglas en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Se trata de un dispositivo que emite ondas electromagnéticas (EM) con unas propiedades especiales:

- ✓ Emisiones de una única longitud de onda.
- ✓ Propagación unidireccional.
- ✓ Gran irradiancia mantenida en distancias muy lejanas.
- ✓ Focalización de las emisiones.

La aplicación más relevante del láser es el de procesado de materiales (Ver A.3), donde se clasifica como un **proceso no convencional térmico** en el que el arranque de material se da por una combinación de los fenómenos de fusión y vaporización. La tabla de abajo muestra una clasificación de los procesos no convencionales que se pueden encontrar a día de hoy en la industria:

Tabla 1: Clasificación de procesos no convencionales [11].

TIPO DE PROCESO	DESCRIPCIÓN	PROCESOS
Mecánico	Erosión mediante un flujo de abrasivo o fluido	Corte por agua (WJM) Corto por agua con abrasivo (AWJM) Ultrasonidos (USM)
Electroquímico	Energía electroquímica que arranca el material	Mecanizado electroquímico (ECM) Rectificado electroquímico (ECG)
Térmico	Arranque de material mediante fusión/vaporización	Láser Electron Beam Melting (EBM) Plasma Oxifuel
Químico	Arranque químico de la superficie	Fresado químico

En la Tabla 2, se muestra la comparativa del láser frente a otras fuentes de calor dentro de los procesos no convencionales térmicos. Cada una de ellas presenta una densidad de energía diferente, lo cual repercute en la focalización de la energía y por consiguientes, en la zona afectada por el calor (HAZ) tal y como se muestra en la Figura 2.

Tabla 2: Comparativa de las distintas fuentes de calor [11].

FUENTE	ORIGEN DE LA ENERGÍA	DENSIDAD DE ENERGÍA (W/cm^2)
Láser	Radiación	$10^5 \div 10^9$
Electron Beam (EBM)	Energía cinética de los electrones	$< 10^9$
Plasma	Arco eléctrico	$\approx 10^6$
Oxifuel	Combustión	$10^2 \div 10^3$

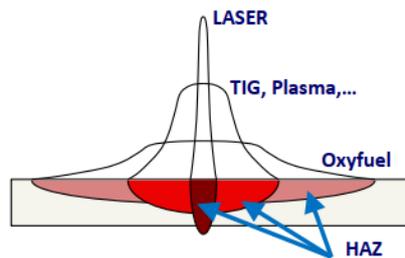


Figura 2: Zona afectada por el calor (HAZ) de las distintas fuentes de calor [11].

A.1. Parámetros

A continuación, se describen algunos de los parámetros más importantes a la hora de definir el funcionamiento de un láser:

La **longitud de onda** es una característica intrínseca del láser que depende del medio activo que se utilice, por lo que está directamente relacionado con el tipo de láser (Ver A.2). Además, determina el grado de absorción de energía del material que se desea procesar, ya que cada material presenta una absorción dependiente de la longitud de onda (Figura 3).

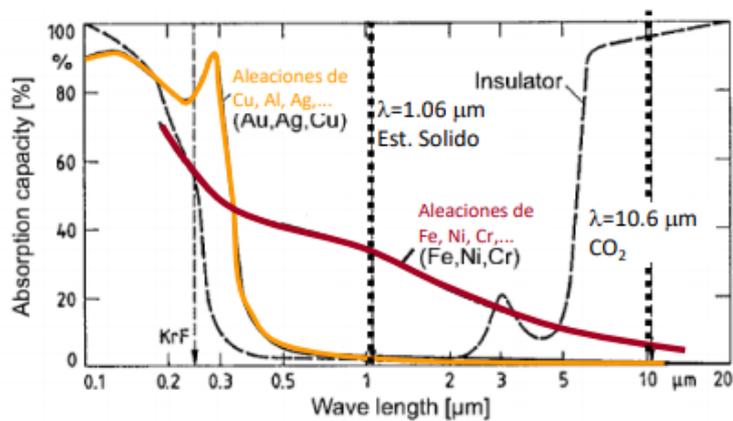


Figura 3: Grados de absorción espectral para distintos materiales [12].

La **potencia total** (P) que puede irradiar el cabezal láser y la distribución de ésta en la superficie del haz, es decir, la **densidad de potencia** (DP), juegan un papel importante en las aplicaciones para las que se puede utilizar el láser. Esta última es calculada mediante la siguiente expresión:

$$DP = \frac{P}{\pi D^2/4} \quad (1)$$

Donde:

P : Potencia del láser (W).

D : Diámetro del haz (mm).

En cuanto a la **densidad de energía** (DE), hay que diferenciar entre el funcionamiento en continuo y en régimen pulsado, ya que se trata de un parámetro dependiente del tiempo de incidencia del láser. La densidad de energía de los láseres continuos se obtiene mediante la expresión (2), mientras que los de los láseres a pulsos con (3):

$$DE_{pulsado} = \frac{P \cdot t_p}{\pi D^2/4} \quad (2)$$

$$DE_{continuo} = \frac{P}{D \cdot V_f} \quad (3)$$

Donde:

t_p : Tiempo de incidencia del láser (s).

V_f : Velocidad de avance del cabezal (mm/s).

La **calidad de haz** es un aspecto importante a la hora de seleccionar el campo de aplicación del láser, y depende del generador (Figura 8), además de la óptica y las condiciones utilizadas. Hay que tener en cuenta que la potencia radiada por un haz láser no es uniforme, sino que existe una determinada distribución de potencia dentro del haz, y la calidad del láser es dependiente de esta. La distribución de energía viene definida por los modos de propagación, que son distribuciones estacionarias del campo magnético generado por el haz láser. Entre estas destacan el modo gaussiano (Figura 4, a), el toroide (Figura 4, b) y el multimodo (Figura 4, c).

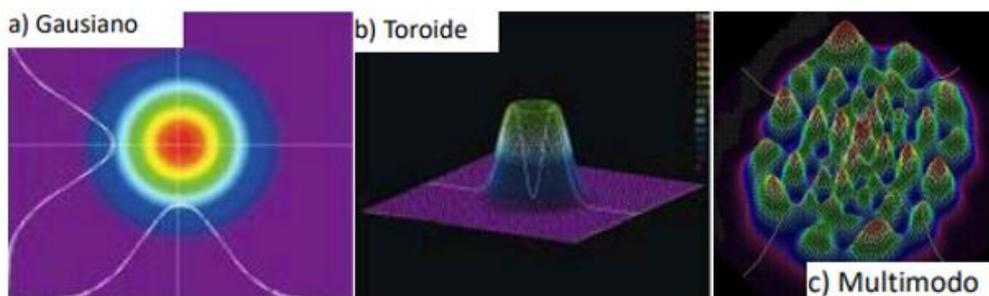


Figura 4: Modos de propagación: a) Gaussiano, b) Toroide y c) Multimodo [12].

El modo de propagación gaussiano, también llamado TEM₀₀, es el modo de sección transversal más reducida y con un tamaño del foco lo más pequeño que se puede conseguir. Por consiguiente, presenta una focalización de energía elevada con una mínima divergencia (Figura 5). Esa es la razón por la que se toma como referencia a la hora de determinar la calidad del haz en un láser.

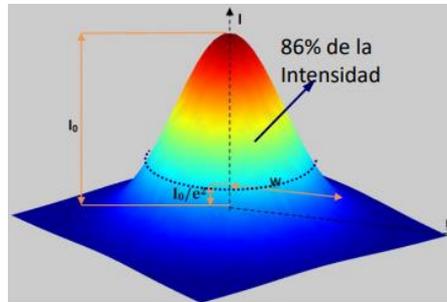


Figura 5: Distribución de energía del modo de propagación gaussiano [12].

La calidad del haz es un indicador de la capacidad que tiene el haz para concentrar energía en un punto lo más pequeño posible. Se habla de un haz de alta calidad cuando el diámetro del haz es muy pequeño y la divergencia es baja, por lo que a medida que aumenta la divergencia o el diámetro, el haz pierde calidad (Figura 6).

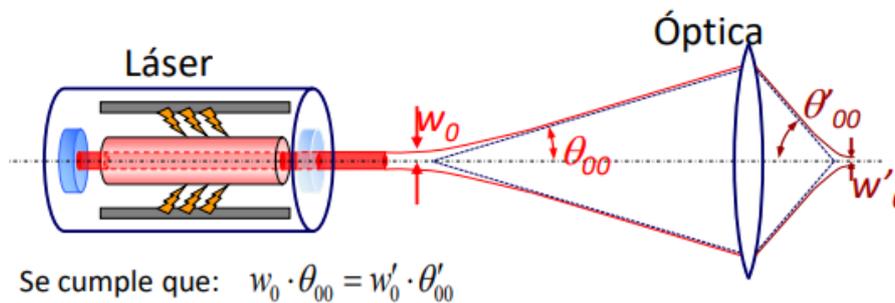


Figura 6: Relación de la divergencia y el diámetro en la calidad del haz [12].

Para cuantificar la calidad del haz, se emplean diferentes parámetros que toman como referencia el modo gaussiano. El *factor de propagación del haz* (K) y el *factor de limitación por difracción* (M^2) por ejemplo, cumplen la siguiente relación:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{w_0 \cdot \theta_{00}}{w_r \cdot \theta_r} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{w_r \cdot \theta_r} \quad (4)$$

Donde:

λ : Longitud de onda del haz láser (μm).

w_r : Diámetro de salida del haz láser (mm).

θ_r : Ángulo de salida del haz láser (rad).

Tal y como se puede deducir de la expresión (4), el factor K disminuye para peores niveles de calidad, mientras que M^2 aumenta (Figura 7). Sin embargo, en ambos casos el valor unitario supone la mejor calidad asemejándose al modo gaussiano.

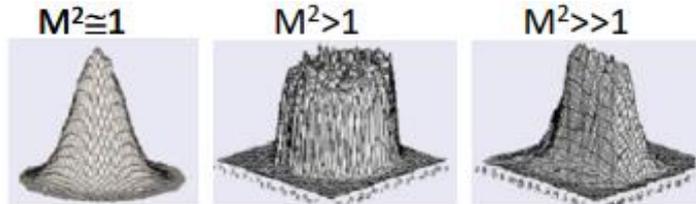


Figura 7: Factor de limitación de difracción (M^2) para diferentes modos de propagación [12].

Otro parámetro de calidad sería el *Beam Parameter Product* (BPP), que se obtiene multiplicando el diámetro mínimo del haz por el semiángulo de divergencia siguiendo la ecuación (5), y se expresa en unidades de $mm \cdot mrad$. Este parámetro de calidad presenta la ventaja de no tomar como referencia el modo gaussiano, lo cual es conveniente a la hora de cuantificar la calidad de un láser de diodos de alta potencia (LDAP) debido al tipo de haz que se genera (Figura 14).

$$BPP = w_r \cdot \theta_r = M^2 \cdot w_0 \cdot \theta_{00} = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \tag{5}$$

Tal y como se puede observar en la siguiente figura, la calidad del haz láser es dependiente de la potencia de funcionamiento de cada generador, entre otros aspectos. Se puede decir que la calidad del haz empeora según aumenta es potencia, independientemente del generador que se utilice.

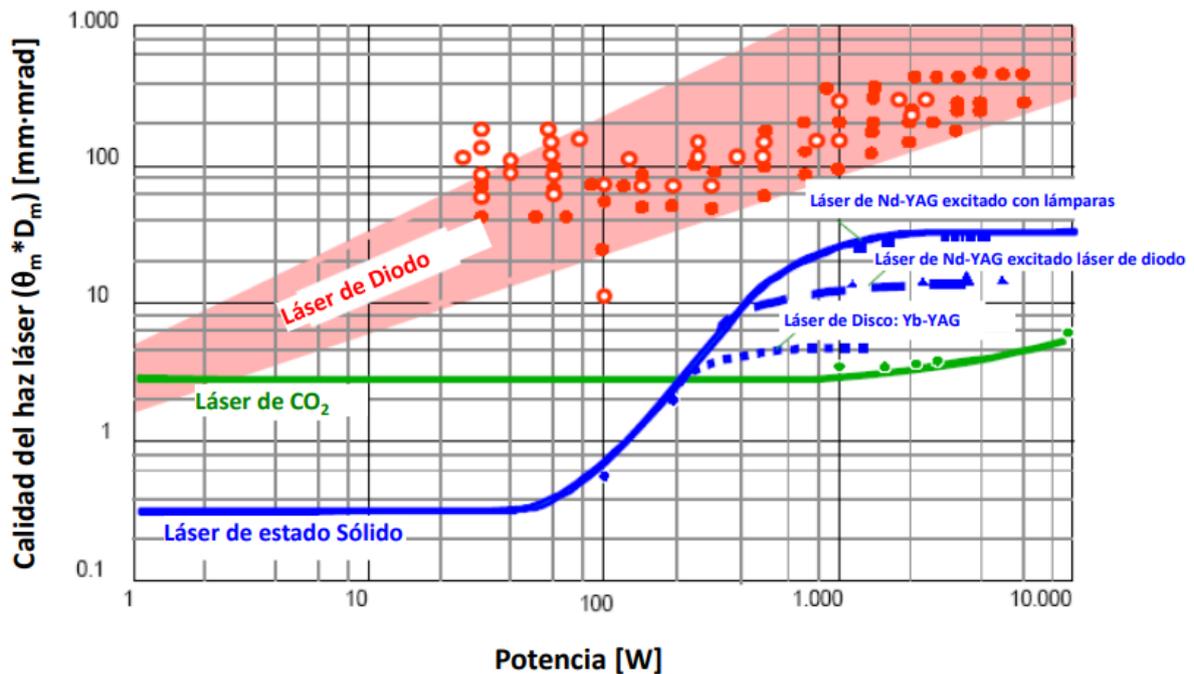


Figura 8: Calidad del haz láser en función de la potencia de cada tipo de generador [13].

Por último, está el parámetro de la **eficiencia energética** (ϵ), que se puede definir de diferentes formas dependiendo del tipo de energía que se considere. Siendo esto así, la eficiencia eléctrica ($\epsilon_{eléctrica}$) es la más empleada en la práctica por su sencillez y directa aplicación con el consumo de la corriente eléctrica [11]. Según la expresión (6), la eficiencia eléctrica es la relación entre la potencia de salida del láser (P_{salida}) y la potencia eléctrica consumida ($P_{consumida}$):

$$\epsilon_{eléctrica} = \frac{P_{salida}}{P_{consumida}} \tag{6}$$

Desde el punto de vista energético, el láser es un sistema altamente ineficiente debido a las pérdidas en forma de calor. A continuación, se mencionan algunas de las fuentes de pérdida energética más relevantes:

- ❖ Absorción del medio activo.
- ❖ Ineficiencia del sistema de excitación.
- ❖ Absorción y desalineamiento del sistema de guiado del haz láser.
- ❖ Refrigeración necesaria para evacuar el calor y evitar daños en el resonador.

A.2. Tipos de Láseres

En cuanto a los tipos de láseres que se encuentran disponibles en el mercado, existen diferentes y cada una de ellas emite en diferentes zonas del espectro electromagnético (Ver subapartado A de 2.3.2). Además, la elección del mismo repercute en los parámetros (Ver A.1) que pueden ser fundamentales a la hora de optimizar el rendimiento del proceso. En la siguiente tabla se expone un breve resumen de las características de los tipos de láseres, y seguidamente se realiza una descripción detallada de cada uno de ellos:

Tabla 3: Comparativa de los distintos tipos de láseres [13].

	CO ₂	Estado Sólido			LDAP	Excimer
		Nd-YAG Barra	Disco	Fibra		
Medio activo	CO ₂ + He + N ₂ gas	Nd-YAG sólido	Yb-YAG sólido	Yb-YAG sólido	Ga-As semicond.	Xe/Ar + Cl/Fl gas
Excitación	Pulsos eléctricos	Láser diodos	Láser diodos	Láser diodos	Pulsos eléctricos	Pulsos eléctricos
Longitud de onda	10,7 μm	1,06 μm	1,03 μm	1,03 μm	0,7-0,9 μm	126-320 μm
Potencia	100W-20kW	3W-8kW	750W-16kW	<10W-100kW	30W-10kW	-
Eficiencia	10%	13%	30%	30%	40%	-
Calidad del Haz	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Pobre	-
Materiales	No metales	Metales	Metales	Metales		

Aplicación	Corte	Corte	Corte	Corte	Trat.	Cirugía Microtec.
	Soldadura	Soldadura	Soldadura	Soldadura	Superf.	
	Marcado	Sinterizado	Sinterizado	Sinterizado	Sinterizado	Cladding
		Cladding	Cladding	Cladding	Cladding	Soldadura
Transporte del haz	Tubos y espejos	Fibra óptica	Fibra óptica	Fibra óptica		

Los **láseres de dióxido de carbono (CO₂)** emplean como medio activo una mezcla de dióxido de carbono (CO₂), helio (He) y nitrógeno (N₂) en estado gaseoso cometido en un depósito (Figura 9), y la excitación se realiza a través de impulsos eléctricos.



Figura 9: Construcción de los láseres de CO₂ [13].

En cuanto al haz resultante, presenta buena relación entre potencia (hasta 40 kW) y calidad a una longitud de onda de 10,7 μm (infrarrojo lejano, LWIR). Esto supone un índice de absorción reducido para el caso de materiales como el aluminio (Al). El procesado de aceros con este tipo de láseres en cambio, presentan mayores niveles de absorción para esa longitud de onda. Siendo esto así, el rendimiento de los equipos láser de CO₂ es del orden del 10%.

Como curiosidad, los láseres de CO₂ no se pueden guiar mediante fibra óptica, porque el material presenta niveles de absorción elevados a 10,7 μm de longitud de onda. Por ello, resulta necesario un sistema de guiado del haz por tubos telescópicos hasta el cabezal. Tal y como se puede ver en la Figura 10, estos sistemas están formados por un conjunto de tubos que cierran el camino óptico por donde se propaga el láser, lo que permite garantizar la seguridad frente a desviaciones del haz fuera de la zona de trabajo. Por si fuera poco, se consiguen controlar las condiciones de limpieza a lo largo del recorrido del haz.

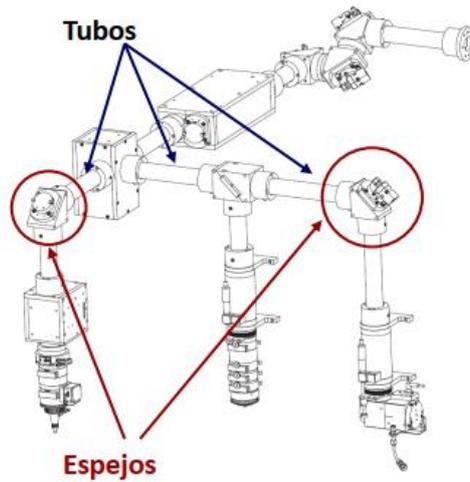


Figura 10: Sistema de guiado del haz por tubos telescópicos [14].

Dentro de los láseres de CO₂, se pueden encontrar tres tipos de configuraciones: *Slab* (Figura 11, Izq.), la configuración sellada (Figura 11, Centro) y la de flujo axial o radial (Figura 11, Drcha.). Para más información sobre cada uno de ellos, consultar la referencia [13].



Figura 11: Construcción de los láseres de CO₂ tipo *Slab* (Izq.), sellada (centro) y de flujo radial de Trumph GmbH (Drcha.) [13].

En el caso de los **láseres de estado sólido**, el medio activo es un cristal YAG dopado con neodimio (Nd) o iterbio (Yb) que se excita con una fuente de radiación a través de lámparas o láseres de diodos. La longitud de onda de la emisión oscila entre 1.030 y 1.080 nm, siendo 1.064 nm (infrarrojo cercano, SWIR) el habitualmente empleado. Para esta longitud de onda, la absorción de los metales es mucho mayor que en los láseres de CO₂, pero menor para los no metales. A diferencia de la longitud de onda de los láseres de CO₂ (10,7 μm), los láseres de estado sólido permiten el guiado del haz por la fibra óptica sin llegar a fundir debido a su baja absorción (1 dB/km), o lo que es lo mismo, elevada transmisividad. Esto está justificado por las escasas impurezas de la microestructura interna de la fibra de transporte, lo cual es una ventaja frente a otros sistemas de guiado. Sin embargo, las reflexiones que se dan en los acoplamientos de la entrada y salida de la fibra óptica pueden llegar a suponer unas pérdidas de hasta un 15%.

Dentro de los láseres de estado sólido, se pueden encontrar tres variantes en función de la forma del medio activo: barra, fibra y disco (Figura 12). Este aspecto determina la disipación de calor en función de la relación entre la superficie exterior (S) y el volumen (V) que ocupa en el espacio. Un ratio S/V elevado proporcionan mejores comportamientos desde el punto de vista térmico, dando lugar a mayores eficiencias energéticas (Ver A.1).

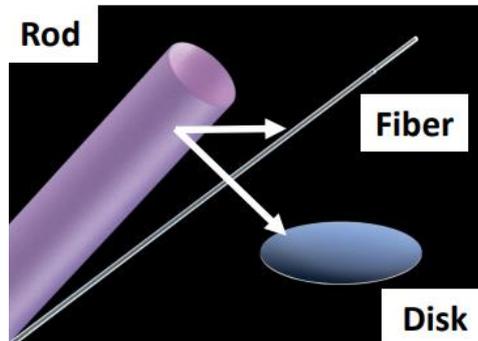


Figura 12: Formas del medio activo para los láseres de estado sólido [13].

El láser de estado sólido en forma de barra es la configuración menos eficiente entre las tres (13%) por requerir de un buen alineamiento entre barras colocadas en serie para conseguir buena calidad del haz a potencias elevadas ($< 8 \text{ kW}$). Por consiguiente, está siendo remplazado por los láseres de estado sólido en forma de fibra o disco. En el caso de la configuración en forma de disco, el rendimiento puede llegar a ser de hasta un 30% para potencias de hasta 16 kW . En cuanto al láser de estado sólido en la que el medio activo se encuentra en forma de fibra, se puede conseguir rendimientos de un 30% con potencias de hasta 8 kW . Tal y como se puede ver en la Figura 13, en este caso el aumento de la eficiencia por la mejora del ratio S/V se consigue alargando las fibras en forma de bobina (2). Excitando esta con una unidad de diodos (1), se consigue una emisión estimulada de forma prolongada hasta la salida donde se conecta a la fibra óptica de transporte (3). Debido a la facilidad de transporte del haz que supone, se trata de la configuración de láseres de estado sólido más extendida en la industria.

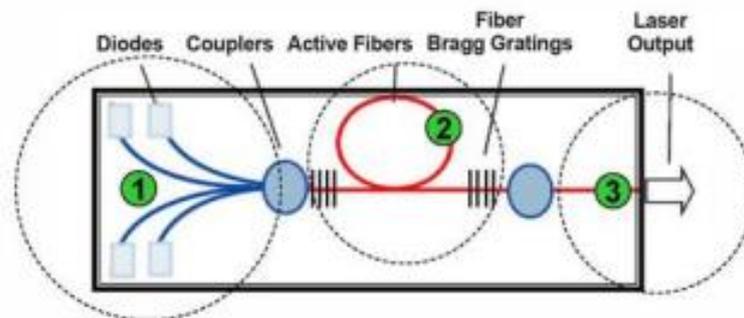


Figura 13: Construcción de los láseres de estado sólido tipo fibra [13].

Los **láseres de diodos de alta potencia (LDAP)** por su parte, emplean un conjunto de semiconductores de Ga-As como medio activo. Cada uno de ellos solo alcanza una potencia del orden de mW , y se suelen superponer uno detrás del otro (Figura 14) con el fin de alcanzar potencias de hasta $25 kW$ con un rendimiento que ronda los $35 \div 40\%$. La excitación se da por impulsos eléctricos, y se emite un haz a una longitud de onda de $930 nm$ (infrarrojo cercano, NIR). Como punto negativo destaca la mala calidad del haz que se consigue en comparación con los láseres de CO_2 y estado sólido, por lo que su uso se centra en la soldadura o los tratamientos térmicos superficiales. Eso sí, son lo más económicos, lo cual puede marcar la diferencia en un futuro no tan lejano (Ver A.4).

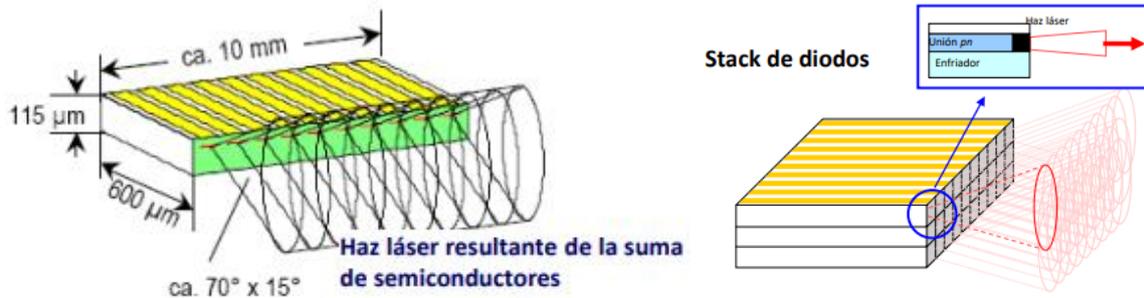


Figura 14: Construcción de los láseres de diodos de alta potencia (LDAP) [13].

Los **láseres excimer** (Figura 15, Izq.) emplean una mezcla de gases nobles (Xe o Ar) y gases reactivos (Cl o F) como medio activo. Al igual que en el caso de los láseres de CO_2 y LDAP, la excitación se realiza por impulsos eléctricos, pero el transporte del haz suele ser con galvanómetros (escáneres) debido a la rapidez de reorientación que ofrecen los conjuntos de espejos de inercia reducida (Figura 15, Drcha.). El resultado es un haz cuya longitud de onda se encuentra ente los 126 y $351 nm$ (ultravioleta, UV), presentando altas calidades del haz para potencias reducidas. Habitualmente, los láseres de excímeros suelen trabajar a pulsos con una frecuencia y duración de $100 Hz$ y $10 ns$ respectivamente. Su campo de aplicación principal es la medicina, aunque se está expandiendo al sector de la microtecnología para la fabricación de semiconductores.

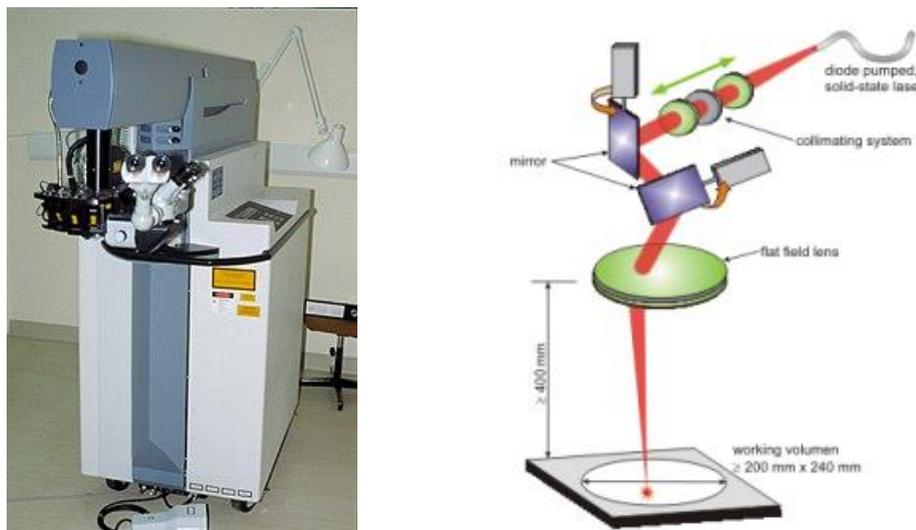


Figura 15: Láseres excimer (Izq.) [15]; Sistemas de guiado del haz láser por galvanómetros (Drcha.) [14].

A.3. Procesado de Materiales

El láser es una herramienta que se ha introducido en un amplio número de sectores y aplicaciones [16], entre los cuales destaca el procesamiento de materiales [12]. Aquí, el haz láser es empleado como fuente de calor para evaporar o fundir el material en procesos como el **corte de chapa**, el **marcado** y la **soldadura**. Además, existen otros procesos en fase de maduración como los **tratamientos superficiales** (temple, texturizado, limpieza...), el **microtaladrado** y el **aporte selectivo de material dentro de la fabricación aditiva** (Ver 2.1). En todas ellas, la interacción entre el láser y los materiales presenta las siguientes características:

- ✓ Ausencia de fuerzas mecánicas.
- ✓ Ausencia de límites de aceleración del haz láser por no presentar inercia alguna.
- ✓ Precisión en el guiado del haz láser.
- ✓ La luz no se desgasta y no requiere de cambio, aunque sí lo hacen los sistemas ópticos.
- ✓ Alto control de la energía en la intensidad de radiación emitida.
- ✓ Manejo relativamente sencillo de altas potencias.
- ✓ Alta calidad en el tamaño del haz supone evitar operaciones de acabado posterior.
- ✓ Mínima zona afectada por el calor (HAZ).
- ✓ Gran flexibilidad posibilita la aplicación en diferentes materiales y procesos.
- ✓ Automatización fácil en robots y máquinas CNC con control del láser.
- ✓ Mejora de las condiciones de trabajo desde el punto de vista de seguridad y salud.

En la Figura 16 se muestra la distribución de cada uno de los procesos dentro de la aplicación de procesamiento de materiales en función de la calidad del haz y la potencia del láser. La impresión y el marcado son las que menores niveles de potencia requieren, mientras que el corte y la soldadura profunda de materiales metálicos son los que más lo necesitan. En el caso de las soldaduras convencionales, así como los tratamientos superficiales por láser, no se precisa de altos niveles de calidad por la mayor envergadura del haz.

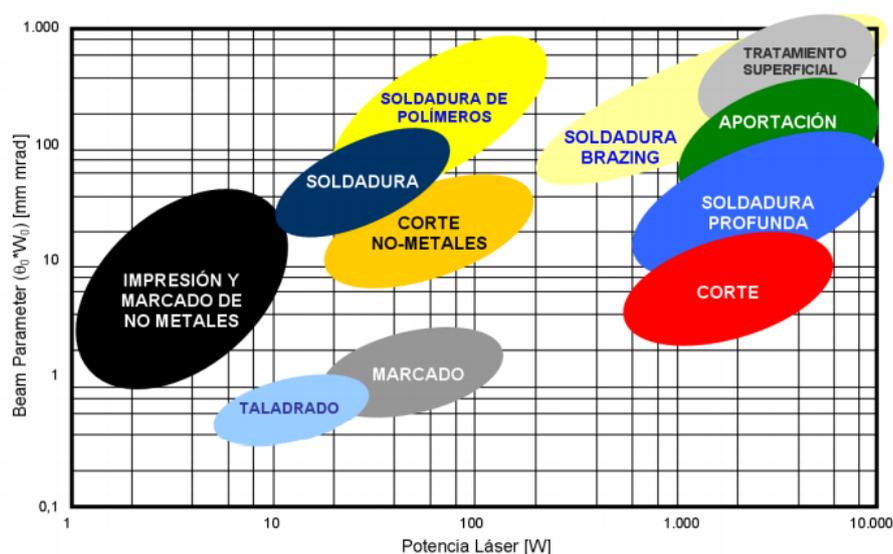


Figura 16: Procesados de material por láser en función de la potencia y la calidad del haz [12].

Tal y como detalla en el apartado 2.3.2, cuando un haz incide en una superficie, una parte se refleja y otra se absorbe. Esto, además de depender de los parámetros mencionados en el subapartado D.1 para la emisividad (ϵ), también depende de la calidad del haz y la potencia del láser (Ver A.1). La parte absorbida por el material es la que se convierte en calor, y se emplea para la fusión y vaporización de los materiales.

Los materiales absorbentes de radiación son ideales en este caso por la capacidad de generar calor de la radiación que incide sobre ellos (Figura 17, arriba), mientras que los reflectantes no aprovechan esta energía y la expulsan al exterior en forma de reflexiones (Figura 17, abajo).

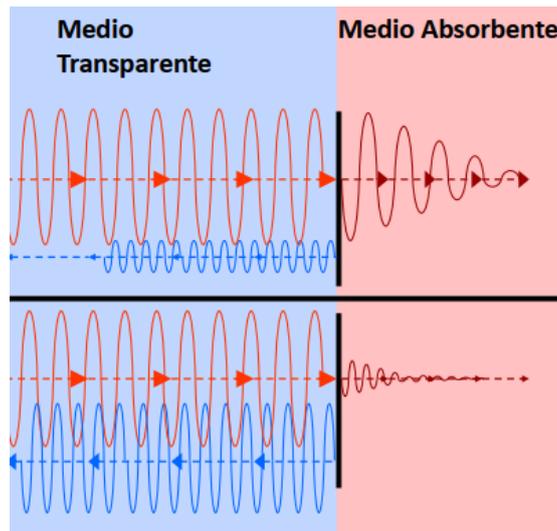


Figura 17: Material absorbente (arriba) y reflectante (abajo) [12].

Esto pone de manifiesto que la capacidad de procesamiento por láser es dependiente de la absorptividad (α) del propio material entre otros aspectos. En la Figura 18 se muestra la variación espectral de α para algunos de los materiales más empleados en la industria para este tipo de aplicaciones:

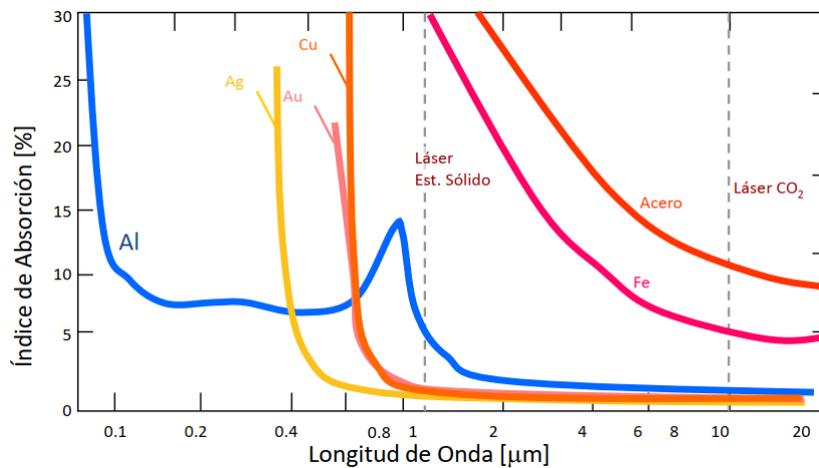


Figura 18: Variación de la absorptividad espectral (α) para distintos materiales [12].

Por otra parte, que el coeficiente de absorción espectral (α_λ) de los materiales también varía con la temperatura, siendo este tan pequeño a temperatura ambiente que puede suponer unas pérdidas de energía de hasta un 90%. Por ello, muchas veces se realiza el precalentamiento de las piezas con el fin de aumentar la absorptividad y conseguir un mayor aprovechamiento de energía. Además, se aprecia un aumento de α con el cambio de fase y vaporización del material. En la siguiente figura se muestra el ejemplo para el procesamiento de distintos aceros mediante un láser con una longitud de onda de $10,6 \mu\text{m}$ correspondiente a un láser de CO_2 :

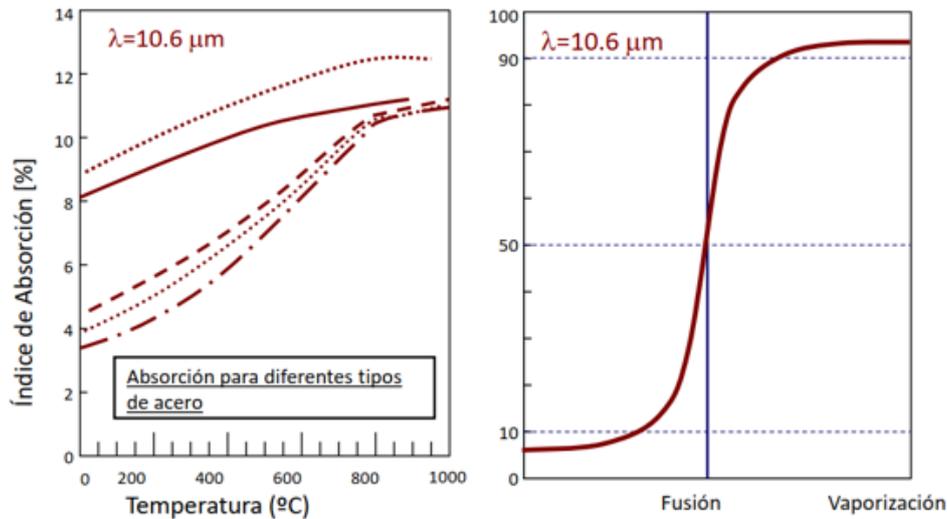


Figura 19: Variación de la absorptividad (α) en función de la temperatura para un láser de CO_2 ($10,6 \mu\text{m}$) [12].

A.4. Tendencias Futuras

A continuación, se mencionan algunas de las tendencias que se aprecian analizando el mercado del láser:

- Implantación de fuentes de mayor potencia.
- Mejora de prestaciones en cuanto a la calidad del haz.
- Aumento de la fiabilidad.
- Mejora de la eficiencia de los equipos.
- Popularización del láser de fibra.
- Desarrollo y mejora de láseres de diodos de alta potencia (LDAP).

B. Proceso de Aporte Metálico

El primer paso consiste en la generación del diseño tridimensional de la pieza que se desea fabricar a través de la tecnología LMD. Para ello, se hace uso de un software de CAD como *NX*, *Catia* o *Solid Edge* instalado en un ordenador independiente de la máquina de fabricación aditiva (FA). Una vez que se tiene el diseño final, se exporta el archivo 3D en formato STL o AMF a un software CAM para generar las trayectorias que debe seguir la máquina LMD en base a una estrategia de aportación determinada. Aquí, el postprocesado del código juega un papel importante a la hora de adaptar el lenguaje de programación a la máquina empleada, lo cual puede ser realizada por algoritmos preprogramados o manualmente.

Tras generar las trayectorias y definir los parámetros del proceso, se procede a la construcción de las piezas tridimensionales. El proceso de aporte de la tecnología LMD se realiza a través de un suministro continuo del material en la zona focal del haz láser. Gracias a la propiedad direccional y coherente del haz, se consigue fundir el material en la zona focal generando lo que se denomina baño fundido (*melt pool*), y el material de aporte es suministrado en dicha zona con el fin de generar un cordón de material aportado. Según avanza el cabezal a lo largo de las trayectorias previamente definidas en el programa CAM, el baño fundido sufre una solidificación más o menos acusada que repercutirá en la microestructura y las propiedades mecánicas de la pieza final que ha sido creada capa a capa gracias a la superposición de los cordones que se han ido aportando.

En la Figura 20 se muestra la ilustración de un proceso LMD-p para el caso de un material de aporte disimilar formado por partículas de la aleación Ti_6Al_4V y carburo de titanio (TiC), que es una de las líneas de investigación en la que se está centrando hoy en día con grandes expectativas de futuro para aplicaciones avanzadas (Ver D).

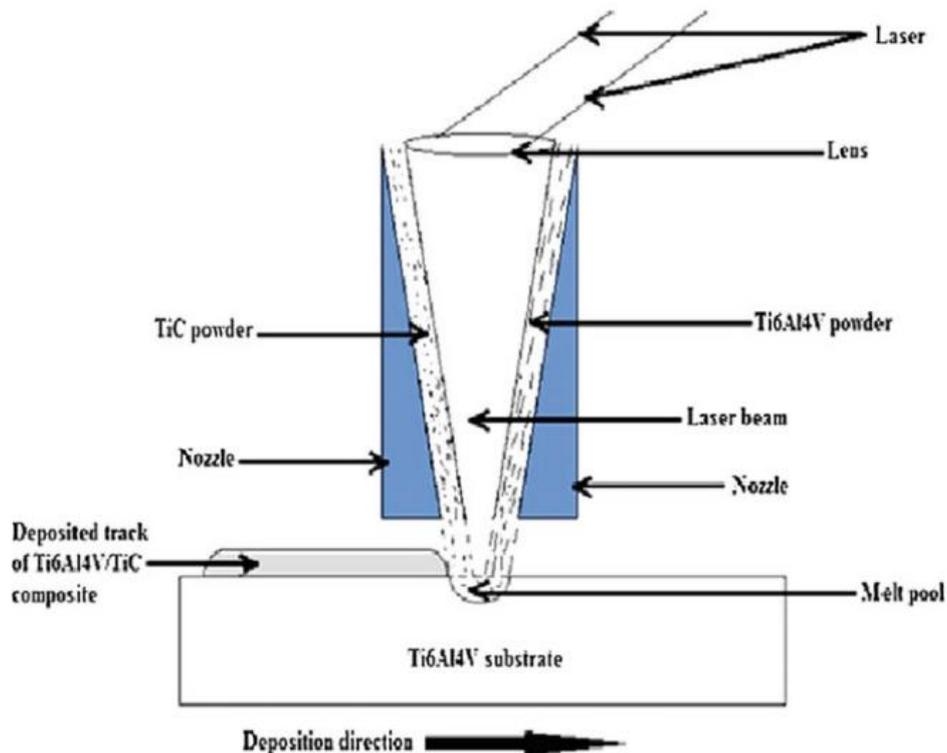


Figura 20: Ilustración del proceso LMD [10].

C. Configuraciones

Dentro de la tecnología LMD existe la posibilidad de operar con material de aporte en forma de polvo o hilo metálico, y en base a ello, las configuraciones del cabezal y el proceso de aporte son diferentes (Figura 21).

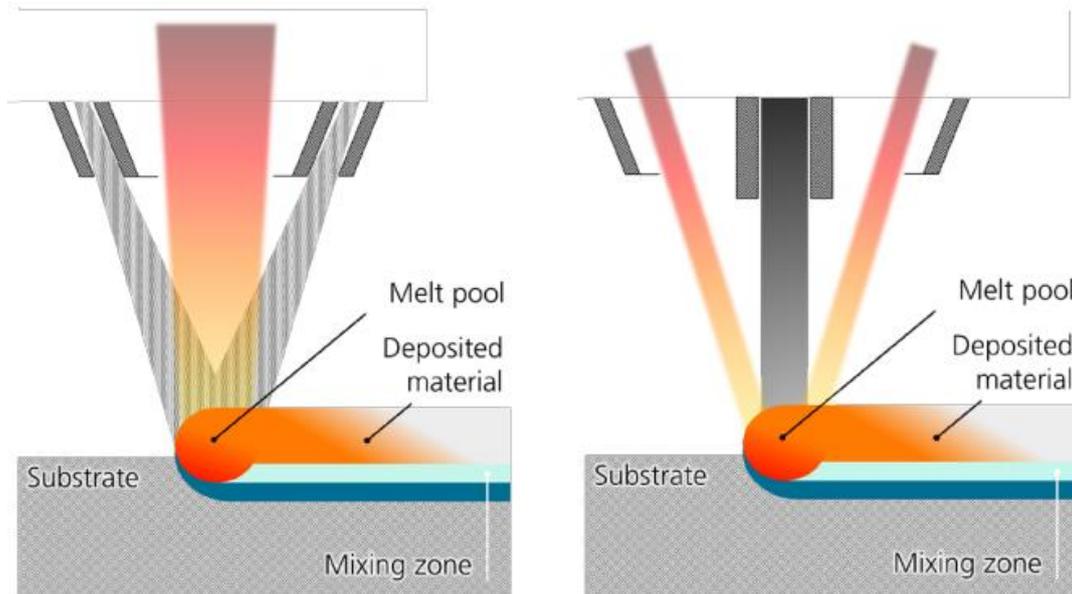


Figura 21: Proceso de aporte de LMD-p (Izq.) y LMD-w (Drcha.) [17].

El primero de ellos es conocido como **Powder-based Laser Metal Deposition (LMD-p)**, y utiliza polvo como material de aporte para el procesamiento. Esto se puede conseguir con una configuración lateral (off-axis) o coaxial (on-axis) suministrando polvo alrededor del haz láser de forma discreta o homogénea gracias a una boquilla. Como el presente Trabajo Fin de Máster se centra en la otra alternativa donde el material de aporte es en forma de hilo, esta configuración queda fuera del alcance del presente documento (Ver 1.2). Para más información, consultar la referencia [17].

Por otra parte, está el **Wire-based Laser Metal Deposition (LMD-w)** que trabaja con material de aporte en forma de hilo metálico. En este caso, el suministro del hilo puede ser realizado lateral (Figura 22, Izq.) o coaxialmente (Figura 22, Drcha.), siendo esta última lo más habitual por la independencia con respecto a la dirección de avance del cabezal.

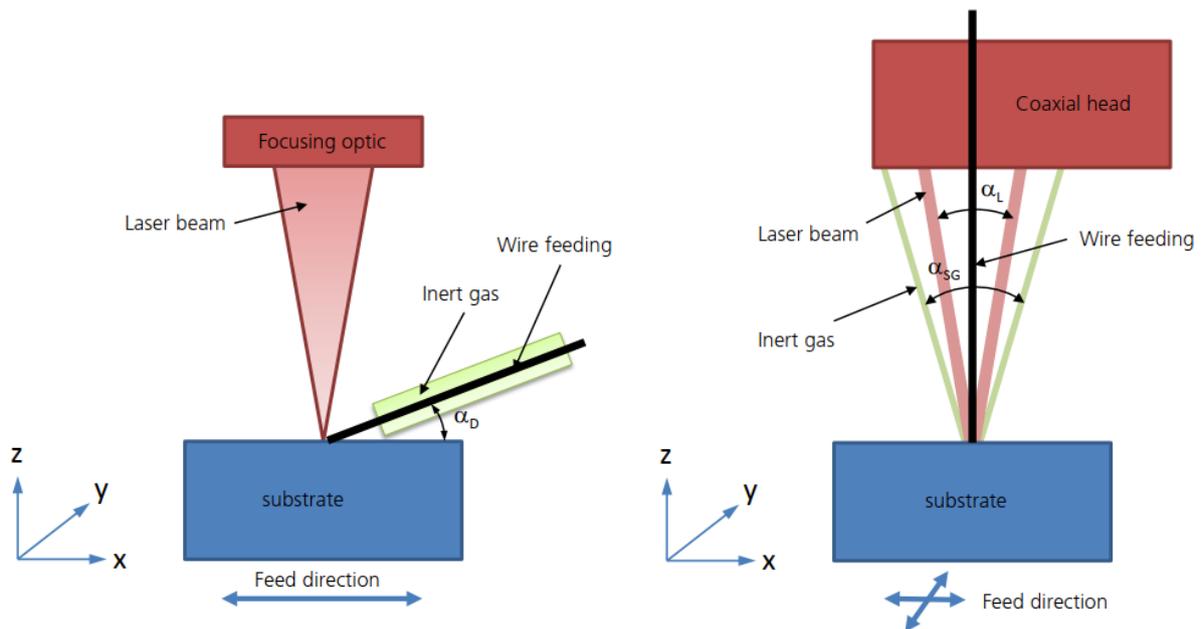
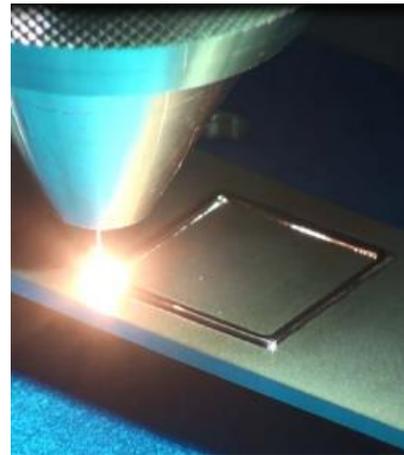
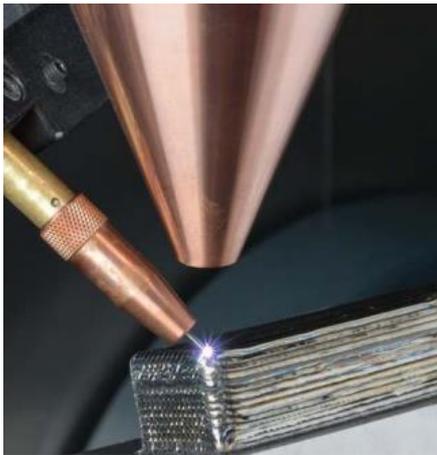


Figura 22: Suministro del hilo lateral (Izq.) y coaxial (Drcha.) [17].

Dentro de la configuración coaxial del LMD-w, puede haber diferencias en la reconstrucción del haz láser. Esto se consigue gracias a un cabezal con unas determinadas ópticas que permiten focalizar el haz láser en la zona donde se desea conseguir el baño fundido. Una solución es el cabezal COAXwire® de *Fraunhofer IWS* (Figura 23, Izq.), que divide el haz en tres de forma que se forman 120° entre ellos. Alternativamente, el cabezal CoaxPrinter® de *Precitec GmbH & Co. KG* (Figura 23, Drcha.) realiza la reconstrucción partiendo de dos semiconos, consiguiendo una distribución de energía más homogénea en el baño fundido.

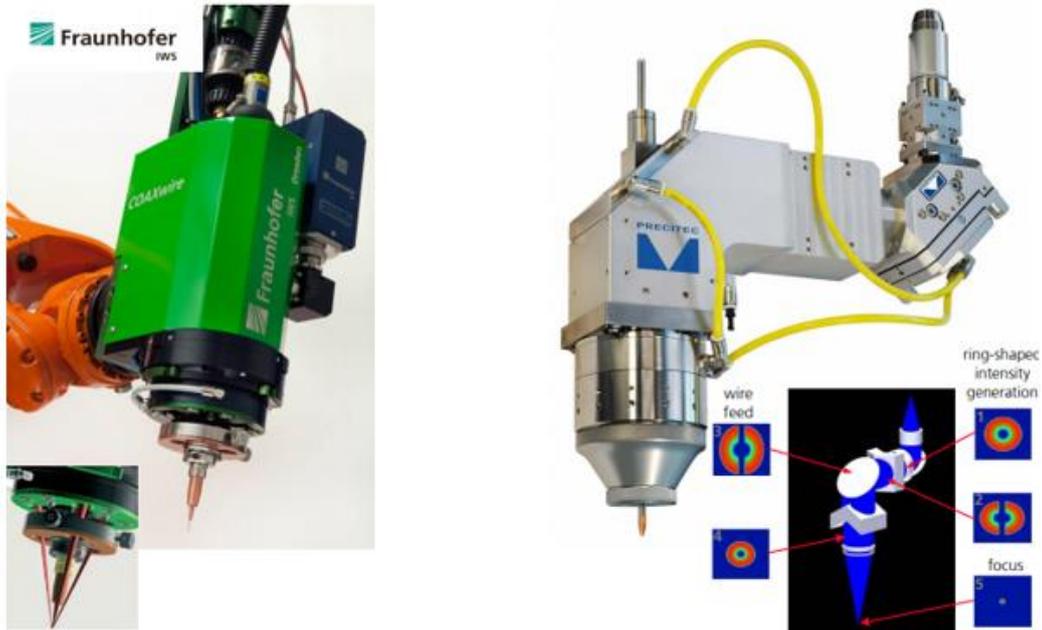


Figura 23: Cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS (Izq.) y CoaxPrinter® de Precitec GmbH & Co. KG (Drcha.) [17].

Para la ejecución de las tareas realizadas durante el presente trabajo han sido empleadas ciertos materiales e instrumentos (Ver 3.3), entre los cuales se encuentra el cabezal COAXwire® de *Fraunhofer IWS* [18]. Aquí, el haz láser es dividido en tres formando 120° entre ellos (Figura 24, Centro), lo cual causa dificultades su reconstrucción. En caso de que la distancia entre el cabezal y la superficie de aporte del sustrato sea igual a la distancia focal, la reconstrucción del haz formará un círculo perfecto (Figura 24, Drcha., a). Sin embargo, se produce una desfocalización del haz según va aumentando la altura (Figura 24, Drcha., b,c) hasta el punto que se distinguen claramente los tres haces (Figura 24, Drcha., d). Esto es debido al ángulo que forman los tres haces con respecto a la dirección del haz original, lo cual está determinado por la construcción del cabezal formada por espejos reflectores.

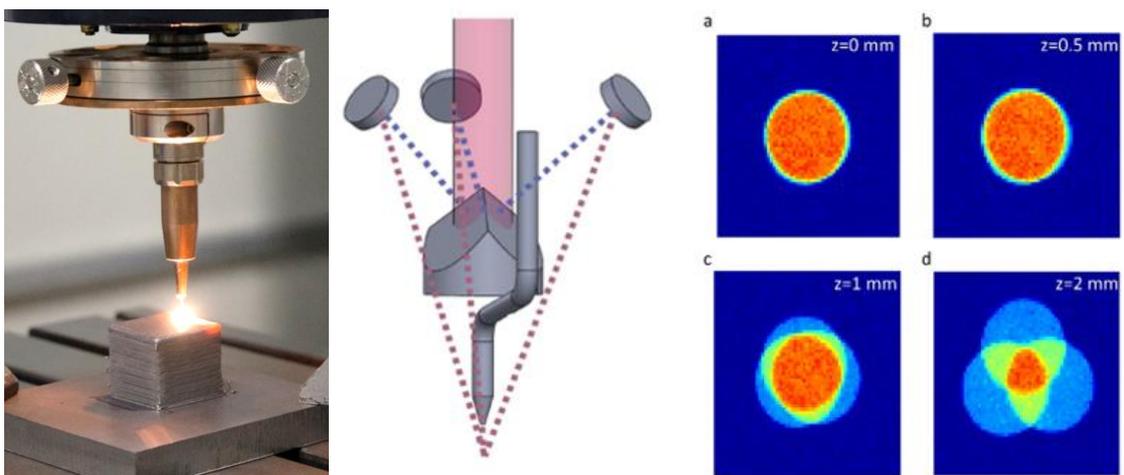


Figura 24: Cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS en funcionamiento (Izq.), su reconstrucción de haces (Centro) y la focalización en función de la altura (Drcha.) [19].

Centrándonos en la comparativa de LMD-p y LMD-w, se puede decir que ninguno de ellos es la solución definitiva, ya que cada uno de ellos tiene sus particularidades ofreciendo una serie de ventajas y desventajas. En la siguiente tabla se muestran algunos de ellos:

Tabla 4: Particularidades del proceso LMD con polvo e hilo [20].

CARACTERÍSTICAS	LMD-p	LMD-w
Material	Menor diversidad de materiales con posibilidad de combinación para materiales disimilares	Mayor diversidad de materiales
Coste económico	Elevado	Medio
Complejidad	Media	Elevada
Ratio de deposición	≈ 2 kg/h	≈ 3 kg/h
Eficiencia	50 ÷ 80 %	100 %
Seguridad y Salud	Peligroso	Peligrosidad baja

En general, la **gama de materiales** de aporte en forma de polvo es menor que en hilo debido a la complejidad de su producción, la cual se realiza por atomización de partículas. El hilo en cambio, presenta una fabricabilidad superior, además de la facilidad para el transporte. Por ello, el abanico de posibilidades que ofrecen los fabricantes y suministradores de hilos satisface prácticamente la totalidad de las aplicaciones de hoy en día. Entre los materiales que se encuentran disponibles en forma de hilo destacan las aleaciones de Acero, Aluminio y Titanio, las superaleaciones (Níquel, Cobalto...) y los aceros inoxidable. Sin embargo, no hay que olvidar la posibilidad de crear materiales disimilares que ofrece LMD-p. Esto hace que se amplíe la gama de materiales que se pueden conseguir por dicho proceso, con la ventaja de crear mezclas de polvos personalizadas que se ajusten a los requisitos de cada aplicación.

Eso sí, las diferencias en la fabricabilidad hacen que haya un salto significativo en el **coste económico** del material de aporte dependiendo de la forma en la que se encuentre. En el caso de la aleación Ti₆Al₄V, la diferencia del formato en hilo al polvo puede llegar a ser de 141% según [21].

Por otra parte, hay que considerar la **complejidad** del proceso de aporte de cada una de las configuraciones de la tecnología LMD. En el caso del LMD-p, existe cierta dificultad en la modelización de la distribución de las partículas de polvo y su interacción con el haz láser antes de llegar al baño fundido (Figura 25). Sin embargo, nada tiene que ver con los problemas derivados del goteo y las colisiones del proceso LMD-w, donde se requiere un control y monitorización exhaustivo de la potencia del láser, la velocidad de avance y la altura de capa entre otros aspectos (Ver 2.2).

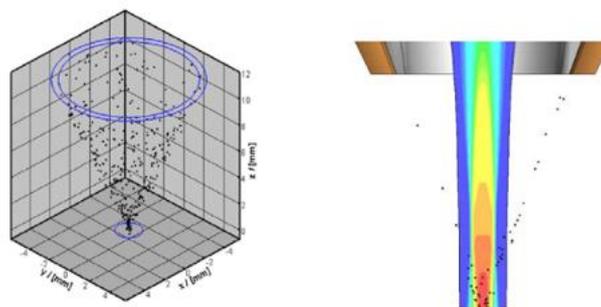


Figura 25: Modelización de la distribución del polvo (Izq.) y su interacción con el haz láser (Dcha.) en el proceso p-LMD [17].

En cuanto al **ratio de deposición**, el proceso LMD-w ofrece unos niveles de aporte de material superiores a la tecnología LMD por polvo. Según [21], los ratios de deposición de LMD-p rondan los 2 kg/h , mientras que las del proceso LMD por hilo puede llegar a ser de 3 kg/h más o menos. Además, la **eficiencia** que ofrece el hilo es superior frente al polvo debido al aprovechamiento del 100 % del material que se suministra en la zona de aporte. En el caso del LMD-p cambio, solo se consigue fundir parte del polvo ($50 \div 80\%$) y el resto difícilmente se puede reutilizar debido al daño térmico que sufren las partículas.

Por último, tenemos los aspectos de **seguridad y salud** que ofrecen cada una de las configuraciones de la tecnología LMD. Los dos procesos trabajan con láser, por lo que no habría diferencias en ese aspecto. Sin embargo, la manipulación del polvo supone una mayor dificultad por su explosividad y el peligro ante aspiraciones, los cuales pueden generar problemas respiratorios. Por lo tanto, el proceso LMD-w, donde el material de aporte está en forma de hilo, es la solución más segura y limpia.

D. Aplicaciones y Líneas de Investigación

Tal y como se ha mencionado en la introducción de este apartado (Ver 2.1.2), la tecnología de fabricación aditiva LMD permite la **fabricación de piezas tridimensionales** a partir del diseño digital en formato CAD, además de la **reparación de componentes de alto valor añadido** en sectores como la aeroespacial, energética o moldes y herramientas. En esta misma línea, cabe la posibilidad de efectuar una **refabricación a partir de una pieza ya existente** añadiendo material sobre la misma como un sustrato se tratara [10]. Incluso se pueden realizar **recubrimientos** que presenten propiedades tribológicas específicas con el fin de aumentar la durabilidad de los componentes con contactos que produzcan fricción. En la siguiente figura se exponen los principales campos de aplicación de la tecnología LMD:

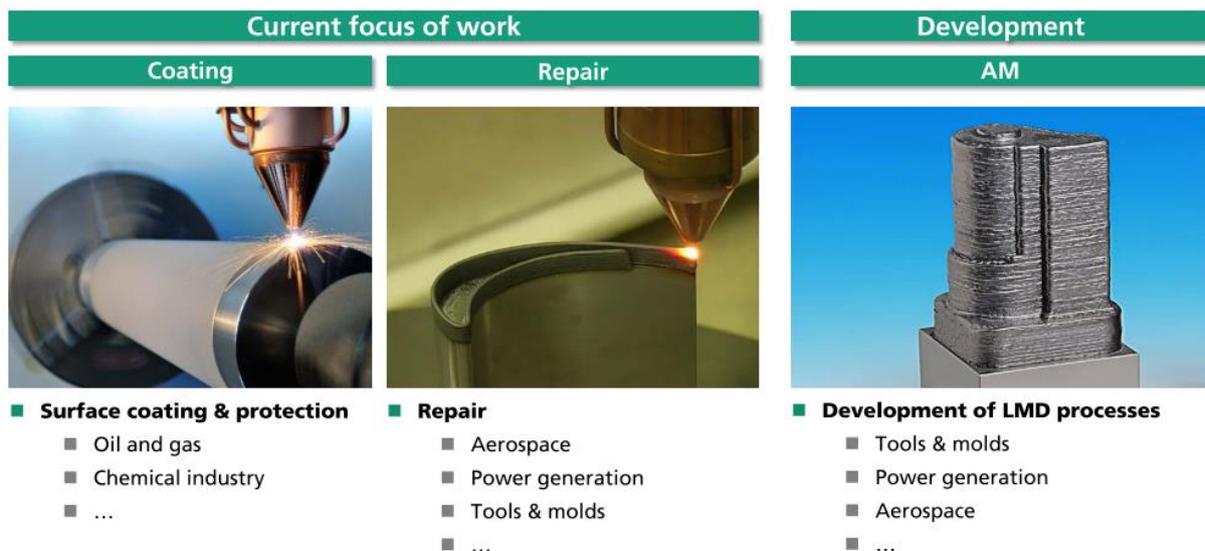


Figura 26: Principales campos de aplicación de la tecnología LMD [17].

En cuanto a las **líneas de investigación actuales**, numerosos estudios apuntan la importancia de los parámetros del proceso en la calidad de la pieza final [10], [19], [22], [23], [24], [25]. Entre estos destacan la potencia del láser, la velocidad de avance, el ratio de deposición del material y la altura de capa. Un control en lazo cerrado de dichos parámetros proporciona unos resultados óptimos desde el punto de vista microestructural y resistente. Asimismo, la atención se está centrando en el desarrollo de nuevos materiales disimilares (LMD-p), para lo cual se realizan estudios por rayos X con el fin de conocer la composición química. Además, se requiere de un conocimiento de la microdureza a lo largo de la altura de la pieza resultante.

Por último, estarían las **futuras líneas de investigación** [10], entre las cuales destaca la necesidad de un modelado del proceso LMD más fiable. La complejidad de los fenómenos físicos como los cambios de fase y los flujos de masa y calor dificultan el modelado del mismo debido al comportamiento no lineal que presentan. A través de un modelado que se ajuste al comportamiento real, se pretende simular el proceso y predecir los resultados finales evitando posibles defectos desde el punto de vista físico, mecánico y tribológico. Por consiguiente, se busca mejorar la repetibilidad productiva estandarizando los parámetros y procedimientos de calibración, con el fin de obtener los mismos resultados sin importar la máquina FA que se disponga.

2.2. Necesidad de Monitorización

El hecho de que haya diversos aspectos que influyen en la calidad final de la pieza, hace que sea necesario un procedimiento de prueba y error para seleccionar los parámetros óptimos del proceso *Laser Metal Deposition* (LMD). Por consiguiente, los ensayos pueden llegar a alargarse, ya que las condiciones supuestas como adecuadas para una previa experimentación sobre una geometría simplificada no siempre son apropiadas para el aporte de la pieza definitiva. Por ello, la mayoría de los autores coinciden en la importancia de una monitorización y control de este proceso [19].

A través de la monitorización y control del proceso LMD se pretende garantizar la estabilidad dimensional, geométrica y térmica de las piezas aportadas. Así, se consigue reducir el número de pruebas de puesta en marcha obteniendo unos elementos con la mínima cantidad de defectos (poros, grietas, inclusiones...) que influyen de manera negativa en las propiedades mecánicas de las piezas resultantes. Aquí, las especificaciones técnicas juegan un papel importante, dado que toda pieza deberá presentar unas características resistentes mínimas para que pueda ser aplicada en la aplicación en cuestión. Siguiendo este argumento, resulta vital la incorporación de controles in situ para controlar el proceso en lazo cerrado y detectar posibles defectos justo en el momento en el que se producen. A pesar de que la mayoría de las máquinas de fabricación aditiva (FA) del mercado presenten una monitorización ya integrada, resulta habitual el tratamiento de las señales de forma offline donde se postprocesan los datos adquiridos a posteriori.

Los dispositivos que se utilizan para la monitorización del LMD suelen ser sin contacto debido a las altas temperaturas y los gradientes térmicos acusados que se dan durante el proceso (Ver 2.4.3). Aunque hay trabajos que analizan las emisiones acústicas del proceso, comúnmente son la radiación reflejada del láser, el plasma o el vapor generado y la radiación infrarroja del material las que se utilizan para la estabilización del proceso través de un control en lazo cerrado.

A modo de resumen, en la Tabla 5 se muestran los distintos tipos de monitorización y control que se pueden llegar a implementar en el proceso LMD, así como el equipamiento necesario, su colocación y el parámetro a controlar en cada caso. Generalmente, la potencia del láser es el parámetro más empleado, aunque también se pueden utilizar la velocidad de avance, la tasa de aporte o una combinación de varios.

Mientras que la monitorización dimensional consiste en el control de la altura de la pieza, la geométrica hace referencia a las distorsiones resultantes de la pieza final. Este aspecto, junto a la microestructura y las tensiones residuales resultantes, está directamente relacionado con los ciclos térmicos que sufre la pieza durante el proceso de aporte del material. Por consiguiente, la monitorización térmica es de vital importancia para la implementación de un control en lazo cerrado que permita obtener piezas tridimensionales que cumplan las especificaciones dimensionales, geométricas y microestructurales del cliente. Para ello, se pueden utilizar instrumentos como pirómetros, cámaras de visión e infrarrojas colocados en posición coaxial o lateral (Ver 2.5.3).

En los siguientes subapartados se presentan los detalles de cada uno de los tipos de monitorización y control que se pueden llegar a implementar. En el primero de ellos, se agrupan la monitorización y control dimensional y la geométrica (Ver 2.2.1). Posteriormente, se pasa a la térmica, en la cual se particulariza para el proceso LMD-w (Ver 2.2.2).

Tabla 5: Tipos de monitorización y control del proceso LMD [19].

Tipo	Equipo / principio	Colocación	Parámetro controlado
Dimensional (Altura de la Pieza)	Cámara de visión	Lateral	Potencia láser Velocidad de avance
	Cámara de visión y proyección láser	Lateral	- Tasa de aporte
		Coaxial	
	Sistema de medida comercial de triangularización	Montaje en cabezal	Tasa de aporte
	Escáner de proyección de patrones	Montaje en cabezal	Compensación de posición del cabezal
	Métodos alternativos	Montaje en cabezal	Tasa de aporte
Coaxial		-	
Geométrica (Distorsiones)	Escáner tridimensional	Externa	Geometría
Térmico	Cámara de visión	Coaxial	Potencia láser -
	Cámara NIR	Coaxial	Potencia láser
		Lateral	-
	Cámara MWIR	Coaxial	-
		Lateral	-
	Cámara LWIR	Lateral	-
Pirómetro	Lateral	Potencia láser -	

2.2.1. Monitorización Dimensional y Geométrica

En cuanto a la estabilidad dimensional y geométrica de la pieza, cabe destacar la importancia de la monitorización y control, especialmente en el caso del proceso LMD-w. Tal y como se ha mencionado anteriormente, esta configuración con el material de aporte en forma de hilo es la más compleja entre las dos alternativas de la tecnología LMD (Figura 21). Esto es debido a los problemas derivados del goteo de material y el enganche del hilo, que requieren de un control de posición en lazo cerrado de parámetros como la potencia del láser, la velocidad de avance, la tasa de aporte controlada por la velocidad de alimentación del hilo y la altura de capas, siendo esta última de vital importancia para la estabilidad dimensional y geométrica de las piezas finales.

En caso de que la altura de capa sea excesiva, sucede el **fenómeno del goteo** por la fundición del material de aporte antes de llegar a la zona de deposición (Figura 27). Esto también puede deberse a una excesiva potencia del láser o una velocidad de avance reducida en comparación con las tasas de aporte. Como resultado, se consiguen unos cordones como los que se muestran en la Figura 29a.

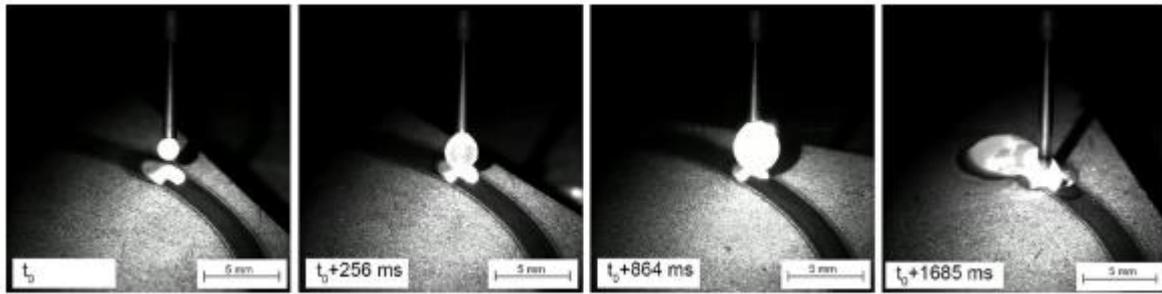


Figura 27: Evolución del fenómeno del goteo de material obtenida con una cámara de alta velocidad durante el proceso LMD-w [26].

Por el contrario, una distancia entre el cabezal y el sustrato menor de la estrictamente necesaria, que sería la altura de capa nominal, provoca la insuficiente fusión del hilo. Esto hace que se generen **fuerzas de rozamiento** o incluso colisiones debidas al **enganche del hilo** (Figura 28). A diferencia del fenómeno del goteo, los sensores de fuerza del cabezal son capaces de detectar esta anomalía parando el proceso como medida de seguridad. También se puede producir el enganche del hilo debido a una potencia del láser insuficiente, una excesiva velocidad de avance y tasas de aporte reducidos o un descentramiento del hilo respecto de láser. En la Figura 29c se muestra un ejemplo de los cordones resultantes.

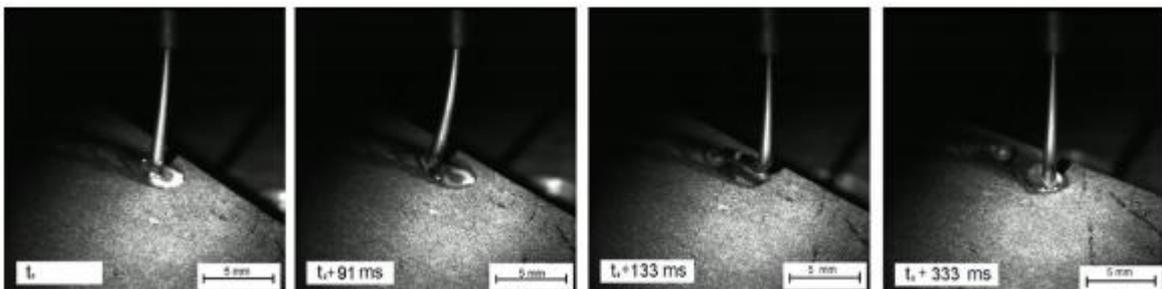


Figura 28: Evolución del fenómeno de rozamiento y enganche del hilo obtenida con una cámara de alta velocidad durante el proceso LMD-w [26].

Por lo tanto, hace falta ajustar los parámetros mencionados por control para conseguir un aporte adecuado (Figura 29, b), y poder así lograr la estabilidad dimensional y geométrica deseada.

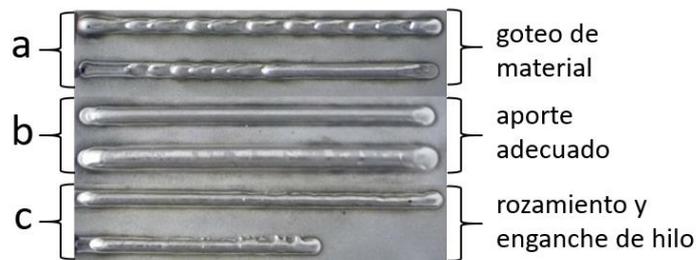


Figura 29: Goteo de material (a), aporte adecuado (b) y rozamiento y enganche de hilo (c) del proceso w-LMD [19].

2.2.2. Monitorización Térmica

En lo que respecta al presente documento, el trabajo se centra en la **monitorización térmica del proceso LMD-w**. Aquí, la temperatura juega un papel importante, ya que determina si el material está siendo fundido correctamente, el grado de dilución que el baño tendrá en el sustrato o la tasa de enfriamiento del material. Asimismo, los ciclos de calentamiento y enfriamiento determinan la microestructura y las distorsiones, así como las tensiones residuales de la pieza resultante. Por consiguiente, se han realizado numerosos estudios con el fin de determinar temperaturas tanto en el baño fundido de la zona de aporte, como en el resto de la pieza (Ver 2.5.3).

A la hora de determinar el sistema de monitorización térmica del proceso LMD, hay que considerar el rango de medida del instrumento, la resolución del sensor, las opciones para el procesamiento de datos, la frecuencia de adquisición alcanzable y el coste del equipo (Ver 2.4.3). Entre los instrumentos que se pueden emplear para la monitorización térmica destacan las cámaras de visión y las cámaras infrarrojas (Ver 2.5.3). También se pueden usar **pirómetros**, pero su campo de visión es mucho menor al tratarse de dispositivos que proporcionan mediciones de temperaturas localizadas (Ver subapartado A.2 de 2.4.3).

En caso de emplear **cámaras de visión**, los valores obtenidos no son de temperatura, sino de luminosidad. Por consiguiente, se requiere de un procesamiento de las imágenes adquiridas con el fin de buscar cierta correspondencia con la temperatura alcanzada en la pieza. Con lo cual, la obtención de temperaturas con este tipo de dispositivos se realiza de forma indirecta, normalmente en una configuración coaxial (on-axis) a través del camino óptico del haz láser en el puerto óptico del cabezal. Para ello, se asigna a cada píxel un valor representado por el número determinado de bits, que puede ser entre 0 y 256 para el caso de 8 bits. Aquí, el valor nulo corresponde al color negro y el máximo al blanco. A través de una operación de binarización posterior, los píxeles son considerados únicamente blancos o negros estableciendo un valor umbral de valor de píxel. Teniendo en cuenta la dirección de aportación, se puede obtener la anchura del baño fundido que precisamente está relacionada con la temperatura. Además de este aspecto, se pueden emplear otros parámetros como el área, la intensidad media dentro del baño, su longitud o las dimensiones de los ejes de una elipse ajustada al contorno del baño fundido para correlar con la temperatura (Figura 30).

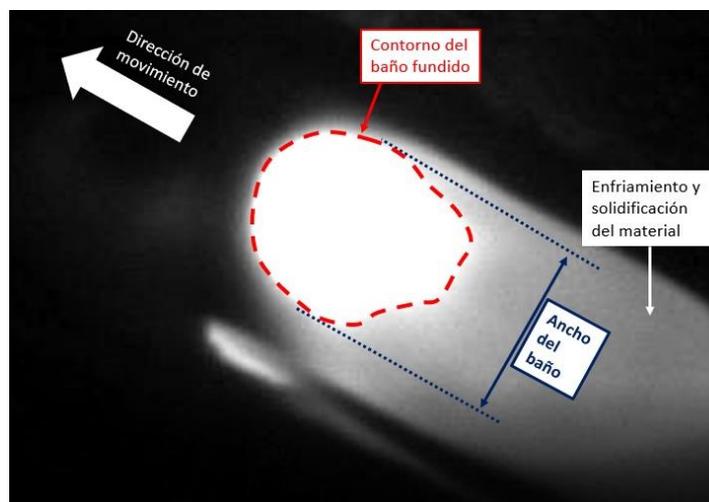


Figura 30: Imagen coaxial del baño fundido y determinación del ancho del baño para relacionar con su temperatura [19].

Por otra parte, están las **cámaras infrarrojas (IR)** que son sensibles a un rango específico dentro del espectro electromagnético. Esto hace que sean clasificadas según el rango en la que operan, entre los cuales se encuentran cámaras termométricas VIS trabajando en el rango visible ($0,38 \div 0,78 \mu\text{m}$), cámaras NIR, SWIR, MWIR y LWIR (Ver subapartado A de 2.3.2).

Los dispositivos radiométricos que trabajan en rangos espectrales de menos longitud de onda como las cámaras VIS y NIR, permiten obtener medidas de temperaturas elevadas en un rango dinámico reducido con resoluciones y frecuencias de adquisición elevadas. Las cámaras SWIR y MWIR en cambio, presentan mayores niveles de sensibilidad gracias a la refrigeración criogénica que disponen. Esto hace que aumente la complejidad de su aplicación, así como el coste. En cuanto a las cámaras LWIR que trabajan en rangos superiores del espectro electromagnético, no suelen disponer de refrigeración interna por la utilización de microbolómetros como sensores en el detector. Consecuentemente, la aplicación de estos dispositivos es mucho más sencilla y presentan menores costes en su inversión. Además, el rango dinámico de las cámaras LWIR es la más amplia pudiendo relajar mediciones de temperaturas tan dispares como las ambientales o del baño fundido. Como contrapartida está la menor resolución y frecuencias de adquisición que presentan.

Comparando todas ellas con las cámaras de visión convencionales, las cámaras IR disponen de un rango dinámico mayor para la realización de las mediciones de temperaturas de forma directa. Consecuentemente, su implementación en un control in situ es mucho más viable que en el caso de las cámaras de visión por la necesidad de procesamiento de imágenes obtenidas para relacionar con la temperatura. Además, las cámaras infrarrojas permiten tener una mejor distribución de temperaturas en el baño fundido, lo cual facilita la caracterización de su forma.

Sin embargo, las cámaras infrarrojas requieren de filtros apropiados para trabajar en el rango espectral deseado, especialmente a la hora de emplear la **configuración coaxial (on-axis)**. A pesar de que se consiga una visión adecuada e independiente con respecto a la dirección del aporte, hay que tener en cuenta el camino óptico que deberá seguir la luz emitida por el proceso, ya que podría contener componentes ópticos intermedios (espejos, ventanas de protección, lentes...) que filtren las emisiones en el rango de medida seleccionado. Eso sí, resulta importante asegurar que la longitud de onda del láser del proceso queda filtrada para evitar que el sensor capture su radiación y se llegue a dañar. Los componentes ópticos dispuestos en el puerto de monitorización son precisamente los encargados de esta función. Aunque podrían emplearse elementos que únicamente filtren la longitud de onda del láser del proceso, habitualmente se emplean filtros pasa-banda que transmiten en el rango espectral deseado. En definitiva, la necesidad de modificar algunos componentes ópticos del cabezal es un aspecto que debe ser considerado a la hora de definir el rango de medida del sistema de monitorización on-axis, dado que la utilización de cámaras IR requiere de filtros específicos.

Alternativamente, se puede optar por una **configuración lateral (off-axis)**, donde el dispositivo en cuestión es incorporado fuera del camino óptico del haz láser, es decir, sin integrar en el puerto óptico del cabezal. Al tratarse de una medida dependiente de la dirección de aporte, aumenta la dificultad de su implementación en un control en lazo cerrado. No obstante, no requiere de modificaciones en los componentes ópticos del cabezal, y es por ello que se usa en la mayoría de las aplicaciones (Ver 2.5.3).

2.3. Principios de Medición de Temperaturas

La **termodinámica** es la ciencia que estudia la transferencia de calor de sistemas reales en base a modelos experimentales. El calor por su parte, está asociada a la energía cinética total de las moléculas que componen la materia, y se expresa en unidades de Julios (J) del sistema internacional (SI).

La **temperatura** en cambio, es la medida de la velocidad media de las moléculas que componen la materia, y se expresa en unidades de Kelvin (K) del SI. A pesar de variar en función de la energía que posee un cuerpo, no se trata de una forma de energía, sino de una consecuencia del mismo. La temperatura que se toma como referencia es el **cero absoluto** en $0 K$, que es el punto teórico donde las moléculas no se mueven.

La medición de temperaturas se basa en la **transferencia de calor** [27], que puede ser debida a un gradiente térmico o la interacción de dos sistemas con distinta temperatura. El proceso persiste hasta alcanzar el equilibrio térmico, es decir, hasta que se igualan las temperaturas, donde las condiciones pueden ser estacionarias o transitorias. En el caso del **estado estacionario**, las condiciones son estables al mantener el gradiente o la diferencia térmica (ΔT) constante en el tiempo; mientras que el **estado transitorio** implica cambios temporales.

En cuanto a la forma en la que se puede producir transferencia de calor, existen tres mecanismos (conducción, convección y radiación), entre los cuales sólo dos se utilizan para la medición de temperaturas: **conducción** (Ver 2.3.1) y **radiación** (Ver 2.3.2). Mientras que el primero requiere de un contacto físico para la transmisión de calor, el segundo lo hace en ausencia de medio material sin necesidad de contacto alguno, es decir, en vacío. Las características de cada uno de estos mecanismos de transferencia de calor son detalladas en los subsiguientes apartados:

2.3.1. Conducción (Por Contacto)

Se trata de una transferencia directa de energía térmica entre moléculas en contacto de cualquier sustancia cuando colisionan entre sí en su movimiento aleatorio. La energía que se transmite entre las moléculas es la cinética, y puede darse entre en cualquiera de los estados de la materia (sólidos, líquidos y gases), siendo la única transferencia de calor que se da en los sólidos.

En condiciones estacionarias, la **energía térmica transferida por conducción** (E_c) se obtiene a partir de la expresión (7), de donde se deduce que es directamente proporcional a la conductividad (k), el área de la sección transversal del flujo de calor (A), la diferencia de temperaturas ($T_1 - T_2$) y el tiempo de exposición a la conducción (t). No obstante, no sucede lo mismo con la longitud característica (L), que dificulta la conducción para mayores valores.

$$E_c = P_c \cdot t = \frac{k \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{L} \cdot t \quad (7)$$

Donde:

P_c : Potencia calorífica, es decir, el flujo de calor por unidad de tiempo (W).

t : Tiempo de transferencia de calor (s).

k : Conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$).

A : Área de la sección transversal del flujo de calor (m^2).

$(T_1 - T_2)$: Diferencia de temperaturas (K).

L : Longitud característica de conducción (m).

Por otra parte, está el concepto del **calor específico**, que expresa la capacidad de un material para almacenar energía térmica. Se trata de la energía térmica requerida para incrementar en un grado kelvin (K) la temperatura de un gramo de material. Además, el calor específico es también una medida de la inercia térmica del material, es decir, repercute en la rapidez con la que reacciona el material ante cambios de temperatura. Esto implica que un cuerpo con un calor específico elevado requiere de más energía para experimentar cambios de temperatura. Dicho de otra forma, cuanto mayor es el calor específico, mayor resistencia al cambio de temperatura se tiene. En la siguiente tabla se muestra la conductividad y el calor específico de algunos materiales más habituales:

Tabla 6: Conductividad y calor específico de algunos materiales [28], [29].

MATERIAL	Conductividad ($W/m \cdot K$)	Calor Específico ($kJ/kg \cdot K$)
Cobre puro	401	0,39
Aluminio puro	237	0,90
Acero	52	0,46
Titanio	21,9	0,52
Aire (en reposo)	0,025	1,00

2.3.2. Radiación (Sin Contacto)

La radiación es definida como la transmisión de calor por emisión y absorción de ondas electromagnéticas (EM), siendo el intercambio neto de calor la diferencia entre lo emitido y absorbido entre los cuerpos con temperatura superior al cero absoluto ($0 K$). En ese caso, cualquier cuerpo emite radiación que es dependiente de la temperatura, y es por ello, que la radiación emitida es denominada como **radiación térmica**. El término **radiación infrarroja (IR)** también es empleado, debido a que la mayor parte de la radiación cae en dicho rango del espectro electromagnético (Ver C.3).

A diferencia de los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, la radiación se propaga en ausencia del medio material en el vacío al tratarse de distorsiones EM. Esto hace que la energía se transmita con facilidad a través de la mayoría de los gases. Sin embargo, el comportamiento ante líquidos y sólidos es completamente distinto, pudiendo llegar a bloquear la transmisión por completo al ser opacos a la radiación, lo cual se ajusta al comportamiento del cuerpo gris (Ver C.3).

Tal y como se muestra en la siguiente tabla, la radiación permite cuatro modos para la transferencia de calor:

Tabla 7: Modos de transferencia de calor por radiación [28].

MODO	DESCRIPCIÓN
Emisión	Radiación recibida
Absorción	Radiación retenida
Reflexión	Radiación que incide sobre una superficie y la devuelve
Transmisión	Radiación que pasa a través del cuerpo

A continuación, se detallan las bases de la radiación infrarroja (IR) empezando por la explicación de **las ondas y el espectro electromagnéticos** (Ver A). Posteriormente, se ahonda en las **bases geométricas de la óptica infrarroja** (Ver B), donde se explican los fenómenos de la reflexión y refracción, así como las correspondientes idealizaciones. En el tercer subapartado, se exponen los detalles de **la radiometría y la radiación térmica** (Ver C), incluyendo información relevante a los cuantificadores radiométricos y las distintas idealizaciones de emisores de radiación. Para terminar, se explica la influencia del parámetro de la **emisividad** (Ver D) junto a las técnicas de medición y los correspondientes errores.

A. Ondas Electromagnéticas y Espectro Electromagnético

Las ondas electromagnéticas (EM) son distorsiones periódicas que mantienen su forma según se propagan en el espacio en función del tiempo. La periodicidad espacial está determinada por la **longitud de onda** (λ), y la temporal por el **periodo de oscilación** (T) que es la inversa de la **frecuencia de oscilación** (f). Ambas están relacionadas con la **velocidad de propagación** (c) de la onda según la siguiente expresión:

$$c = \lambda \cdot f \tag{8}$$

A diferencia de las ondas mecánicas como las del sonido, las electromagnéticas se propagan en el espacio en ausencia de materia, es decir, en vacío. Por ello, su velocidad de propagación es superior, siendo la velocidad de la luz en vacío de $3 \cdot 10^8$ m/s. Además, las ondas mecánicas pueden ser longitudinales o transversales; mientras que, en el caso de las EM, las distorsiones son únicamente de **tipo transversal**. Estas son debidas a la combinación del campo eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}), siendo perpendiculares entre ellas, así como a la dirección de propagación (z) (Figura 31).

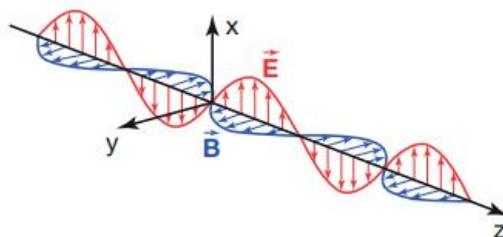


Figura 31: Polarización de las ondas electromagnéticas [30].

La dirección de oscilación queda definida por la **polarización** a través de un plano en el que se da la variación transversal del campo \vec{E} . La mayoría de las fuentes emiten ondas sin polarizar, lo cual significa que las distorsiones pueden tener cualquier orientación en la dirección de propagación. La polarización es posible gracias a reflexiones en superficies o filtros polarizadores, que únicamente permiten la transmisión de las ondas que poseen el campo eléctrico en la dirección perpendicular al mallado (Figura 32). Esto es muy conveniente para evitar posibles reflexiones que pudieran afectar los resultados de un proceso dado.

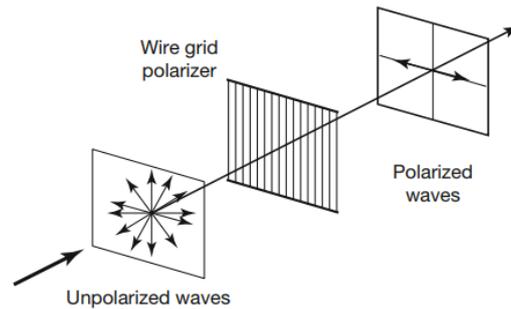


Figura 32: Filtrado de ondas electromagnéticas para polarización [30].

En la siguiente figura se puede apreciar el espectro electromagnético según la frecuencia y la longitud de onda. Cada una de ellas tiene su campo de aplicación, pero en lo que se refiere al presente documento, es la radiación infrarroja (IR) la que mayor importancia tiene para el tratamiento de imágenes térmicas de procesos productivos como el láser y la fabricación aditiva. Cabe mencionar que cualquier cuerpo con temperatura superior a 0 K ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$) emite radiación electromagnética, siendo esta dependiente de la longitud de onda, que al mismo tiempo es función de la temperatura y las propiedades del material.

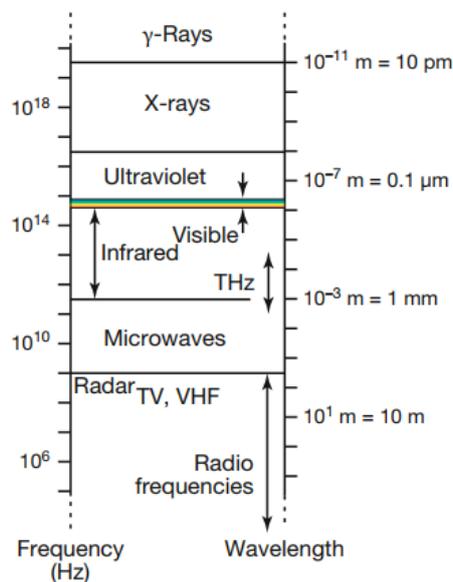


Figura 33: Espectro de ondas electromagnéticas [30].

Para el procesamiento de imágenes térmicas, solo una pequeña parte de las ondas infrarrojas es empleada. Tal y como se muestra en la Figura 34, este rango útil se divide en cuatro según la longitud de onda: *Near Infrared Radiation* (NIR), *Short Wavelength Infrared Radiation* (SWIR), *Mid Wavelength Infrared Radiation* (MWIR) y *Large Wavelength Infrared Radiation* (LWIR).

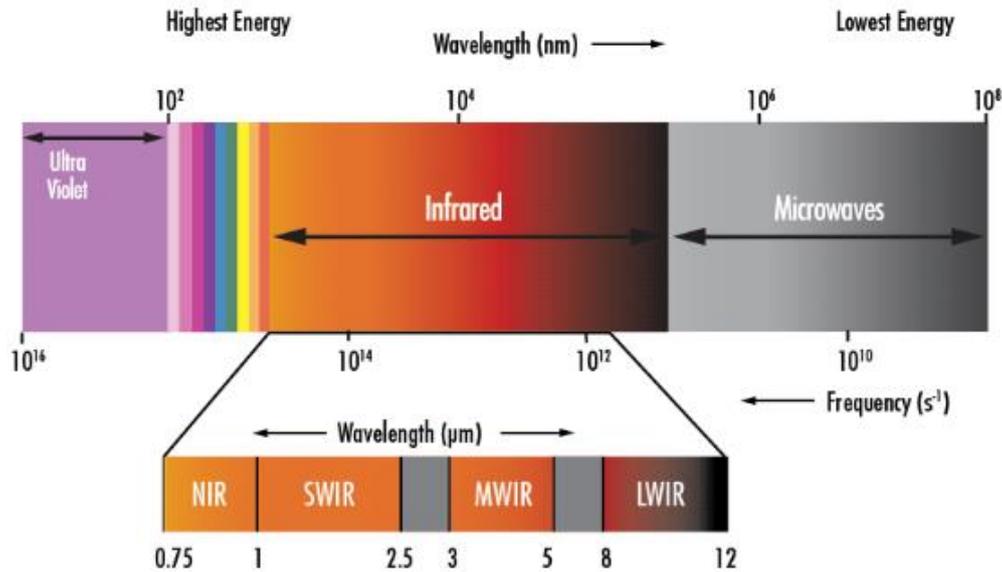


Figura 34: Espectro de luz y denominación de rangos dentro del rango infrarrojo [31].

En la siguiente tabla se muestran las longitudes de onda (λ) de cada una de ellas junto a la visible:

Tabla 8: Longitudes de onda (λ) de cada uno de los rangos del espectro visible e infrarrojo [32].

Rango Espectral	Longitud de Onda (μm)
VIS	0,38 ÷ 0,78
NIR	0,8 ÷ 1,7
SWIR	1 ÷ 2,5
MWIR	2 ÷ 5
LWIR	8 ÷ 14

B. Bases Geométricas de la Óptica Infrarroja

La luz visible y la radiación infrarroja (IR) tienen un comportamiento similar desde el punto de vista geométrico, en el sentido de que se propaga más o menos en líneas rectas. Esto es válido si la longitud de onda es mucho menor que el tamaño del objeto en el que incide el haz.

B.1. Reflexión y Refracción

Las propiedades ópticas de materiales homogéneos están definidas por el índice de refracción (n), que es un número mayor que la unidad para el caso de materiales no absorbentes y complejo para los absorbentes.

La orientación de la radiación incidente queda definida por el ángulo de incidencia (α_1), que establece el valor del ángulo de reflexión (α'_1) según la **ley de reflexiones** en la que se sustenta el funcionamiento de los espejos:

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \tag{9}$$

En cuanto a las refracciones, es la **ley de Snell** la que establece la relación entre la relación entre los ángulos α_1 y α_2 siendo esta última la que forma la luz transmitida por refracción con la normal de la superficie. Para ello, se consideran los índices de refracción n_1 y n_2 de los materiales de origen y destino respectivamente, a través de la siguiente expresión:

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \tag{10}$$

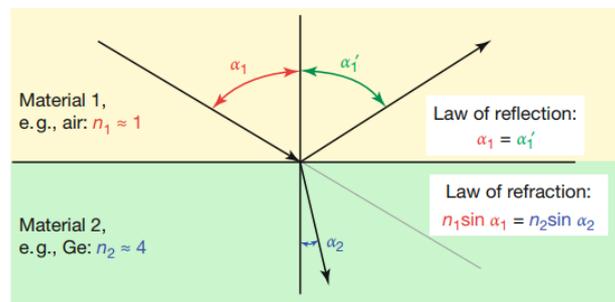


Figura 35: Ley de reflexión y refracción de una radiación IR en aire-Ge [30].

En el siglo *XVII*, Isaac Newton demostró que el índice de refracción (n) de los materiales es dependiente de la longitud de onda (λ), lo cual es aplicable a la radiación IR [30]. Los materiales ópticos presentan una dispersión normal, es decir, n es menor según aumenta λ . Esto implica que la radiación de las longitudes de onda mayores sufre una menor refracción (menor n) que las de menor λ .

B.2. Reflexión Especular y Difusa

Debido al acabado superficial de la superficie en la que incide la radiación, las reflexiones son diferentes. La siguiente figura muestra una superficie de buen acabado (a) en la que la reflexión es especular (direccional), otra con microrugosidad (b) en la que las reflexiones son mayoritariamente especulares y otra con un acabado no tan bueno (c) donde se hace evidente la difusión de las reflexiones.

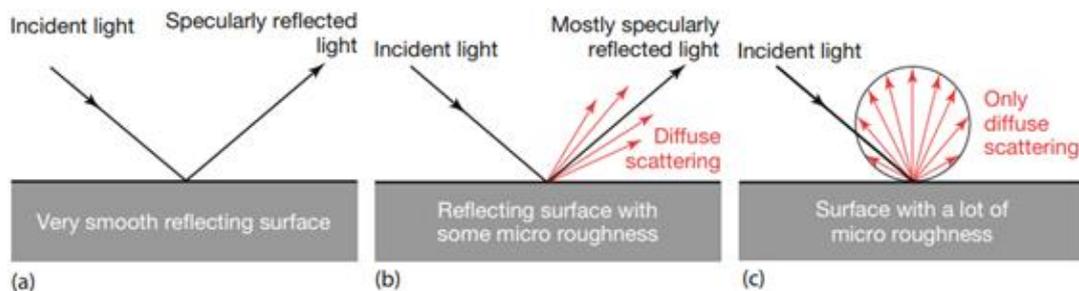


Figura 36: Reflexiones completamente especulares (a), parcialmente especulares (b) y difusas (c) [30].

B.3. Superficie Lambertiana

Dentro de las bases geométricas, está el concepto de la **superficie Lambertiana**, que emite y refleja radiación uniformemente en todo el hemisferio, es decir, las emisiones y reflexiones de una superficie Lambertiana son independientes de la dirección. Se trata de un concepto idealizado, que en la realidad se aproxima mediante el comportamiento de cuerpos negros (Ver C.2) o superficies con difusión perfecta (Figura 37).

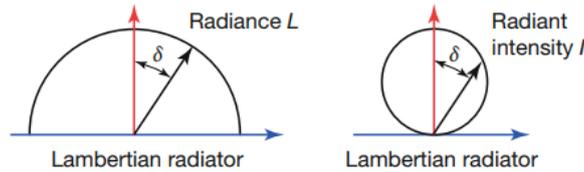


Figura 37: Superficie Lambertiana [30].

Tal y como se puede observar en la Figura 37, la superficie Lambertiana implica una radiancia independiente de la dirección ($L = cte$), lo cual es conveniente en la medición de la radiación a través de instrumentos radiométricos (Ver 2.4.3). Estas detectan la radiación de un objeto en una dirección de medición determinada, que determina el ángulo sólido. En caso de que la superficie de medición sea Lambertiana, la orientación de la cámara IR empleada no tendrá influencia alguna, y la radiación emitida únicamente dependerá de la temperatura. Esto implica que las mediciones realizadas sean de mayor utilidad y precisión. Sin embargo, la mayoría de los objetos reales no presentan un comportamiento Lambertiano, y es necesario el empleo de correcciones dependientes del ángulo de orientación con el que se está realizando la medición.

C. Radiometría y Radiación Térmica

C.1. Cuantificadores Radiométricos

Con el fin de caracterizar la emisión, propagación e irradiancia de cualquier tipo de radiación incluido la radiación térmica, varios cuantificadores radiométricos han sido desarrollados (Tabla 9).

Tabla 9: Revisión de cuantificadores radiométricos [30].

NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDADES SI	DEFINICIÓN
Potencia radiante o Flujo de energía	ϕ	W	Energía total emitida por una superficie
Excitancia, Emitancia o Potencia emisiva	M	W/m^2	Energía emitida por unidad de superficie
Irradiancia	E	W/m^2	Energía recibida por unidad de superficie
Densidad espectral de cualquier parámetro	X_λ	$\frac{\{Unidades\ de\ X\}}{\mu m}$	Energía por unidad de longitud de onda

La energía total que emite la superficie de un cuerpo es denominada como **potencia, potencia radiante** o **flujo de energía** (ϕ). Se expresa en unidades de wattios (W) del Sistema Internacional (SI) de unidades, y solo puede ser medido si se capta toda la radiación que se emite.

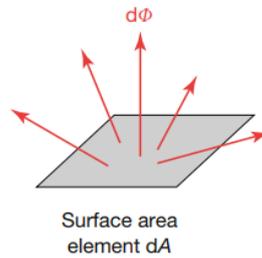


Figura 38: Potencia radiante ($d\phi$) de un diferencial de superficie (dA) [30].

En caso de expresar la potencia radiante ($d\phi$) por unidad de superficie emisora (dA_e), se obtiene la **excitancia** (M), también llamado **emitancia** o **potencia emisiva** que se expresa en unidades de W/m^2 siguiendo la expresión que se muestra a continuación:

$$M = \frac{d\phi}{dA_e} \quad (11)$$

En lugar de hacer referencia a la radiación emitida, si consideramos la incidencia sobre una superficie (dA_i), conseguimos lo que viene a ser la **irradiancia** (E). Obviamente, las unidades de la irradiancia son las mismas que las de la emitancia, pero el correspondiente flujo de energía es recibida o emitida, respectivamente. Esto da lugar a una expresión similar a (11), pero con distinto significado:

$$E = \frac{d\phi}{dA_i} \quad (12)$$

El flujo total de energía (ϕ), la emitancia (M) y la irradiancia (E) hacen referencia a la energía total que se emite o recibe del hemisferio de una superficie. Sin embargo, en la práctica todos los cuantificadores radiométricos son dependientes de la longitud de onda (λ), y es por ello que se emplean densidades espectrales (Figura 39). La **densidad espectral del flujo de energía** (ϕ_λ) se obtiene mediante la siguiente expresión en unidades de W/m del SI:

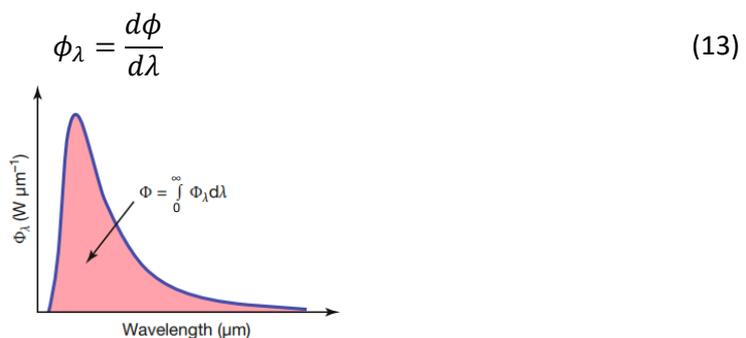


Figura 39: Relación entre el flujo de energía (ϕ) y su densidad espectral (ϕ_λ) [30].

Asimismo, se puede conseguir la densidad espectral del resto de cuantificadores radiométricos (Tabla 9), como es el caso de la **excitancia espectral** (M_λ) o la **irradiancia espectral** (E_λ). Las respectivas expresiones para su cálculo son las que se muestran a continuación:

$$M_\lambda = \frac{d\phi}{dA_e \cdot d\lambda} \quad (14)$$

$$E_\lambda = \frac{d\phi}{dA_i \cdot d\lambda} \quad (15)$$

C.2. Radiación del Cuerpo Negro

El **cuerpo negro** (*black body*) es un emisor y receptor de radiación térmica ideal, que se toma como referencia para la cuantificación radiométrica. Cuando una radiación incide sobre un cuerpo negro, toda la energía es absorbida independientemente de la longitud de onda y la distribución de la emisión. Además, se trata de un cuerpo que emite la mayor cantidad de radiación térmica posible. En los materiales reales en cambio, no sucede lo mismo debido a la influencia de la emisividad (Ver D).

La emitancia espectral (M_λ) de un cuerpo negro en equilibrio termodinámico, que es la radiación electromagnética emitida a una temperatura definida en función de la longitud de onda, está determinada por la **Ley de Planck** con la siguiente expresión [30]:

$$M_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \quad (16)$$

Donde:

h : Constante de Planck ($J \cdot s$) de valor $6,6262 \cdot 10^{-34} J \cdot s$.

c : Velocidad de la luz (m/s), siendo $c = \frac{c_0}{n} = 2,997 \cdot 10^8 m/s$ para el aire ($n = 1$).

λ : Longitud de onda de la radiación (μm).

T : Temperatura del cuerpo negro (K).

k : Constante de Boltzmann (J/K), donde $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ para el aire.

Siendo:

R : Constante de gases ideales.

N_A : Número de Avogadro.

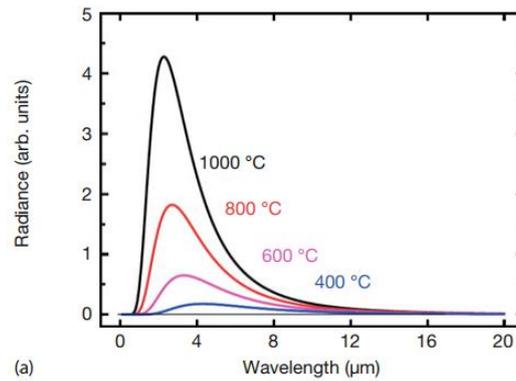


Figura 40: Radiancia de cuerpos negros con temperaturas entre 400-1000 °C [30].

En base a la Figura 40, se puede llegar a la conclusión de que cuanto mayor sea la temperatura, mayor es la radiación emitida por el cuerpo negro. Además, la región espectral es dependiente de la temperatura, es decir, temperaturas bajas proporcionan mayores longitudes de onda que las temperaturas elevadas. Las resistencias eléctricas, por ejemplo, se ponen rojas a altas temperaturas porque la radiación que emiten es de una longitud de onda tan corta, que entra dentro del espectro de luz roja visible.

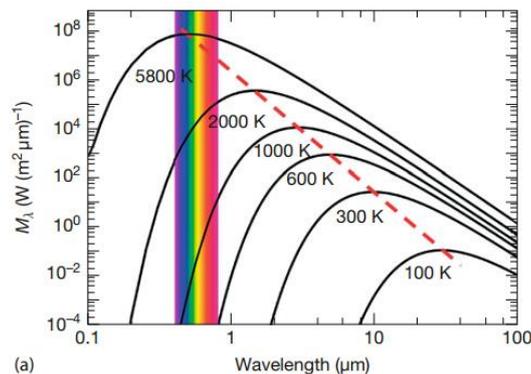


Figura 41: Radiancia de cuerpos negros con temperaturas entre 100-5.800 K en escala logarítmica [30].

El valor de la longitud de onda que corresponde al máximo de la emitancia espectral (M_λ) viene definida por la primera **Ley de Wien** estableciendo la condición $dM_\lambda(T) / d\lambda = 0$, a partir del cual se observa la linealidad (17) de los máximos al realizar una representación en escala logarítmica como en la gráfica de la Figura 41:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.897,8 \mu m \cdot K \quad (17)$$

En la literatura se pueden encontrar otras expresiones de la ley de Planck (16) y Wien (17) en función de la frecuencia de excitación (ν), que dan lugar a distribuciones de M_λ completamente distintas con máximos en otro rango del espectro para la misma temperatura. Esto es debido a la no linealidad de las ecuaciones dependientes de $d\lambda$ y $d\nu$, respectivamente. Por ello, la especificación de la distribución empleada resulta necesario a la hora de determinar el máximo valor de la radiación.

Por otra parte, la cantidad total de radiación emitida por el cuerpo negro queda determinada por la **Ley de Stefan-Boltzmann** a través de la superficie que delimita la curva (16) de la emitancia espectral (M_λ) de Planck (Figura 42), y únicamente es dependiente de la temperatura según la siguiente expresión:

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_\lambda(T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (18)$$

Donde:

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($Wm^{-2}K^{-4}$) de valor $5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.

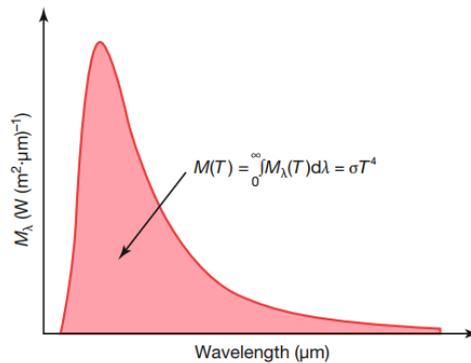


Figura 42: Ley de Stefan-Boltzmann para el cálculo de la emitancia [30].

En procesamiento de imágenes IR, resulta inviable la detección de todo el espectro de la radiación, y se emplea un rango en función de las características del detector, así como las propiedades del material y la atmósfera. Por ello, se emplea una función $F_{(0 \rightarrow \lambda)}$ con la expresión (19) a partir de la Ley de Stefan-Boltzmann (18), donde se define la fracción de la radiación del cuerpo negro en el intervalo espectral de 0 a λ comparando con la emisión total de 0 a ∞ (Figura 43).

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \frac{\int_0^\lambda M_\lambda(T) d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda} \quad (19)$$

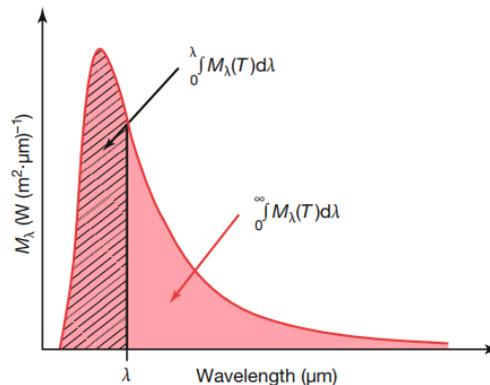


Figura 43: Fracción de la radiación emitida en una banda espectral [30].

Un análisis matemático demuestra que la expresión (19) únicamente es dependiente del parámetro $\lambda \cdot T$, lo cual es conveniente a la hora de representar gráficamente tal y como se puede observar en la Figura 44. De esta forma, resulta sencillo establecer la fracción de la radiación emitida en un intervalo entre dos longitudes de onda con (20):

$$F_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = F_{(0 \rightarrow \lambda_2)} - F_{(0 \rightarrow \lambda_1)} \quad (20)$$

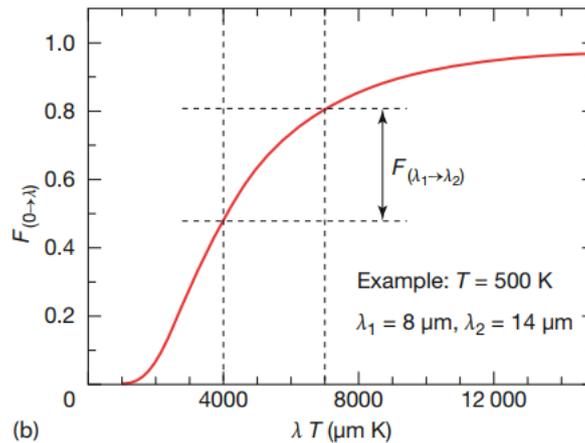


Figura 44: Fracción de la radiación emitida en función de $\lambda \cdot T$ en un intervalo espectral (λ_1, λ_2) [30].

En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de las fracciones de la radiancia para los espectros de radiación visible e infrarroja a distintas temperaturas. Se observa cómo la fracción aumenta en el rango de SWIR para temperaturas elevadas, mientras que para temperaturas inferiores lo hace en el rango LWIR.

Tabla 10: Ejemplos de bandas de emisión [30].

T (K)	VIS $F_{0,38 \rightarrow 0,78 \mu m}$	SWIR $F_{0,9 \rightarrow 1,7 \mu m}$	MWIR $F_{3 \rightarrow 5 \mu m}$	LWIR $F_{8 \rightarrow 14 \mu m}$
300	$\approx 10^{-22}$	$\approx 3 \cdot 10^{-9}$	$\approx 1,3 \cdot 10^{-2}$	$\approx 37,6 \cdot 10^{-2}$
500	$\approx 10^{-12}$	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 14,9 \cdot 10^{-2}$	$\approx 32,7 \cdot 10^{-2}$
2800	$\approx 9,9 \cdot 10^{-2}$	$\approx 43,6 \cdot 10^{-2}$	$\approx 9,2 \cdot 10^{-2}$	$\approx 0,84 \cdot 10^{-2}$

C.3. Radiación del Cuerpo Gris

Por otra parte, está el concepto del **cuerpo gris (grey body)**, que al igual que el cuerpo negro, se trata de otra idealización del comportamiento real de los materiales. En este caso, la capacidad de emitir y absorber la radiación no es la máxima posible, pero sí constantes en todo el espectro (Figura 45, Izq.). Consecuentemente, la emitancia (M) o irradiancia (E) de un cuerpo gris representa una fracción que supondría el cuerpo negro (Figura 45, Drcha.). Por consiguiente, su comportamiento es independiente con respecto a la temperatura, además de la longitud de onda de la radiación incidente [33].

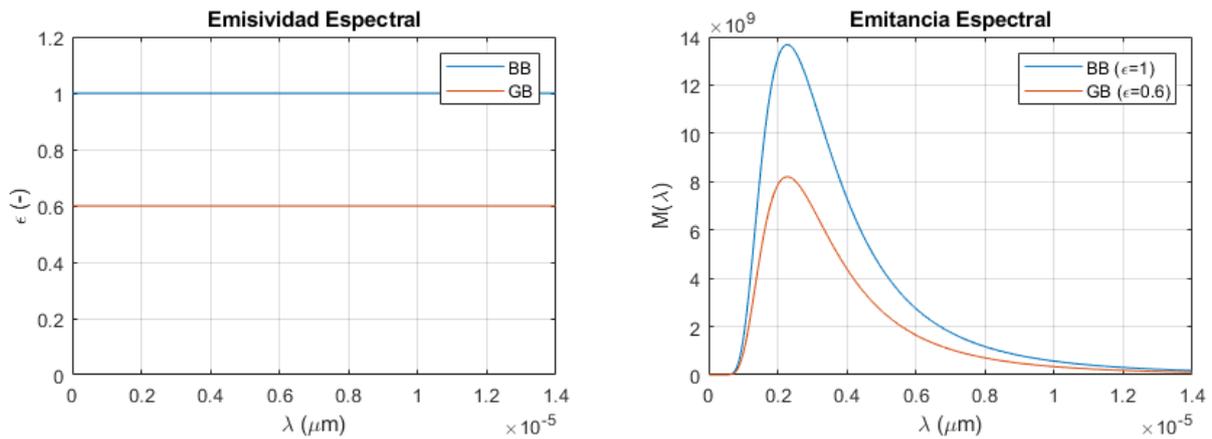


Figura 45: Emitancia espectral del cuerpo negro (Azul) y el cuerpo gris ($\epsilon = 0,6$) (Naranja) a 1.000 °C.

A pesar de que se trata de una idealización, el cuerpo gris es un emisor de radiación imperfecto, ya que sólo es capaz de emitir y absorber una fracción del máximo de lo que es capaz el cuerpo negro perfecto. Sin embargo, sirve para formular ciertas simplificaciones que han sido adoptadas en el presente trabajo (Ver 3.1) basado en el trabajo de otros autores (Ver 2.5). En la siguiente tabla se muestran las principales diferencias entre el cuerpo gris y el cuerpo negro:

Tabla 11: Diferencias entre el cuerpo negro y el cuerpo gris [33].

	CUERPO NEGRO	CUERPO GRIS
Definición	Objeto físico idealizado que puede absorber toda la radiación electromagnética que incide sobre él	Objeto físico imperfecto que emite radiación constante en todo el espectro, siempre inferior al máximo posible
Concepto	Idealización perfecta	Idealización imperfecta
Absorción	Toda la radiación incidente	Parte de la radiación incidente
Emisión	Toda la radiación posible	Parte de la radiación absorbida

En cuanto a la radiación total emitida por el cuerpo gris, hace falta adaptar la fórmula (18) de Stefan-Boltzmann con el concepto de la emisividad (ϵ) que será abordado en el subapartado D. Tal y como se observa en la siguiente expresión, se trata de un coeficiente de aminoración que influye por igual en todo el espectro y el rango de temperaturas:

$$M(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{21}$$

C.4. Radiación del Cuerpo Real

En realidad, el comportamiento de los objetos no se ajusta a ninguna de las idealizaciones anteriormente planteadas, ya que el cuerpo real es un **emisor selectivo** que radia y absorbe energía en forma de radiación de manera diferente a lo largo del espectro, es decir, es dependiente de la longitud de onda. A modo de comparación, en la Figura 46 se muestran las emisividades (a) y radiancias espectrales (b) para el caso de distintos emisores de radiación:

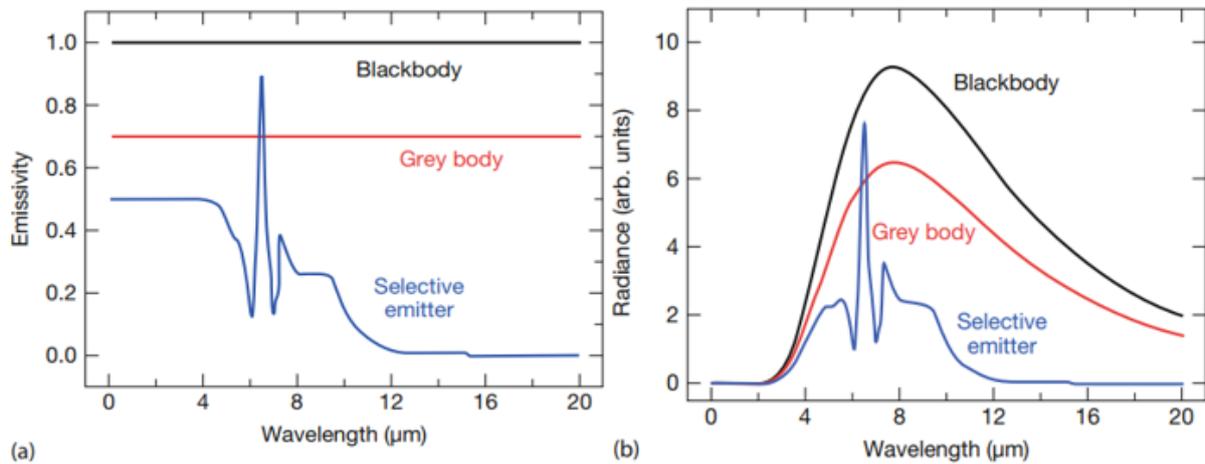


Figura 46: Emisividad (a) y radiancia (b) espectral de distintos emisores de radiación [30].

Esto pone en evidencia la dependencia de la emisividad con respecto a la longitud de onda, además de otros parámetros que se detallan en el subapartado D.1. Por consiguiente, la ley de Stefan-Boltzmann toma la siguiente forma para el caso de los cuerpos reales con comportamiento de emisor selectivo:

$$M(T) = \varepsilon(\lambda, T, \theta) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (22)$$

Donde:

$\varepsilon(\lambda, T, \theta)$: Emisividad espectral.

Siendo:

λ : Longitud de onda (μm).

T : Temperatura (K).

θ : Dirección de observación (rad).

D. Emisividad

La emisividad (ε) es el ratio de la radiación que emite la superficie de un objeto real con respecto a la que emitiría el cuerpo negro a la misma temperatura. Se trata de un coeficiente ($0 < \varepsilon < 1$) que se puede expresar de distintas formas dependiendo del parámetro que se emplee para cuantificar la radiación (Ver C.1). Una muy habitual es en función de la emitancia (M) según la siguiente expresión:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_{BB}(\lambda, T)} \quad (23)$$

Para la mayoría de las aplicaciones termográficas, la emisividad es independiente de la longitud de onda asemejándose al comportamiento del cuerpo gris (Ver C.3). Cuando se tienen bandas de absorción y emisión en el rango espectral infrarrojo (IR), el comportamiento se asemeja más a un emisor selectivo (Ver C.4), lo cual complica la cuantificación analítica de la radiación.

Según la **Ley de Kirchhoff** (24), la capacidad de un cuerpo para absorber energía en forma de radiación incidente que es la **absortividad** (α), siempre coincide con su capacidad para emitir su propia energía como radiación que es la **emisividad** (ε). En otras palabras, la radiación que un cuerpo emite es igual a la que absorbe, lo cual se escribe de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \alpha \quad (24)$$

Por otra parte, la **conservación de energía** (25) implica que toda radiación que incide sobre una superficie (ϕ_0) ha de ser reflejada (ϕ_R), transmitida (ϕ_T) o absorbida (ϕ_A).

$$\phi_0 = \phi_R + \phi_T + \phi_A \quad (25)$$

Representando en fracciones de la radiación incidente (ϕ_0), la ecuación (25) se puede expresar de la siguiente forma:

$$1 = \rho + \tau + \alpha \quad (26)$$

Donde:

ρ : Reflexividad, que es la capacidad de una superficie para reflejar la radiación incidente.

τ : Transmisividad, que es la capacidad de un cuerpo para que la radiación la atraviese.

α : Absortividad, que es la capacidad de un cuerpo para absorber la radiación incidente.

Teniendo en cuenta las ecuaciones (24) y (26), se establece que la emisividad es el valor complementario de la fracción reflejada (ρ) para el caso de **materiales opacos** (cuerpo gris) a la radiación infrarroja ($\tau = 0$):

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (27)$$

Cabe destacar que la fracción ρ incluye tanto las reflexiones especulares como las difusas que se dan al incidir sobre una superficie con una rugosidad determinada (Ver D.1). En el caso de superficies pulidas de muy buen acabado, por ejemplo, el valor de la emisividad es muy reducido (<0.01) debido al comportamiento direccional de las reflexiones. En superficies rugosas en cambio, se da una difusión de las reflexiones, lo cual aumenta la emisividad hasta el 90%.

Dicho esto, en la siguiente tabla se muestran los distintos valores de las fracciones para algunas idealizaciones de comportamiento:

Tabla 12: Fracciones de comportamientos idealizados [28].

	Emisividad (ϵ)	Reflexividad (ρ)	Transmisividad (τ)
Cuerpo Negro	1	0	0
Espejo Perfecto	0	1	0
Cuerpo Transparente	0	0	1
Cuerpo Opaco	-	-	0

D.1. Parámetros Influyentes de la Emisividad

Entre los parámetros influyentes de la emisividad destacan los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13: Parámetros influyentes de la emisividad [30].

Propiedades Intrínsecas	Variaciones de Otros Parámetros
Material	Geometría
Acabado Superficial	Longitud de Onda
Dirección de Observación	Temperatura

El **material** juega un papel importante en el comportamiento de la emisividad, y es por ello que una clasificación de materiales metálicos y no metálicos es habitual. Los materiales no metálicos como los cerámicos y polímeros tienen un comportamiento que se asemeja a cuerpos grises (Ver C.3) con una emisividad superior al 0,8. Por el contrario, los metales presentan una emisividad reducida que muchas veces suele estar por debajo del 0,2.

Para un determinado material la emisividad puede variar en función del **acabado superficial**, lo cual es más acusado en el caso de los metales. Dentro de los procesos LMD de fabricación aditiva, por ejemplo, piezas metálicas con un buen acabado como son las obtenidas por hilo (LMD-w), pueden llegar a tener una emisividad tan baja como 0,02; mientras otras de peor rugosidad obtenidas por polvo metálico (LMD-p), puede alcanzar valores en torno a 0,8. Esto implica que el proceso de fabricación que ha sido empleado para obtener la pieza en cuestión juega un papel importante a la hora de determinar el valor de la emisividad. El estado de conservación es otro aspecto a considerar, dado que la oxidación y corrosión también puede aumentar sustancialmente la emisividad de las piezas metálicas, especialmente a temperaturas elevadas (Ver 2.4.2). En el caso de procesos de fabricación aditiva (FA), se procura trabajar en vacío o con atmósferas inertes con el fin evitar estos fenómenos. Para ello, se establece un límite de concentración de oxígeno (O_2) dependiendo del material a procesar haciendo uso de equipamientos integrados en la propia máquina FA o incorporados de forma adicional con bolsas o compartimentos herméticos. Para la aleación Ti_6Al_4V , concentraciones de O_2 por debajo de 20 ppm mantienen los niveles de óxidos en niveles aceptable para piezas aportadas por LMD [19].

Por otra parte, está la **direccionalidad de la emisión y observación** que, en el caso de un cuerpo negro, la radiación es isótropa presentando un comportamiento Lambertiano (Ver B.3), pero los cuerpos reales presentan un comportamiento anisótropo dependiente de la dirección. En la Figura 47 se muestra la diferencia entre el comportamiento independiente del cuerpo negro y dependiente de una superficie real en la dirección de la radiación.

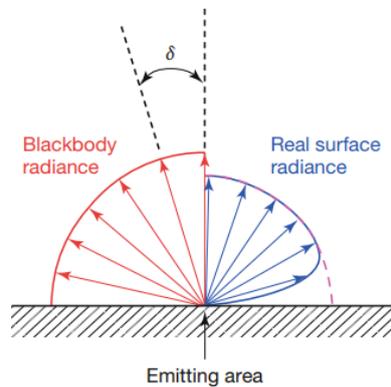


Figura 47: Comportamiento independiente de la emisividad del cuerpo negro (Izq. en rojo) y dependiente de una superficie real (Dcha. en azul) [30].

Esto juega un papel importante en la medición de la temperatura mediante dispositivos sin contacto como pueden ser los pirómetros y las cámaras termométricas (Ver 2.4.3), ya que una medición en la dirección normal a la superficie ($\delta = 0^\circ$) proporciona un valor más elevado de la temperatura que otra a un determinado ángulo de inclinación. Por ello, resulta habitual la realización de ensayos como los que se muestran en la Figura 48, donde se hace variar la orientación del objeto con respecto a la fuente de adquisición (a). La temperatura real de la superficie puede ser obtenida a través de instrumentos por contacto, lo cual proporciona un valor fiable de la emisividad en la dirección normal. Ajustando el valor de ε por software considerando el diagrama polar obtenido (b), se consigue ajustar la lectura a la temperatura real en función de la dirección de observación (Ver D.2).

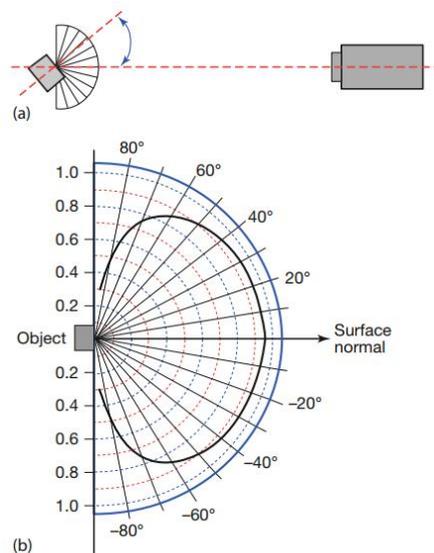


Figura 48: Ensayo de direccionalidad de observación rotando el objeto (a) y el diagrama polar de los resultados (b) [30].

A partir de la siguiente figura, se puede decir que la emisividad es prácticamente constante hasta los 40° o 45° para cualquier material. Sin embargo, a partir de ahí el comportamiento es distinto dependiendo del material. En el caso de los materiales no conductores, se aprecia un descenso de la emisividad, mientras que los conductores aumentan de valor hasta un máximo seguido de un descenso más acusado.

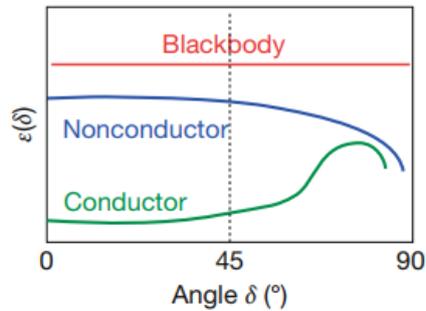


Figura 49: Dependencia direccional de observación en la emisividad para distintos materiales [30].

Además, está la **geometría** del objeto, como pueden ser las ranuras, que mejoran la emisividad en la dirección normal de la superficie macroscópica. Tal y como se puede apreciar en la Figura 50, la emisividad de las ranuras tiene tres contribuciones (Izq.) que hacen variar la emisividad de forma más abrupta (Drcha.):

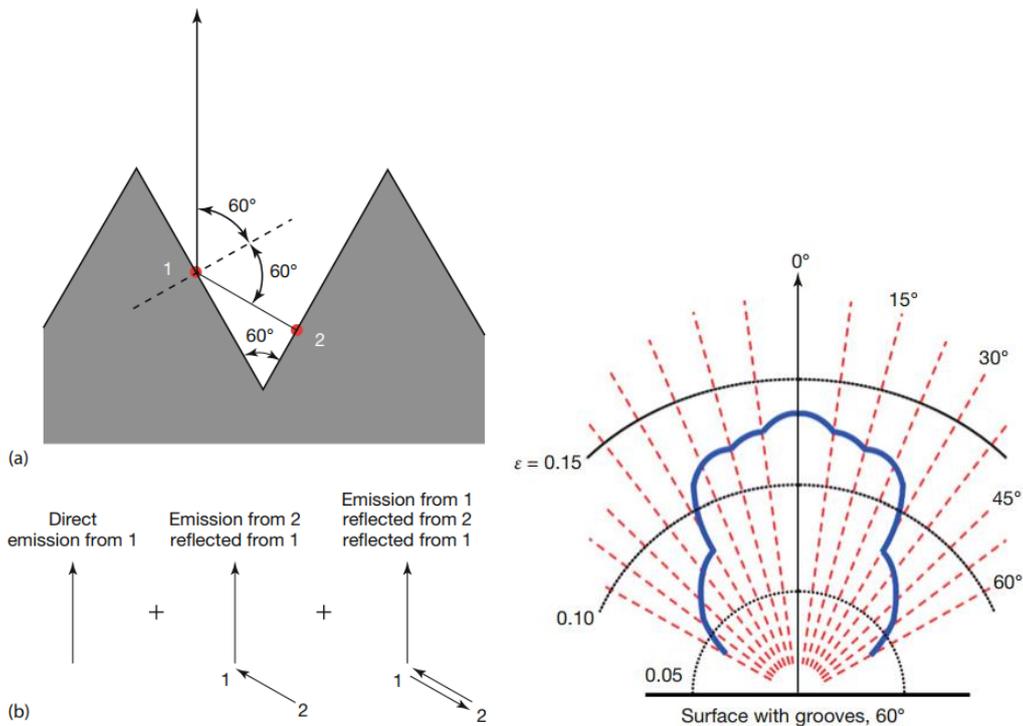


Figura 50: (Izq.) Influencia de las ranuras en la emisividad (a) y las contribuciones (b); (Drcha.) Distribución de la emisividad en una superficie con ranuras de 60° [30].

En cuanto a la **longitud de onda** (λ), es sabido que las propiedades ópticas de los materiales son dependientes de este parámetro. Tal y como se ha visto en la introducción de este apartado, la emisividad de cuerpos opacos está directamente relacionada con las reflexiones según la expresión (27), y si estas dependen de la longitud de onda, la emisividad también. En este sentido, resulta difícil determinar el valor de la emisividad con respecto a λ , especialmente en metales fundidos (Ver 2.4). Por consiguiente, la mayoría de los datos que se pueden encontrar en la literatura corresponden a materiales en estado sólido (Figura 51).

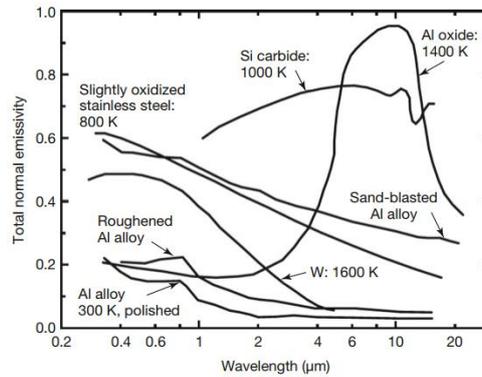


Figura 51: Dependencia de la emisividad de distintos materiales con respecto a la longitud de onda [30].

Siempre que haya una dependencia entre ε y λ , hay que saber si la emisividad es constante en el rango espectral del instrumento radiométrico que se está usando. En caso de que no lo sea, se utilizan filtros paso-banda o incluso se trabaja en otro rango de longitud de onda donde la emisividad sea prácticamente constante. Si esto no es posible, hay que tener en cuenta el aumento de la complejidad del análisis cuantitativo, debido a la necesidad de conocer la variación de la emisividad en la evaluación de la señal adquirida.

Por último, está la **temperatura** (T), que al igual que la longitud de onda, influye en las propiedades del material, así como en la emisividad (Figura 52). En la práctica, resulta necesario el control de la temperatura en un rango esperado con el fin de mantener la emisividad maso o menos constante por la misma razón que la argumentada anteriormente para λ . Cabe destacar la variación de comportamiento de la emisividad que se da en los cambios de fase (Ver 2.4.1), lo cual es muy habitual en la monitorización de muchos procesos de fabricación por láser como la fabricación aditiva LMD.

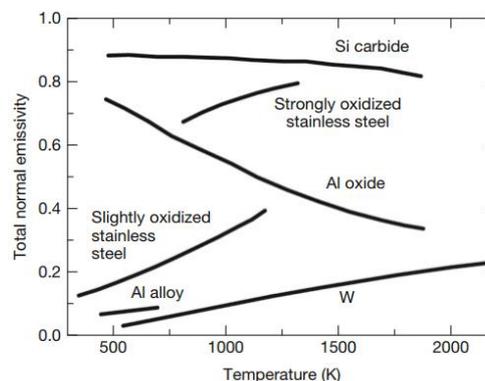


Figura 52: Dependencia de la emisividad de distintos materiales con respecto a la temperatura [30].

En la siguiente tabla se muestran valores de la emisividad para alguno de los materiales más empleados en los procesos productivos de la industria:

Tabla 14: Valores de emisividad (ϵ) para algunos materiales según el estado y la temperatura [34].

Material	Estado / Tipo	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Emisividad (ϵ)	
Acero	Oxidado	25	0,800	
		200	0,790	
		600	0,570	
	Sin oxidar	100	0,080	
	Fundido	1500 – 1650	0,420 – 0,530	
	Fundido sin oxidar		0,280	
Acero Inoxidable	Allegheny metal No. 4/66	100	0,110 – 0,130	
	18 – 8	Pulido	20	0,160
			371	0,190
		Oxidado	93 – 371	0,830
	303	Oxidado	1.093	0,870
Aluminio	Pulido	100	0,095	
	Sin oxidar	25	0,022	
		100	0,028	
		500	0,060	
	Oxidado	200	0,110	
		600	0,190	
Hierro	Oxidado de fundición	200 – 600	0,640 – 0,780	
	Fuertemente oxidado	40	0,950	
		250	0,950	
	Sin oxidar	100	0,210	
	Pulido	200	0,210	
Inconel	Tipo X		0,550 – 0,780	
	Tipo B	450 – 1620	0,350 – 0,550	
Nickel	Pulido	Bajo	0,120	
		1.204	0,320	
	Oxidado	200	0,370	
		1.200	0,850	
	Sin oxidar	25	0,045	
		100	0,060	
500		0,120		
Titanio	Sólido sin oxidar		0,630	
	Líquido		0,650	
	Óxido de Titanio	* $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$	0,500	
	Ti ₆ Al ₄ V	*VIS	0,250 – 0,350	
	*LWIR	0,450 – 0,550		

D.2. Técnicas de Medición y Ajuste de la Emisividad

En la práctica, resulta habitual la medición de la emisividad (ε) de forma indirecta, donde se trabaja con la emisividad normal media (ε_{nm}) integrando en la longitud de onda del instrumento radiométrico seleccionado. Aunque es posible encontrar tablas de emisividad para algunos materiales [34], la emisividad de los metales suele darse de forma cualitativa, lo cual no resulta conveniente a la hora de determinar la temperatura de una superficie. Por ello, se han desarrollado distintas técnicas para la medición y ajuste de ε [30], [35]–[38]:

Uno de los procedimientos más sencillos es el **método de la emisividad de referencia**, que consiste en la adhesión de una cinta o pintura de una emisividad conocida (ε_0) al objeto de estudio. Para ello, se asume un buen contacto y estabilidad térmica hasta que se da el equilibrio termodinámico. Así, la emisividad del cuerpo es determinada mediante la variación de ε por software, hasta que la lectura de la temperatura es igual a la de la superficie de referencia en cuestión. Cabe destacar, que la precisión de este método depende de la incertidumbre de ε_0 , tal y como detallan Barreira et al. en [38].

Una alternativa habitualmente empleada sería el **método de contacto** a través de la calibración de imágenes IR con termopares. Para ello, se sigue el mismo procedimiento tomando como referencia la temperatura en varios puntos de la superficie con instrumentos por contacto como los termopares. En este caso, hay que garantizar que la incorporación de los dispositivos por contacto no altera la temperatura del objeto a analizar mediante la transmisión de calor por conducción, además de las condiciones de contacto y estabilidad térmica anteriormente mencionadas. La principal desventaja de este método sería el coste operacional en términos de tiempo, especialmente en el caso de analizar distintos materiales.

Otra opción sería la del **método del taladrado de agujeros**, donde se crea una cavidad de una emisividad elevada para la lectura correcta de la temperatura. Para ello, la profundidad de la cavidad ha de ser tres veces superior al diámetro del agujero como mínimo. La estimación de ε se realiza a través de la lectura de las regiones adyacentes, presentando un comportamiento independiente de la integridad superficial. Como punto negativo destaca que se trata del único método destructivo para la medición y ajuste de la emisividad.

En el caso de la monitorización del proceso *Laser Metal Deposition* (LMD), así como el resto de los métodos de fabricación de la industria, la temperatura en la zona de trabajo es muchas veces superior a 1.500 °C. Además, puede haber cambios de fase del material durante el proceso, tal y como sucede en el baño fundido del LMD. Todo ello hace que los métodos hasta ahora mencionados no sean viables y se tenga que optar por alternativas sin contacto para la estimación de la emisividad. Los **pirómetros de dos colores** (Ver subapartado A.3 de 2.4.3) son una solución razonable por la mayor precisión que suponen en comparación con las cámaras termométricas. Sin embargo, la lectura de dicho dispositivo está fuertemente influenciado por el plasma y los gases que se generan durante el aporte y, por consiguiente, proporcionan mediciones de temperatura con mayor incertidumbre que los termopares por contacto. Alternativamente, cabe la posibilidad de realizar un **análisis espectroscópico** para obtener la emisividad de una superficie [39]. Para ello, se hace uso de un espectrómetro FTIR, que es un dispositivo óptico que se encarga de hacer la medición y descomposición de la luz en función de la longitud de la onda. Se trata de una técnica específica, que requiere de una inversión elevada en materia de equipamiento y mantenimiento [40].

D.3. Errores de la Emisividad

A pesar de no aprovechar todo el flujo de energía de radiación, como regla general, se recomienda la utilización de instrumentos radiométricos, bien sean pirómetros o cámaras IR, que trabajan en longitudes de onda reducidas (SWIR) debido a la menor influencia de la emisividad. Sin embargo, no suele ser el caso en condiciones ambientales donde haya perturbaciones de luz, o se necesiten mayores rangos espectrales para la aplicación en cuestión. Lo que está claro, es que una correcta selección de la banda espectral puede llegar a reducir los errores en la medición de temperatura. Siguiendo el razonamiento de [41], en la Figura 53 se muestran las desviaciones de temperatura según la expresión (28) al realizar la medición con un pirómetro en diferentes rangos espectrales, donde el valor de la emisividad se ha establecido arbitrariamente en 0,1 en cualquiera de los casos:

$$\frac{\Delta T_O}{T_O} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\lambda_{eff}}{c_2} \cdot T_O \quad (28)$$

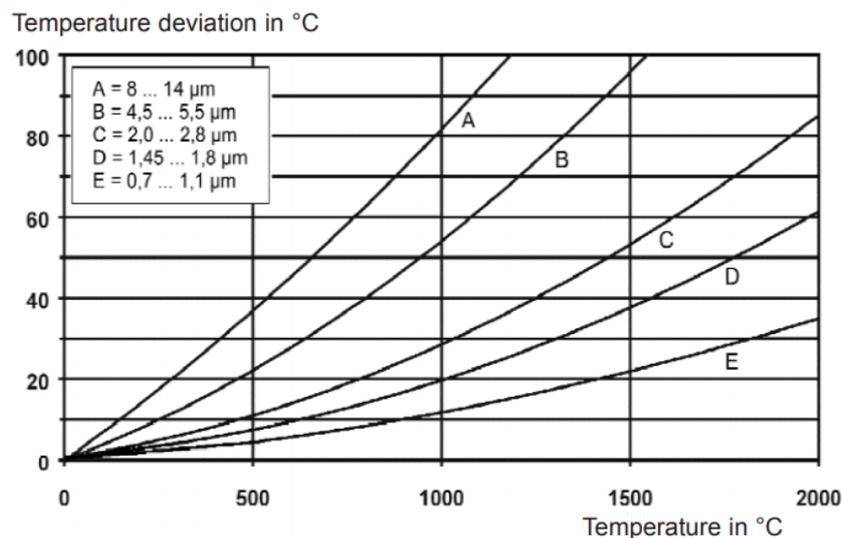


Figura 53: Desviaciones en temperatura de pirómetros de distinto rango espectral con $\varepsilon = 0,1$ [39].

En el caso de los **metales**, la emisividad aumenta para longitudes de onda menores, lo cual previene los errores de medición que han sido anteriormente mencionados. En la referencia [39], se estima un error del 6% en el ajuste del coeficiente de emisividad para la medición de los metales en el rango SWIR, mientras que puede llegar a ser del 50% en LWIR. Además, la variación de la emisividad de los materiales metálicos supone un reto en la medición de temperaturas de los procesos de fabricación como el LMD, que es objeto de estudio de este trabajo. En estos casos, se recomienda el empleo de pirómetros de dos colores, que realizan la medición de la temperatura en dos rangos espectrales con el fin de omitir la influencia de la emisividad (Ver subapartado A.3 de 2.4.3).

La medición de la temperatura en los **no metales** supone una complejidad menor por el comportamiento que presentan ante variaciones de la emisividad. El empleo de los instrumentos radiométricos en rangos donde la emisividad sea elevada y prácticamente constante supone una medición de temperatura de menor incertidumbre.

2.4. Particularidades de las Mediciones a Altas Temperaturas

Las mediciones de temperaturas elevadas presentan ciertas particularidades que se detallan en el presente subapartado. Entre ellas destacan los **cambios de fase del material** (Ver 2.4.1), la **evolución de la emisividad** (Ver 2.4.2) y la **necesidad de instrumentos sin contacto** (Ver 2.4.3).

2.4.1. Cambios de Estado y Fase del Material

Cuando el material en cuestión llega a su temperatura de fusión (T_f), se produce un **cambio de estado** de sólido a líquido. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas de fusión junto a las densidades de alguno de los materiales más empleados en los procesos productivos de la industria:

Tabla 15: Densidad y puntos de fusión de algunos materiales [42], [43].

MATERIAL	Densidad (g/cm ³)	Punto de Fusión (K)
Cobre	8,960	1.357,77
Hierro	7,874	1.811,00
Titanio	4,540	1.941,00
Ti₆Al₄V	4,410	1.943,15
Aluminio	2,698	933,47
Agua	1,000	273,15

En el caso de mediciones de temperatura en materiales fundidos, se emplea la emisividad $\varepsilon(\lambda, T_f)$ en su punto de fusión. Esto es debido a la sensibilidad prácticamente despreciable que presenta este parámetro ante cambios de temperatura [44]. El comportamiento de la emisividad ante los cambios de estado queda determinado por la estructura electrónica y la transición entre el estado sólido y líquido. En general, las propiedades electrónicas de los metales cambian de forma discontinua, de manera que la emisividad a unas determinadas longitudes de onda no cambia, mientras que en longitudes de onda menores (SWIR) la emisividad crece y en longitudes de onda mayores (LWIR) sucede lo contrario, lo cual es coherente con el estudio de Altenburg et al. [45]. Las intersecciones del espectro de la emisividad a distintas temperaturas son denominadas *puntos X*, y son de gran interés para la determinación de modelos del comportamiento óptico de los metales fundidos a altas temperaturas. En este sentido, el desarrollo de métodos termométricos basados en la radiación juega un papel importante a la hora de realizar mediciones de temperaturas en ausencia de contacto con la zona fundida (Ver 2.4.3). El primer paso para ello consiste en el conocimiento de la emisividad espectral, lo cual se consigue mediante distintas técnicas que se detallan en [44]:

- Autocalentamiento resistivo.
- Pruebas en frío.
- Levitación electromagnética.
- Levitación electrostática.
- Calentamiento de la superficie mediante una técnica láser.

Por otra parte, no hay que olvidar la evolución que se produce en la microestructura de los materiales metálicos ante **cambios de fase** por los ciclos térmicos antes de llegar a la temperatura mencionada. En la referencia [46] Shi et al. llevan a cabo un estudio del comportamiento de probetas de acero con un recubrimiento de Al-Si cuando son sometidos a un tratamiento de austenización en dos pasos. Tal y como se puede ver en la Figura 54, el cambio de fase que se produce en el primero de los pasos hace aumentar significativamente la emisividad espectral de 0,20 a 0,76. En el segundo paso en cambio, la emisividad a $2,3 \mu\text{m}$ de longitud de onda se mantiene constante alrededor de 0,75. Esto queda justificado por la transformación que sufre el recubrimiento a una capa intermetálica de Al-Fe-Si. Además, el cambio de fase hace variar la rugosidad, donde primero aumenta el valor de R_a para posteriormente decrecer ligeramente en el segundo paso de calentamiento austenítico.

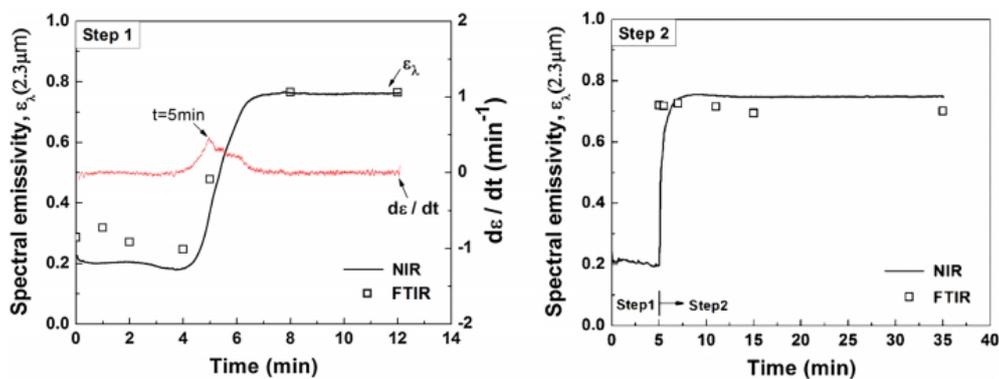


Figura 54: Evolución de la emisividad a $2,3 \mu\text{m}$ por el primer (Izq.) y segundo (Dcha.) de los pasos del tratamiento de austenización [46].

2.4.2. Evolución de la Emisividad

Como consecuencia de diversos fenómenos físicos, se produce una evolución de la emisividad. Además del estado del material, parámetros como la longitud de onda, la temperatura, la velocidad de calentamiento y la integridad superficial afectan en esta propiedad del material que es empleada para el cálculo de temperaturas por radiometría. Por consiguiente, el conocimiento de dichos parámetros en todo momento es de vital importancia, lo cual resulta difícil en la mayoría de los casos de aplicación.

Yu et al. [47] realizan un análisis de distintos parámetros en la evolución de la emisividad de una serie de probetas de cobre (Cu). Para ello, se calientan las probetas a distintas temperaturas (573 K , 673 K , 773 K y 873 K) en una atmósfera inerte con gas argón (Ar), y posteriormente son extraídas para la medición de la emisividad espectral en la dirección normal a través de un espectrómetro FTIR [40]. Los resultados de dicho estudio expulsan las siguientes conclusiones:

El efecto de la **longitud de onda** (λ) en la emisividad espectral es evidente en cualquiera de las temperaturas de calentamiento, pero a la menor de las temperaturas analizadas (573 K), se observa una oscilación acusada en valores de λ entre 3 y $8 \mu\text{m}$ (Figura 55, a). Esto es debido a la inestabilidad superficial que presentan las probetas al iniciar su oxidación. Además, la emisividad presenta ciertos picos que pueden ser debidos a la absorción de CO_2 y vapor de H_2O . En comparación con la superficie inicial sin óxido aparente (0 min), el comportamiento de la emisividad espectral es diferente una vez que se produce la corrosión por la interacción con el ambiente (Figura 55).

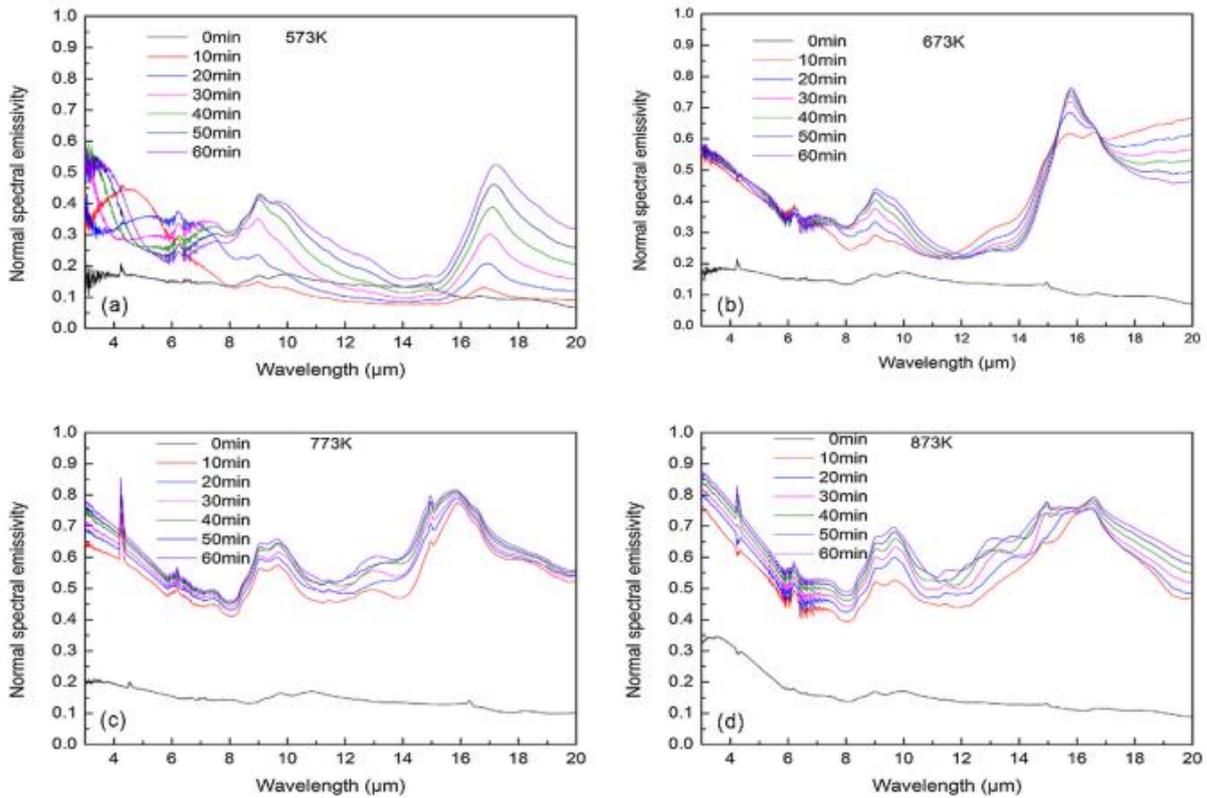


Figura 55: Evolución de la emisividad espectral en la dirección normal de probetas de Cu para temperaturas de calentamiento de (a) 573K, (b) 673K, (c) 773K y (d) 873K [47].

Tal y como se puede observar en la figura anterior, la **temperatura** juega un papel importante en la evolución de la emisividad. Como ley general, se puede decir que la oxidación de los materiales es más acusada cuanto mayor sea la temperatura. En esta misma línea, está la **velocidad y duración del calentamiento** que sufren las piezas analizadas. Al igual que la temperatura final de calentamiento, la velocidad con la que se calientan y el tiempo necesario juegan un papel crucial. Cuanto mayor sea el gradiente térmico, es decir, la temperatura objetivo, la velocidad será mayor. Por consiguiente, todos los fenómenos mencionados hasta ahora se producen de forma más acusada, dando lugar a unos valores de emisividad superiores. Asimismo, cuanto mayor sea el tiempo de calentamiento, las piezas estarán más tiempo interactuando con el ambiente y, en consecuencia, la emisividad aumenta.

Para una mayor comprensión, en el mismo estudio se han llevado a cabo distintas comprobaciones, entre las cuales destacan el estudio de la composición, la micromorfología y la rugosidad superficial. El análisis de la composición a través de un difractor de rayos X (XRD) [48] expulsa la aparición de compuestos adicionales a partir de 573 K, momento en el que se estima el comienzo del fenómeno de la oxidación para las probetas de Cu que se han estudiado. En cuanto al estudio de la micromorfología obtenida con un microscopio SEM (Figura 56), a 673 K de temperatura la superficie presenta arrugas y abultamientos que hacen aumentar la emisividad. Por último, la rugosidad que ha sido obtenida con un rugosímetro láser sin contacto corrobora la afirmación anterior del aumento de la emisividad por la mayor rugosidad de las probetas a temperaturas superiores. Así, los autores dicho estudio coinciden con Jo et al. [49] a la hora de decir que el efecto de la superficie oxidada en la emisividad también es mayor que la propia rugosidad en el acero SA508.

Para la aleación Ti_6Al_4V , la generación de compuestos óxidos se produce a partir de 20 ppm de concentración de O_2 a las temperaturas elevadas como las que se dan en el proceso LMD [19]. Consecuentemente, la emisividad sufre un aumento que afecta en las mediciones de temperaturas del proceso. Por consiguiente, se procura trabajar en atmósferas inertes, o incluso en vacío, con el fin de obtener lecturas de mayor precisión donde la evolución de la emisividad debido al aumento de la rugosidad por oxidación no sea una fuente de incertidumbre que afecte en los resultados (Ver subapartado D.1 de 2.3.2). Un control de la capa de óxido supone por tanto un aspecto a considerar en la monitorización térmica de dicha tecnología.

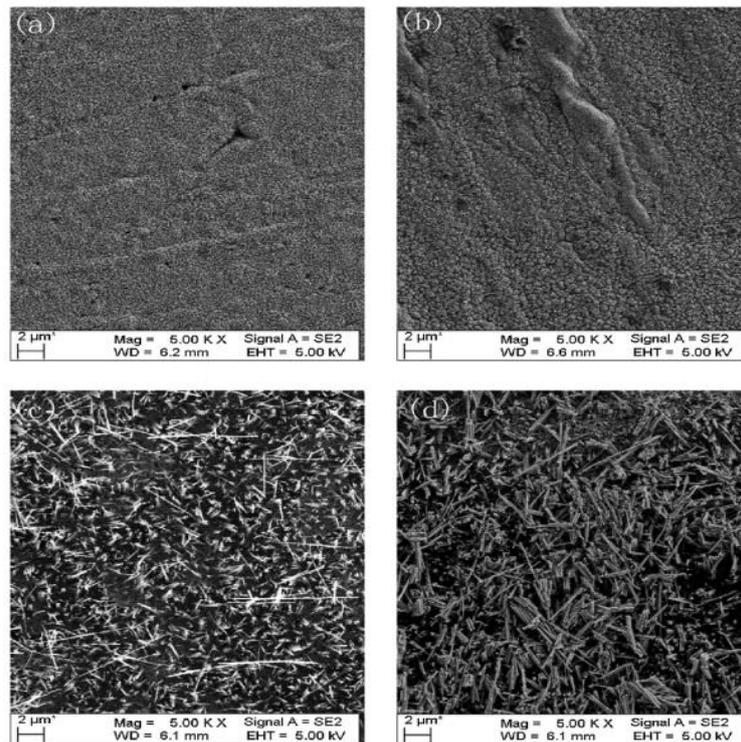


Figura 56: Análisis micromorfológico de probetas de Cu con microscopio SEM a (a) 573K, (b) 673K, (c) 773K y (d) 873K [47].

Por lo tanto, hay que diferenciar entre superficies rugosas por defecto, y aquellas que sufren aumento de la rugosidad por el fenómeno de la oxidación. En este sentido, la modelización de la capa de óxido y el comportamiento óptico de la radiación resultan importantes (Figura 57).

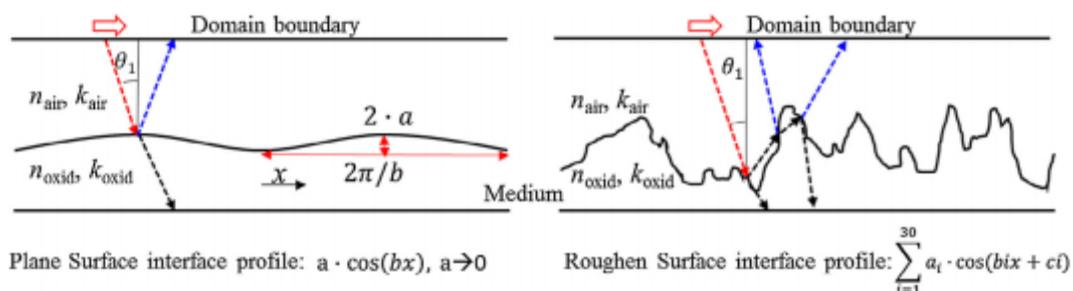


Figura 57: Modelización del comportamiento óptico de una superficie de buen acabado (Izq.) y rugosa (Drcha.) [49].

2.4.3. Necesidad de Instrumentos Sin Contacto

Por último, destaca la necesidad de instrumentos termométricos sin contacto para la adquisición de temperaturas elevadas. En estos casos, resulta inviable la utilización de instrumentos que funcionen por contacto, ya que el deterioro y el correcto funcionamiento se ven influenciados. Alternativamente, se emplean los instrumentos radiométricos, entre los cuales destacan los **pirómetros** (Ver A) y las **cámaras termométricas** (Ver B).

A. Pirómetros

Los pirómetros son dispositivos que se utilizan para medir la temperatura en una zona muy localizada de los objetos sin contacto y a distancia. A pesar de que los primeros pirómetros (1917) solamente permitían realizar mediciones a altas temperaturas por la detección de la radiación en el rango visible, a día de hoy es posible realizar mediciones de objetos fríos con estos dispositivos (Figura 58).



Figura 58: Pirómetros IMPAC [39].

La expansión de estos instrumentos en los distintos sectores de la industria como el del metal, el vidrio o la alimentación está justificada por su precisión, velocidad y coste reducido, tal y como se detalla a continuación:

A diferencia de los instrumentos de medición de temperatura por contacto como los termopares, los pirómetros presentan un **tiempo de respuesta** reducido. El tiempo de respuesta de los sistemas de medición por contacto se debe a la necesidad de alcanzar la temperatura del objeto en el detector, lo cual requiere tiempo por la conducción de calor (Ver 2.3.1). Los pirómetros en cambio, miden la temperatura sin contacto en base a la radiación recibida en fracciones de segundo (Ver 2.3.2). Tal y como se puede ver en la siguiente figura, esto hace que haya una diferencia sustancial entre los instrumentos termométricos que funcionan por contacto y sin contacto:

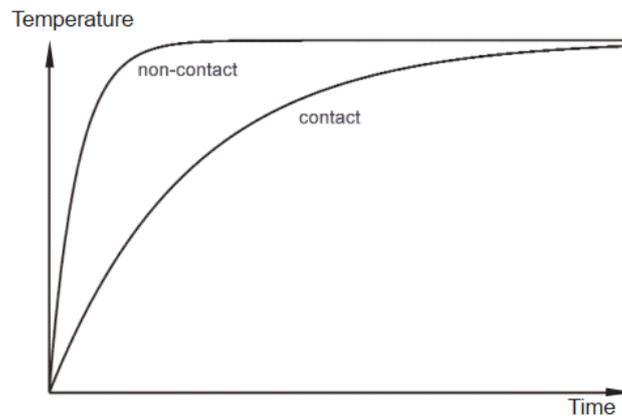


Figura 59: Tiempo de respuesta de los pirómetros [39].

La **limitación de la temperatura máxima** es otro aspecto a considerar en los instrumentos termométricos. Los termopares físicamente no pueden llegar a medir temperaturas por encima de $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$, y como solución presentan un recubrimiento cerámico. Sin embargo, el tiempo de respuesta es todavía peor, estando limitados para mediciones de temperaturas constantes como los hornos. Los pirómetros en cambio, permiten mediciones de temperatura superiores con un menor tiempo de respuesta. Esto posibilita la medición de procesos transitorios, incluso objetos en movimiento en ausencia de agujeros o elementos de sujeción que puedan dañarlos.

Además, hay que tener en cuenta la **influencia de la medición en la lectura** de la temperatura. En el caso de los pirómetros, no hay efectos adversos que pudieran influir en las mediciones de la temperatura debido a la ausencia de contacto. Sin embargo, los termopares pueden llegar a influir en el campo de temperaturas por la transmisión de calor que se produce por conducción (Ver 2.3.1). Por consiguiente, la durabilidad de estos también puede ser menor por los ciclos térmicos que sufren en cada medición.

Por último, destaca el **tamaño mínimo del objetivo** que pueden medir los pirómetros que, gracias a las ópticas formadas por lentes, puede llegar a ser de $0,2\text{ mm}$. En esta línea, las lentes también permiten la posibilidad de medir la temperatura a distancias significativas, lo cual resulta conveniente en ciertas aplicaciones de difícil acceso o zonas peligrosas como los circuitos eléctricos en funcionamiento.

Como contrapartida, está el **conocimiento de la emisividad** del material que se requiere a la hora de emplear instrumentos termométricos sin contacto. Estos suelen ser instrumentos radiométricos que se basan en la emisividad de la superficie a analizar para conseguir mediciones de temperatura, y la labor de obtener un valor con precisión es un tanto ardua (Ver subapartado D.2 de 2.3.2). Los instrumentos por contacto en cambio, no necesitan esta información por basarse en el comportamiento termoeléctrico de los materiales que forman el detector. A pesar de que en la literatura se puedan encontrar valores orientativos de la emisividad [34] y los instrumentos radiométricos tengan compensaciones internas para los errores de este parámetro, los instrumentos por contacto como los termopares no presentan esta fuente de incertidumbre. Sin embargo, su aplicación está limitada a casos de temperaturas no muy elevadas y sin cambios repentinos por todo el razonamiento que se ha venido detallando hasta ahora.

A.1. Construcción y Funcionamiento

Los pirómetros están formados por lentes, una apertura óptica, el filtro espectral, el detector y la unidad de procesamiento de señales. En la Figura 60 se muestra un esquema representativo de la construcción de los pirómetros:

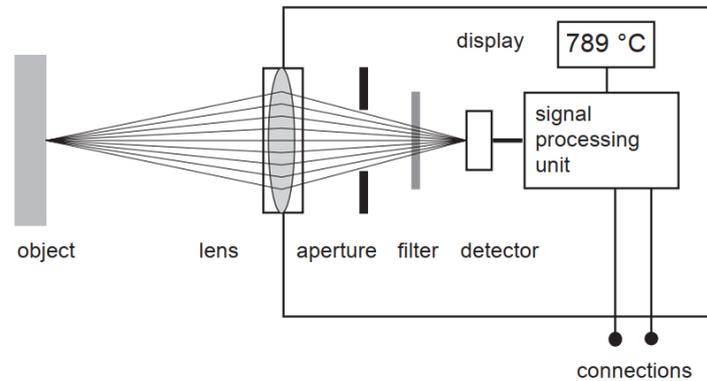


Figura 60: Construcción de los pirómetros [39].

La **óptica formada por lentes** es la encargada de recoger toda la radiación procedente del objetivo y enfocarla en el detector. Estas pueden presentar una distancia focal fija o variable, y en base a ello, el tamaño del objetivo y la distancia de medición es diferente (Ver A.2). La **apertura óptica** por su parte, garantiza que solo pasen las ondas electromagnéticas (EM) deseadas. Posteriormente, estaría el **filtro**, que se emplea para seleccionar el rango espectral de las ondas EM (Ver subapartado A de 2.3.2).

Así, las perturbaciones EM llegan al **detector** que trasforma la intensidad de radiación en una señal eléctrica proporcional en forma de variación de voltaje o resistividad. Esta no es lineal con respecto a la señal de entrada, pero sí con respecto a la temperatura (Figura 61), lo cual se consigue electrónicamente con un proceso de linealización de la señal de entrada.

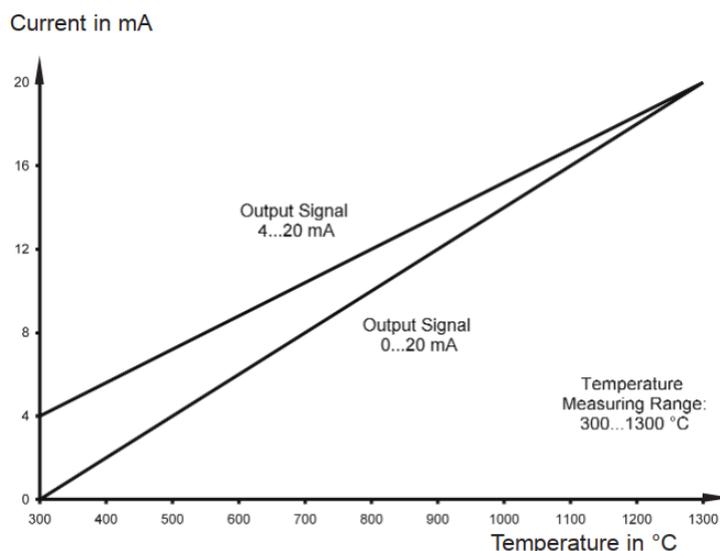


Figura 61: Señal de salida de los pirómetros con respecto a la temperatura [39].

Una vez que se produce dicha conversión, la **unidad de procesamiento** interpreta las señales eléctricas procedentes del detector con el fin de conseguir mediciones de temperatura en base a la expresión (21) de Stefan-Boltzmann asumiendo la idealización del cuerpo gris.

Una configuración muy extendida es el de los pirómetros de fibra óptica (Figura 62), los cuales están compuestos por tres componentes: el cabezal óptico, la fibra óptica y el convertidor. El **cabezal óptico** está constituido por lentes y no tiene ningún componente electrónico. La **fibra óptica** por su parte, es la encargada de transportar las ondas EM de la radiación procedente del objeto al **convertidor**, que está compuesta por el detector y la unidad de procesamiento de señales.



Figura 62: Pirómetro de fibra óptica [39].

Como la fibra óptica no es transparente para longitudes de onda elevadas, este tipo de pirómetros están limitados a temperaturas por encima de los $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, esto puede ser una ventaja desde el punto de vista de que no se ven dañados por las elevadas temperaturas del entorno. Además, los pirómetros de fibra óptica no tienen ningún componente electrónico hasta el convertidor, lo cual hace que no sean susceptibles a variaciones del campo magnético y puedan realizar medidas en vacío.

La fibra óptica está compuesta por el núcleo, el recubrimiento interno y el recubrimiento exterior, siendo el índice de refracción n_2 del recubrimiento interno menor que n_1 del núcleo. Tal y como se muestra en la Figura 63, el transporte de la radiación a través de la fibra óptica se basa en las reflexiones totales entre el núcleo y el recubrimiento interno (Ver subapartado B de 2.3.2):

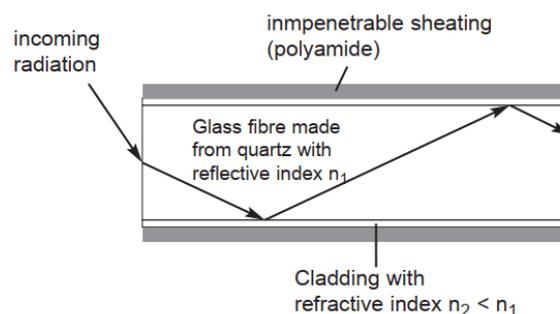


Figura 63: Transporte de la radiación por la fibra óptica [39].

La fibra óptica puede estar formada por una única fibra o varias, lo que da lugar a las configuraciones mono-fibra y multi-fibra, respectivamente. A pesar de que la configuración multi-fibra sea más barata y tenga mayor capacidad para doblar con un menor radio de curvatura, la configuración mono-fibra presenta las siguientes ventajas frente al multi-fibra:

- ✓ Menor diámetro exterior con la misma sección transversal del núcleo (Figura 64, A).
- ✓ Detección de la rotura de fibra instantánea (Figura 64, B).
- ✓ Ausencia de desgaste y fricción del núcleo con el material de relleno (Figura 64, C).

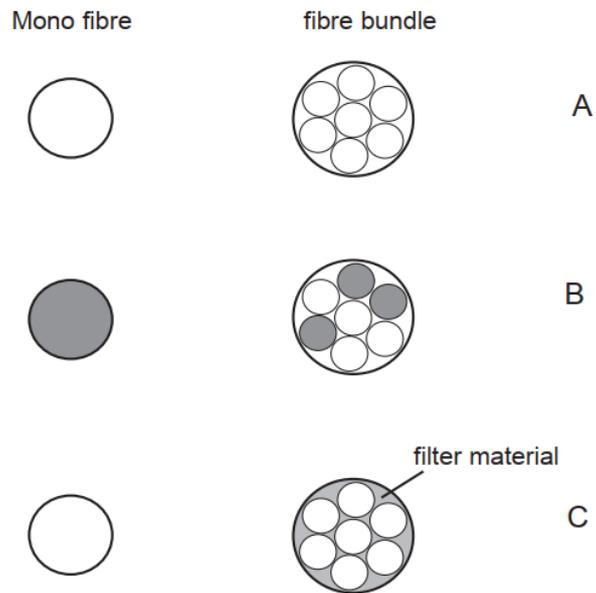


Figura 64: Comparativa entre las configuraciones mono-fibra y multi-fibra [39].

A.2. Tamaño del Objetivo y Distancia de Medición

Los pirómetros captan la radiación que emite una sección sobre la superficie de interés denominada **objetivo**. Este puede ser de distintos tamaños y formas dependiendo de las ópticas que se utilicen. Según las leyes de la óptica, la abertura de las lentes determina la amplificación de la imagen obtenida, siendo mayor el tamaño del objetivo para mayores **distancias de medición**. Por consiguiente, la medición de objetos pequeños requiere de pirómetros que están diseñados para ser utilizados en distancias cortas.

En el mercado, los pirómetros pueden estar montados con dos tipos de ópticas diferentes: La primera de ellas corresponde a la **óptica fija**, que supone una distancia de medición fija, por lo que requiere de un intercambio de lentes para la medición a otras distancias que no sean la nominal; la segunda opción sería el empleo de una **óptica de distancia focal variable**, solución que es muy empleada en pirómetros portátiles. En cuyo caso, el tamaño del objetivo se calcula en base al ratio distancia-diámetro, o incluso con tablas y diagramas (Figura 65).

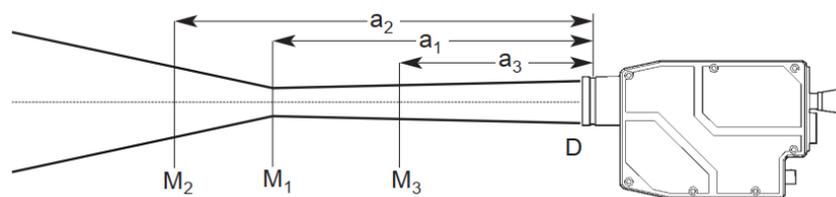


Figura 65: Diagrama del tamaño del objetivo en función de la distancia de medición [39].

Tal y como se muestra en la figura anterior, el tamaño del objetivo (M_1) es el mínimo a la distancia focal (a_1), y aumenta indiferentemente de la dirección. En caso de que la superficie de medición esté colocada a una distancia mayor que la focal (a_2), el tamaño del objetivo (M_2) puede ser conseguido a través de la siguiente expresión:

$$M_2 = \frac{a_2}{a_1} \cdot (M_1 + D) - D \quad (29)$$

Cuando la superficie este colocada más cerca (a_3) en cambio, el tamaño del objetivo (M_3) sigue la ecuación que se muestra a continuación:

$$M_3 = \frac{a_3}{a_1} \cdot (M_1 - D) + D \quad (30)$$

Por otra parte, cabe destacar que el tamaño del objetivo debe ser lo suficientemente grande como para abarcar toda la superficie de interés (Figura 66). Así, se consigue que la lectura de la temperatura sea lo más precisa posible, debido a que toda la radiación captada por el receptor sea la del propio objeto en cuestión y no la de otro cuerpo que se sitúa en el fondo. En caso de que el cuerpo sea menor que el tamaño del objetivo, se estaría cometiendo un error en la medición por la consideración de la radiación no procedente del cuerpo en cuestión. Este ajuste se puede realizar variando la distancia focal en los pirómetros portátiles de óptica variable. Para los pirómetros con ópticas fijas por su parte,

se puede cambiar de lentes o variar la distancia entre el instrumento y el objeto para conseguir el tamaño de objetivo adecuado.

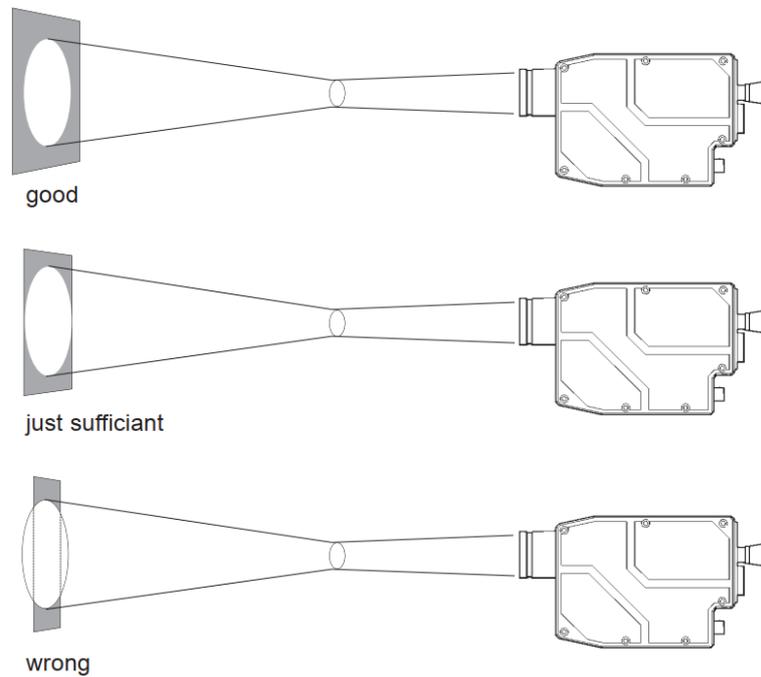


Figura 66: Ajuste del tamaño del objetivo en función del tamaño de la superficie de interés [39].

A.3. Tipos de Pirómetros

Entre los pirómetros, principalmente se distinguen tres tipos que se detallan a continuación:

Los **pirómetros de una banda espectral** pueden ser de rango estrecho o amplio. Los primeros requieren de filtros y detectores específicos, y habitualmente se emplean para la medición de temperatura de materiales como el vidrio ($5,14 \mu m$) y algunos metales con rangos de emisividad elevada en rangos espectrales reducidos. Los pirómetros de una banda espectral amplia en cambio, son más empleados para materiales orgánicos por tener rangos de emisividad elevada de mayor envergadura.

Por otra parte, los **pirómetros de banda total** están diseñados para detectar más del 90% de la radiación emitida por un objeto. Para ello, se hace uso de filtros y detectores que son sensibles prácticamente a todo el espectro. Debido a los errores procedentes de la variación de la emisividad (Ver subapartado D.3 de 2.3.2), el empleo de este tipo de pirómetros no es tan habitual a día de hoy, y es más común emplear **pirómetros de banda reducida** para los mismos casos de aplicación.

Por último, los **pirómetros de dos colores** realizan la medición de la temperatura haciendo uso de dos longitudes de onda diferentes. Calculando el ratio entre las señales obtenidas, se consigue reducir la influencia de la emisividad (ϵ). Para ello, las dos longitudes de onda λ_1 y λ_2 han de estar lo suficientemente próximas, lo cual supone el mismo comportamiento ante condiciones ambientales adversas (Figura 67).

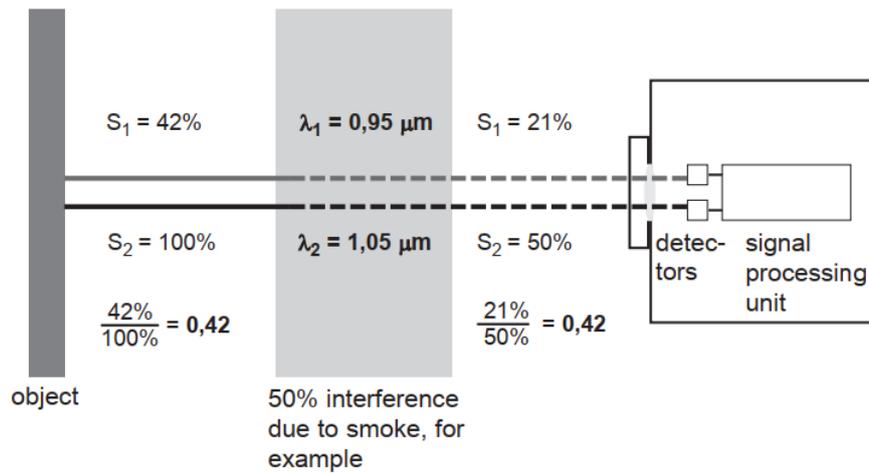


Figura 67: Funcionamiento de los pirómetros de dos colores [39].

En caso de que la emisividad sea diferente para cada una de los λ , es posible definir una variación de ε como relación entre emisividades en los ajustes del pirómetro [39], [50]. Según la referencia [51], la corrección del ratio de emisividades se lleva a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{T_{new}} = \frac{1}{T_{old}} + \left(\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{14.388 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \right) \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \quad (31)$$

La fórmula anterior pone en evidencia la sensibilidad de los pirómetros de dos colores, que puede ser diez veces superior a los pirómetros que trabajan en una única longitud de onda. A pesar de que esto parezca una ventaja, puede llegar a falsear los resultados debido a la mayor incertidumbre que suponen en las mediciones de temperatura realizadas. Por consiguiente, su aplicación ha de ser analizada con sumo cuidado. Las aplicaciones donde se recomienda el empleo de los pirómetros de dos colores son las mediciones de altas temperaturas con condiciones ambientales adversas con polvo o humo, además de las mediciones de objetos de menor tamaño que el objetivo de medición. Sin embargo, hay que tener cuidado en procesos con cambios de fase donde la emisividad es variable y desconocida (Ver 2.4.2), y se tienen que garantizar que el ratio entre ε_1 y ε_2 se mantiene constante para conseguir unos niveles de precisión aceptable, o al menos superiores a las obtenidas con los pirómetros de una única banda espectral.

A.4. Fuentes de Interferencia

Debido a las interferencias con el entorno, se cometen errores en la medición de temperaturas utilizando instrumentos radiométricos como pirómetros y cámaras termométricas. Conociendo las fuentes de incertidumbre, se puede llegar a evitar, o al menos minimizar su efecto en la lectura. En la Tabla 16, se muestran las fuentes de incertidumbre más relevantes y sus posibles soluciones:

Tabla 16: Fuentes de interferencia y posibles soluciones [28].

Fuente de Interferencia	Solución
Reflexiones de objetos cercanos a altas temperaturas (Figura 68, A).	➤ Correcciones matemáticas por software.
Transmisión de radiación en la medición de objetos transparentes (Figura 68, B).	➤ Selección de rangos espectrales donde el objeto sea impermeable a la radiación. ➤ Ajuste del coeficiente de emisividad por software.
Absorción de radiación de la atmósfera intermedia con polvo, vapor, partículas volátiles o humo (Figura 68, C).	➤ Empleo de pirómetros de dos colores. ➤ Selección de rangos espectrales adecuados.
Absorción de radiación de la ventana óptica a la entrada del instrumento (Figura 68, D).	➤ Ajuste del coeficiente de emisividad por software.

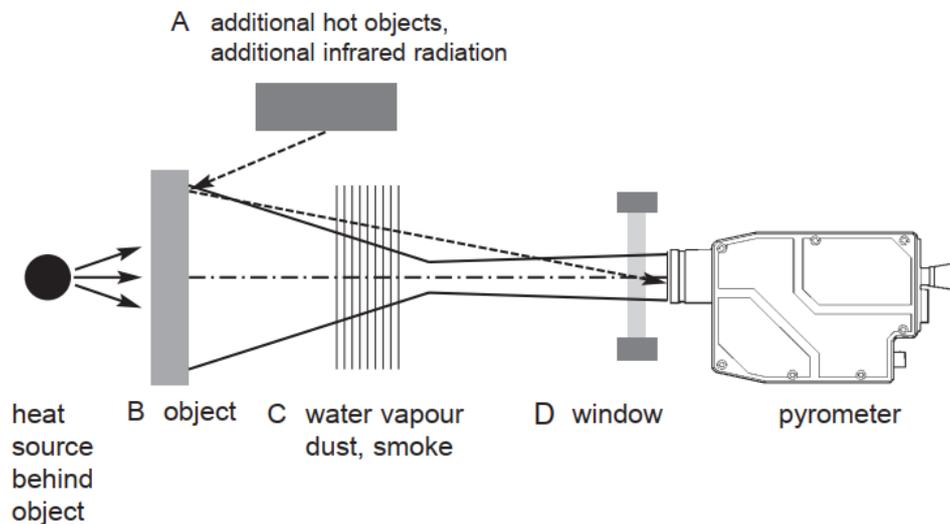


Figura 68: Fuentes de interferencia en los instrumentos radiométricos [39].

B. Cámaras Termométricas

La **termometría** [52] es una técnica que permite determinar temperaturas mediante distintos mecanismos de transferencia de calor (Ver 2.3). Los instrumentos termométricos por excelencia son los termómetros, que realizan la medición de temperaturas de forma indirecta en base a la expansión volumétrica de líquidos o gases que han sido calentados por conducción (Ver 2.3.1). En el caso de las cámaras termométricas, la temperatura es calculada mediante algoritmos internos en función de la radiación infrarroja (Ver 2.3.2). Por consiguiente, permiten realizar mediciones térmicas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. Además, las cámaras termométricas proporcionan imágenes térmicas en 2D, lo cual aumenta el campo de visión con respecto a los pirómetros que han sido explicado anteriormente (Ver A).

Por otra parte, está el concepto de la **termografía** [53], que es la técnica de medición cualitativa de temperaturas a través de imágenes visuales basados en la radiación IR. Para ello, se hace uso de cámaras termográficas que, a diferencia de las termométricas, proporcionan imágenes térmicas de alta resolución que se denominan termogramas. Como punto negativo, está la pérdida de datos cuantitativos de temperatura que se requieren en la monitorización y control de muchos de los procesos productivos. Alternativamente, esta técnica de medición puede ser empleada en aplicaciones como la vigilancia nocturna o la prevención de problemas de salud, donde sólo se requiera distinguir zonas calientes y frías cualitativamente. Dentro de esta última, destaca la prevención de tumores y cánceres como el de mamas (Figura 69) haciendo uso de los que se conoce como *Medical Infrared Imaging* (MIRI) [54], [55].



Figura 69: Aplicación de cámaras termográficas en *Medical Infrared Imaging* para la detección de cáncer de mamas [55].

Eso sí, como los dos instrumentos utilizan la radiación para las mediciones, tanto las cámaras termométricas como las termográficas entran dentro de lo que se conoce como **cámaras radiométricas**. Estos instrumentos permiten la obtención de datos bidimensionales de la temperatura de forma cuantitativa o cualitativa a tiempo real de procesos transitorios. Las medidas de la temperatura por contacto directo, en cambio, implican una constante de tiempo que supone un cierto retraso temporal. Asimismo, influyen en el sistema por la transferencia de calor por conducción, lo cual puede llegar a falsear las mediciones realizadas. Por ello, estos instrumentos son una opción adecuada para la medición de zonas de difícil acceso o alta peligrosidad.

B.1. Construcción

La construcción de las cámaras termométricas es similar a las cámaras digitales convencionales, siendo sus principales componentes las lentes, el detector, el sistema de refrigeración, la electrónica y el software (Figura 70).

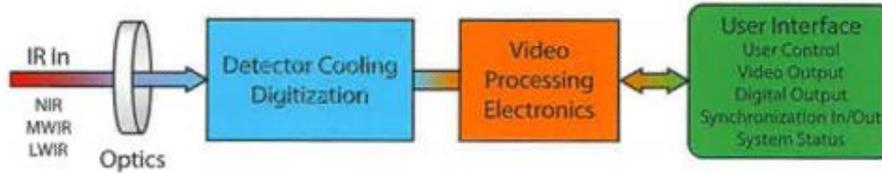


Figura 70: Diagrama de bloques simplificado de una cámara IR [56],[57].

A diferencia de las cámaras convencionales, las cámaras IR son un conjunto de planos focales, o *Focal Plane Array* (FPA) en inglés, dispuesto de píxeles (px) del tamaño micrométrico de varios materiales sensibles a la radiación infrarroja. Esto determina la **resolución espacial**, es decir, el tamaño mínimo apreciable por el detector de la cámara. Dependiendo de la gama del dispositivo que se encuentran en el mercado, la resolución de los FPA puede estar entre los $160 \times 120 px$, hasta los $1280 \times 1024 px$. En la Figura 71, se muestran algunos de ellos:

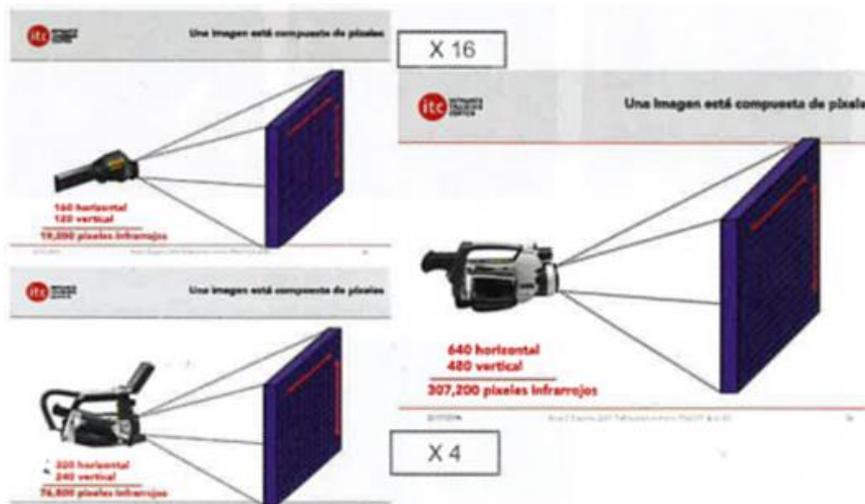


Figura 71: Diferentes resoluciones del disponibles en el mercado [28].

Al igual que en el caso de los pirómetros (Ver A.2), el objetivo cuya temperatura se desea medir debe cubrir el tamaño del medidor puntual que está determinada por el tamaño de cada píxel, es decir, la resolución. Para ello, se reduce la distancia entre la cámara y el objeto en cuestión con el fin de abarcar toda la superficie de interés con el puntero. Incluso, se puede hacer uso de telelentes para la misma función (Figura 72).

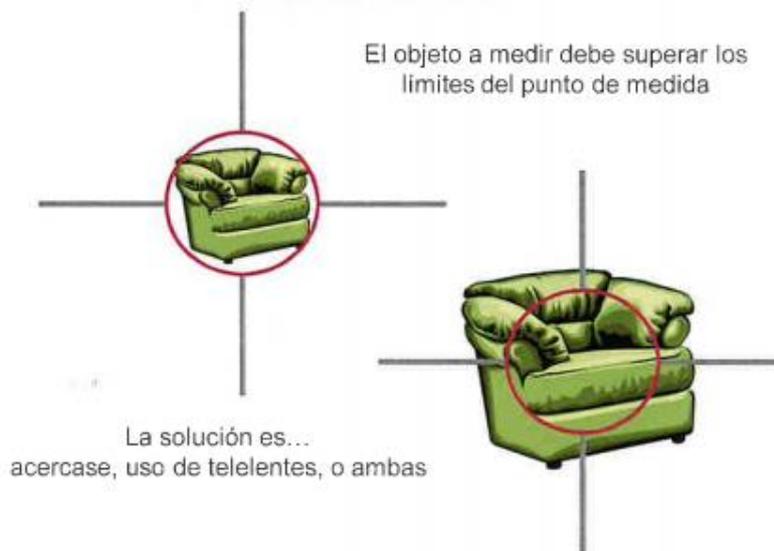


Figura 72: Tamaño mínimo del objetivo apreciable [28].

Entrando en los componentes, las **lentes** son elementos ópticos que enfocan la radiación IR en el detector por medio de la refracción (Ver subapartado B.1 de 2.3.2). Tal y como se puede ver en la Figura 73, la selección de las lentes determina el campo de visión de la imagen adquirida mediante el control de profundidad.

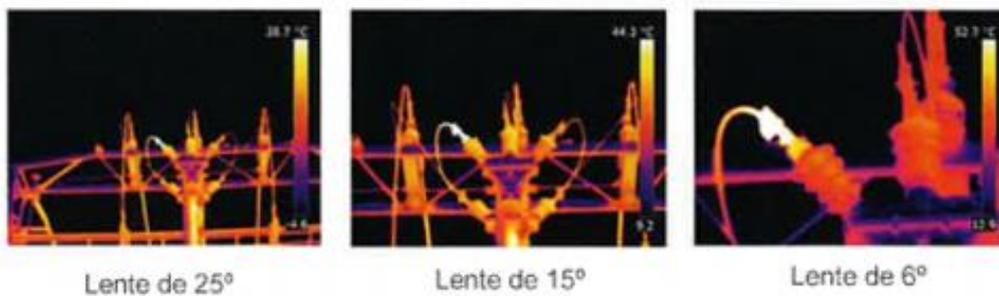


Figura 73: Efecto de la lente en el campo de visión de una cámara T335 de resolución 320x240 px a 12m [28].

Por otra parte, está el **detector de radiación** de los conjuntos de planos focales (FPA), que puede ser de dos tipos: térmico o cuántico. Los detectores térmicos están compuestos por un microbolómetro de un material metálico o semiconductor que no requiere de refrigeración. Se trata de la opción más extendida en la industria debido a su reducido precio, además del amplio espectro IR detectable. Los detectores cuánticos por su parte, pueden estar fabricados de distintos materiales, y cada uno de ellos es sensible a un cierto rango del espectro (Tabla 17). El funcionamiento de estos se basa en el efecto fotoeléctrico intrínseco, es decir, el cambio de estado de los electrones en la estructura cristalina debido a la incidencia de los fotones [56]. Generalmente, los detectores cuánticos presentan una respuesta más rápida que los térmicos por su mayor sensibilidad, y es por ello que se utilizan en procesos transitorios. Sin embargo, requieren de un sistema de refrigeración pudiendo necesitar un enfriamiento criogénico utilizando nitrógeno líquido o una unidad de refrigeración de ciclo Stirling.

Tabla 17: Rangos de espectro y temperatura de los materiales del detector [56].

Material	Tipo de Detector	Rango Espectral	Temp. de Funcionamiento
Microbolómetro	Térmico	Amplio rango	Sin refrigeración 30 °C
HgCdTe	Cuántico	SWIR	200 K
HgCdTe	Cuántico	LWIR	77 K
InSb	Cuántico	MWIR	77 K
PtSi	Cuántico	MWIR	77 K
QWIP	Cuántico	LWIR	70 K

Tal y como se ha mencionado anteriormente, dependiendo del tipo de detector, las cámaras termográficas pueden disponer de un **sistema de refrigeración** que se encarga de mantener la temperatura en rangos aceptables para una correcta utilización y conservación del instrumento.

La **electrónica** y el **software** por su parte, sirven para el tratamiento de las señales adquiridas, así como la monitorización y representación de las imágenes térmicas. Para ello, resulta necesario una normalización de ganancias y los cero offset, ya que cada detector presenta valores diferentes de estos parámetros. Esto se realiza en varios pasos, tal y como se muestra en la siguiente figura:

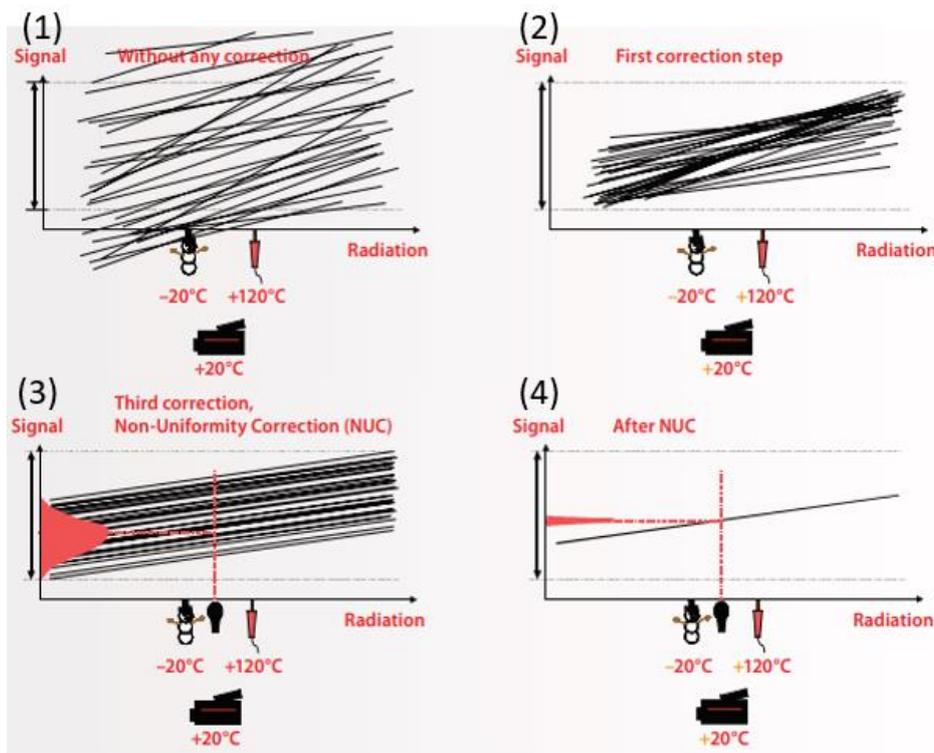


Figura 74: Normalización de ganancias y cero offsets [56], [57].

Por otra parte, las ventajas tecnológicas de la actualidad han permitido el desarrollo de nuevas herramientas para el análisis de las imágenes. Algunos instrumentos disponen de un software incorporado que permite la inspección de la temperatura en una sub-área. Otros ofrecen un software especializado para el análisis de la temperatura por ordenador en base a los datos del sistema. En ambos casos, la precisión del análisis de temperaturas es de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ según los fabricantes [28].

B.2. Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de las cámaras termográficas consiste en la conversión de la radiación infrarroja (IR) recibida a una imagen visual (Figura 75) que puede ser representado por el ojo humano en el rango del espectro visible (380 – 780 nm). Las cámaras termométricas por su parte, realizan una conversión adicional de valores de intensidad de radiación a temperaturas en base a algoritmos internos (Ver B.4).

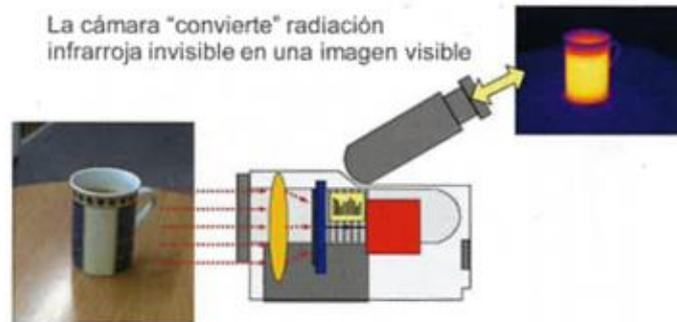


Figura 75: Principio de funcionamiento de cámaras IR [28].

A diferencia de las imágenes visuales, las imágenes térmicas que proporcionan estos instrumentos no permiten conocer los colores de los objetos, sino las temperaturas. Para ello, se hace uso de una escala de colores que en cada zona es proporcional a la intensidad de radiación recibida (Figura 76). Las áreas más oscuras son aquellas que irradian menos radiación térmica, lo cual significa la presencia de zonas frías de menor temperatura. Las zonas más brillantes, en cambio, representan zonas calientes de mayor temperatura, donde la radiación es mayor.



Figura 76: Imagen térmica de un gato [53].

Por lo tanto, las imágenes térmicas muestran la intensidad de radiación, y la temperatura es calculada a posteriori. Por ello, puede ser que la información sea malinterpretada al pensar que zonas con distinto color en la representación visual tengan distinta temperatura, cuando en realidad no es así. Este es el caso de la taza que se muestra en la Figura 77, donde los cambios de superficies hacen variar la emisividad (Ver subapartado D.1 de 2.3.2). Concretamente, la parte azul de la taza irradia más que la pintura dorada, pero la temperatura es prácticamente la misma en ambas zonas.



Figura 77: Efecto de la emisividad en superficies de distinto color [28].

Aquí entra en juego el concepto de la **temperatura aparente** (T_{ap}), que es la lectura no compensada de una cámara termométrica. Esta temperatura está asociada a toda la radiación incidente sobre el instrumento independientemente de su fuente, y para medirlo, solo es necesario fijar la emisividad y la distancia en valores unitarios en las configuraciones de la cámara (Ver B.5).

Para obtener la temperatura real, resulta necesario aplicar una **compensación** teniendo en cuenta la emisividad del objeto y las propiedades del entorno. Eso sí, la modificación de los parámetros de medida no cambia la imagen, ya que siempre se muestra la temperatura aparente en la representación térmica bidimensional. La conversión de la imagen a temperaturas en unidades del SI en cambio, depende de los valores asignados a los parámetros de medida.

B.3. Factores de Influencia

La **emisividad** (ϵ), junto a la temperatura, es uno de los aspectos a considerar a la hora de realizar la adquisición de imágenes térmicas, ya que influye en la radiación incidida sobre el instrumento. La combinación de la temperatura y la emisividad determina la potencia irradiada por un cuerpo, siendo mayor para niveles elevados de estos parámetros. Por consiguiente, la temperatura aparente que proporcionan las imágenes térmicas es directamente proporcional a la emisividad y la temperatura del cuerpo en cuestión. Tal y como se muestra en la Figura 78, la temperatura de la cinta de PVC de mayor emisividad ($\epsilon = 0,95$) se asemeja al comportamiento del líquido interior, mientras que la lectura en la taza de acero inoxidable de menor emisividad ($\epsilon = 0,10$) difiere de la temperatura real (T_{real}). Este ejemplo pone en evidencia que cuando el valor de la emisividad es alto, T_{ap} es cercana a T_{real} . Sin embargo, para emisividades bajas, la temperatura aparente dista de la real y se asemeja a la temperatura del entorno.



Figura 78: Efecto de la emisividad en la imagen térmica [28].

Esto es debido a las **reflexiones del entorno**, que son la principal fuente de error en los análisis radiométricos. Aquí, hay que tener en cuenta que las cámaras IR reciben radiación térmica procedente tanto de las emisiones de la superficie de interés, como las reflexiones que se producen sobre ella. Este hecho se ilustra en la temperatura aparente (T_{ap}) de las imágenes térmicas. Por consiguiente, se detecta más radiación que la esperada debido a la influencia del entorno, lo cual hace que los resultados que proporcionan estos instrumentos se vean influenciados. En la siguiente figura se muestra un ejemplo, donde la radiación en las barras de cobre proviene de los reflejos del punto de conexión eléctrica, que es precisamente donde se está produciendo el problema real.

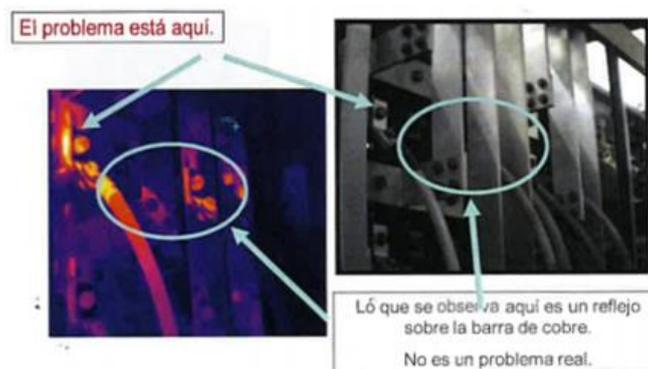


Figura 79: Fuentes de error en el análisis radiométrico procedente de las reflexiones [28].

Según la expresión (27) para la idealización del cuerpo gris (opaco), la **reflectividad** (ρ) de una superficie comprenden el valor complementario de la emisividad (ε). Por consiguiente, para evitar las fuentes de error procedentes de las reflexiones que pudieran falsear la medición de temperaturas, resulta necesario seleccionar una zona de alta emisividad. Tal y como se ha visto en el subapartado D.1 de 2.3.2, las superficies metálicas de buen acabado son un ejemplo donde no se deben realizar las mediciones, ya que ρ predomina sobre ε .

Para hacer frente a los problemas derivados de las reflexiones, está el concepto de la **temperatura aparente reflejada** (T_{refl}). Este parámetro es empleado para la estimación de la parte de radiación procedente de reflexiones del entorno, y poder así diferenciar con las emisiones de radiación del propio objeto. El procedimiento para ello consiste en la colocación de un reflector en el mismo plano que la superficie objetivo dentro del campo de visión de la cámara infrarroja, y ajustar el valor de la emisividad (ε) a 1,00 y la distancia (d) a 0 m en sus configuraciones. Midiendo la temperatura en la superficie del reflector, que puede ser un trozo de papel albal de aluminio arrugado para crear reflexiones difusas (Ver subapartado B.2 de 2.3.2), se obtiene T_{refl} para el objeto de la medida realizada tal y como se observa en la Figura 80 [28], [32].



Figura 80: Estimación de la temperatura aparente reflejada [28].

Una vez se haya estimado la temperatura aparente reflejada, es posible calcular la temperatura de la superficie deseada en base a su emisividad. Cabe destacar que un valor incorrecto del parámetro ϵ puede llevar a errores significativos en la medida de la temperatura (Figura 81). Por ello, resulta necesario un procedimiento para la medición de la emisividad que proporcione resultados fiables que haga ajustar la temperatura a la real del cuerpo que se desea medir (Ver subapartado D.2 de 2.3.2).

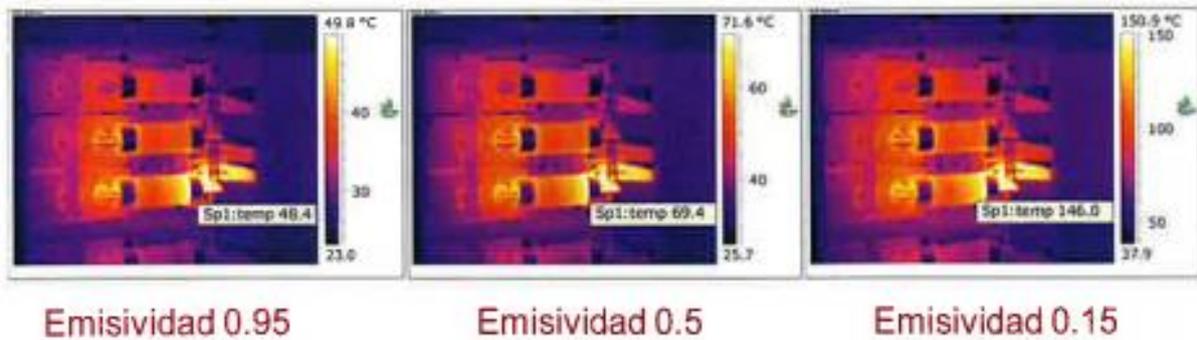


Figura 81: Efecto de la emisividad en la medición de la temperatura [28].

Aparte de la emisividad (ϵ) y reflectividad (ρ) de la superficie a analizar, factores como la **temperatura ambiente** (T_{amb}), la **transmisividad atmosférica** (τ_{atm}) y su **humedad relativa** (RH) juegan un papel importante a la hora de determinar las emisiones del propio objeto. Estos aspectos son considerados en la compensación de las imágenes térmicas a través de los algoritmos internos de la cámara termométrica (Ver B.4). Todo ello pone en evidencia la dificultad de la estimación de la temperatura real haciendo uso de los instrumentos radiométricos mencionados.

B.4. Algoritmos Internos

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las cámaras termométricas utilizan unos algoritmos internos que permiten calcular temperaturas en base a la radiación que le llega al detector (Ver B.1). Estos algoritmos son dependientes de cada cámara, y es por ello que su estudio se centrará en una de las cámaras termométricas que se han utilizado para la realización del presente trabajo.

En el caso de la cámara **FLIR A325 G®** (Ver subapartado B.2 de 3.3.5), se permiten tres formas de procesamiento de señales que quedan determinadas por el parámetro *IRFormat* según el manual [58]: El primero de ellos es el *Signal Linear Mode*, que corresponde a la medición de la señal radiométrica que llega a los sensores de la cámara; los dos restantes en cambio, corresponden a lo que se denomina como el *Temperature Linear Mode*, que directamente proporciona la lectura de temperaturas aplicando los algoritmos internos. Dentro de este último modo, la cámara permite procesar la señal de temperaturas con una resolución baja de $0,1 K$ y alta de $0,01 K$ dependiendo del valor que toma el parámetro mencionado (Tabla 18).

Tabla 18: Modos de procesamiento de la cámara FLIR A325 G® según el parámetro *IRFormat* [58].

<i>IRFormat</i>	Modo de Procesamiento
0	<i>Signal Linear Mode</i>
1	<i>Temperature Linear Mode, 0,1K resolution</i>
2	<i>Temperature Linear Mode, 0,01K resolution</i>

En base al modo de procesamiento seleccionado, los algoritmos para el cálculo de temperaturas son diferentes. En el caso del ***Signal Linear Mode***, la conversión de la señal radiométrica (S_c) a temperatura (T_c) se realiza en base a la expresión (32) teniendo en cuenta los parámetros de calibración de la cámara en cuestión.

$$T_c(K) = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S_c} + F\right)} \quad (32)$$

Los rangos y los correspondientes **parámetros de calibración** de la cámara termométrica FLIR A325 G® son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19: Rangos y parámetros de calibración de la cámara FLIR A325 G®.

Rango (°C)	Calibración (°C)	B	R	F
R0: -20 / 120	-20 / 120	1.348,80	12.713,13	1,00
R1: 0 / 350	0 / 500	1.408,40	15.509,30	1,00
R2: - / 1200	300 / 2.000	1.478,10	18.799,46	1,00

Teniendo en cuenta el procedimiento de cálculo expuesto por Minkina y Dudzik en el libro [59] basado en el artículo [60], la señal radiométrica que llega al detector de la cámara procede de seis fuentes (Figura 82): el objeto a analizar, la ventana óptica, la reflexiones sobre estas dos y las emisiones de las atmósferas justo antes y después de la ventana. Para conseguir la temperatura del objeto, sólo hace falta despejar la **contribución radiométrica del objeto** según la expresión (33). Alternativamente, se

puede realizar una simplificación que se detalla en [59] despreciando la contribución de la ventana óptica ($S_w = 0$) y considerando una única contribución atmosférica.

$$S_{ob} = \frac{S}{\varepsilon_{ob} \cdot \tau_{atm1} \cdot \tau_w \cdot \tau_{atm2}} - \frac{1 - \varepsilon_{ob}}{\varepsilon_{ob}} \cdot S_{o1} - \frac{1 - \tau_{atm1}}{\varepsilon_{ob} \cdot \tau_{atm1}} \cdot S_{atm1} - \frac{\varepsilon_w \cdot S_w}{\varepsilon_{ob} \cdot \tau_{atm1} \cdot \tau_w} - \frac{\rho_w}{\varepsilon_{ob} \cdot \tau_{atm1} \cdot \tau_w} \cdot S_{o2} - \frac{1 - \tau_{atm1}}{\varepsilon_{ob} \cdot \tau_{atm1} \cdot \tau_w \cdot \tau_{atm2}} \cdot S_{atm2} \quad (33)$$

Donde:

S : Señal radiométrica total detectada por los sensores de la cámara.

S_{o1} : Señal radiométrica procedente de las reflexiones del primer entorno.

S_{atm1} : Señal radiométrica procedente de las emisiones de la primera atmósfera.

S_w : Señal radiométrica procedente de las emisiones de la ventana óptica.

S_{o2} : Señal radiométrica procedente de las reflexiones del segundo entorno.

S_{atm2} : Señal radiométrica procedente de las emisiones de la segunda atmósfera.

ε_{ob} : Emisividad del objeto a analizar.

ε_w : Emisividad de la ventana óptica.

ρ_w : Reflectividad de la ventana óptica.

τ_{atm1} : Transmisividad de la primera atmósfera.

τ_w : Transmisividad de la ventana óptica.

τ_{atm2} : Transmisividad de la segunda atmósfera.

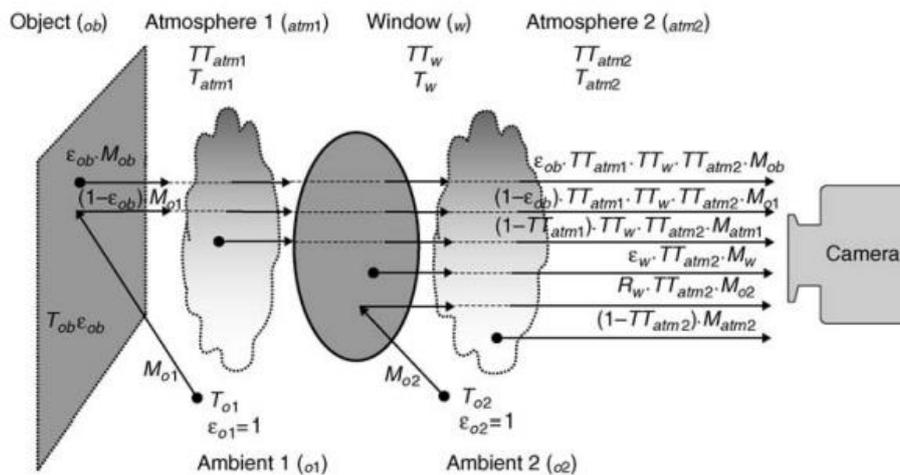


Figura 82: Composición de la señal detectada por los sensores de una cámara IR [59].

Para conseguir las **señales radiométricas** de la expresión anterior, se hace uso de la expresión (34) en base a (32) considerando los parámetros de calibración del rango seleccionado de la Tabla 19.

$$S_c = \frac{R}{e^{B/T} - F} \quad (34)$$

En cuanto a la transmisividad atmosférica (τ_{atm}), existen distintos modelos de cálculo como MODTRAN y LOWTRAN, siendo esta última la empleada por el fabricante *FLIR Systems* para la mayoría de sus cámaras IR [61]. Este modelo se basa en la **concentración de vapor** en la atmósfera, la cual es calculada con la siguiente expresión:

$$C_{H2O} = RH \cdot e^{(1,5587+6,939 \cdot 10^{-2} \cdot T_{atm} - 2,7816 \cdot 10^{-4} \cdot T_{atm}^2 + 6,8455 \cdot 10^{-7} \cdot T_{atm}^3)} \quad (35)$$

Donde:

T_{atm} : Temperatura atmosférica medida en grados centígrados ($^{\circ}C$).

RH : Humedad relativa ($0 < RH < 1$).

Así, se llega a la fórmula (36), a partir de la cual se calcula la **transmisividad atmosférica** en base a la concentración de vapor (C_{H2O}), la distancia de medición (d) y los parámetros de compensación atmosférica ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ y X):

$$\tau_{atm} = X \cdot e^{(-\sqrt{d} \cdot (\alpha_1 + \beta_1 \cdot \sqrt{C_{H2O}}))} + (1 - X) \cdot e^{(-\sqrt{d} \cdot (\alpha_2 + \beta_2 \cdot \sqrt{C_{H2O}}))} \quad (36)$$

A diferencia de los parámetros de calibración, los **parámetros de compensación atmosférica** no dependen del rango seleccionado, siendo sus valores las que se muestra en la Tabla 20:

Tabla 20: Parámetros de compensación atmosférica de la cámara FLIR A325 G[®].

α_1	α_2	β_1	β_2	X
0,0066	0,0126	-0,0230	-0,0067	1,9000

Alternativamente, se puede prescindir de los parámetros de compensación atmosférica con cuatro parámetros de calibración adicionales. Este paso previo a la aplicación de la fórmula (32) resulta necesario para compensar el valor del píxel original (S_o) y conseguir la temperatura de salida de la cámara. La expresión para la **compensación del valor del píxel** es la que se muestra a continuación:

$$S_c = K_1 \cdot \left(\frac{S_o - J_0}{J_1} \right) - K_2 \quad (37)$$

Los parámetros de compensación de (37) se pueden obtener conectando la cámara FLIR A325 G[®] a un software como eBus Player[®]. En el caso del presente trabajo, se han tenido problemas a la hora de conseguir los parámetros K_1 y K_2 , pero J_0 y J_1 de la cámara empleada son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21: Rangos y Parámetros de compensación del valor del píxel de la cámara FLIR A325 G[®].

Rango (°C)	Calibración (°C)	J_0	J_1
R0: -20 / 120	-20 / 120	5.385	97,48
R1: 0 / 350	0 / 500	7.679	15,35
R2: 0 / 1200	300 / 2.000	7.791	4,22

Bien sea con los parámetros de calibración o con los parámetros de compensación, se puede calcular la temperatura del objeto T_{ob} . Para el *Signal Linear Mode* se consigue a través de la fórmula (32) una vez que se tiene su contribución de la señal radiométrica S_{ob} con (33).

Por otra parte, la cámara FLIR A325 G[®] trabajando en el modo de procesamiento de señales **Temperature Linear Mode**, emplea la expresión (38) para obtener temperaturas de la cámara (T_c) a partir de la señal de temperaturas original (T_o).

$$T_c (\text{°C}) = G \cdot T_o + O \tag{38}$$

Donde:

G : Ganancia del valor del píxel, que si:

$$IRFormat = 1 \rightarrow G = 0,1$$

$$IRFormat = 2 \rightarrow G = 0,01$$

O : Offset del valor del píxel, que si:

$$IRAlignment = 0 \rightarrow O = 0$$

$$IRAlignment = 1 \rightarrow O = \text{Límite inferior del rango}$$

B.5. Captura de Imágenes IR

La captura de imagen IR supone la selección y control de algunos parámetros, entre los cuales se pueden diferenciar parámetros invariables que no se pueden cambiar una vez se haya realizado la adquisición, y los variables que sí permiten cambios posteriores.

Entre de los parámetros invariables, hay tres variables que se deben seleccionar con sumo cuidado antes de realizar la captura, ya que repercuten en los resultados finales sin posibilidad de ediciones a posteriori:

El **rango de temperatura** hace referencia a la zona de temperaturas en la que la cámara es capaz de medir. Una mala selección de este parámetro supone medidas erróneas produciendo saturación o baja detección de la radiación. Uno puede llegar a pensar en poner un rango amplio para evitar la saturación, pero hay que tener en cuenta que cuanto mayor es el rango de temperatura, menor es la resolución térmica. Por ello, hay que llegar a una decisión de compromiso donde no se sobrepase el límite máximo de la temperatura.

Al igual que el parámetro anterior, el **enfoque óptico** juega un papel importante en las mediciones de la temperatura a partir de imágenes térmicas, ya que pueden llevar a lecturas incorrectas como en ejemplo de la Figura 83. Generalmente, las cámaras disponen de un sistema de autoenfoco que realiza los ajustes ópticos de forma automática, pero si no es así, es necesario un ajuste manual.

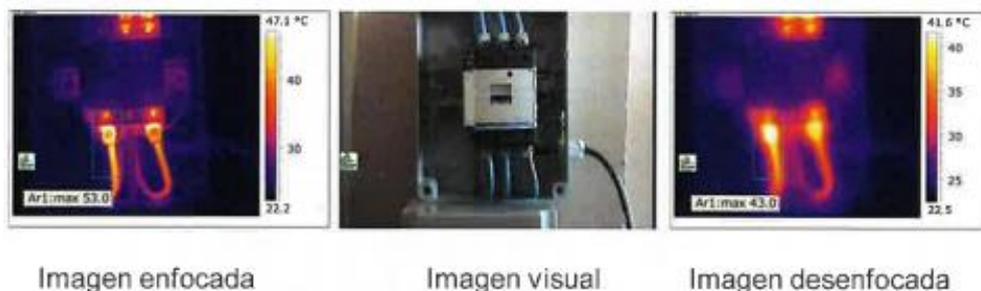


Figura 83: Fuentes de error en el análisis termográfico procedente de las reflexiones [28].

A la hora de considerar la **composición del sistema de medición**, hay que tener en cuenta la posición del objeto con respecto a la cámara, o viceversa. La calidad de las mediciones depende de este aspecto, donde las posiciones cercanas a los bordes proporcionan resultados de peor calidad. Por ello, siempre que se pueda se trabaja en la zona central del campo de visión de la imagen.

En cuanto a los parámetros variables que pueden ser editadas tanto a priori como a posteriori, destaca la **emisividad**. Se trata de un parámetro que puede ser ajustado una vez se haya realizado la adquisición de las imágenes con el fin de obtener la temperatura real de la superficie en cuestión. Esto puede ser realizado por zonas de la imagen, e incluso píxel a píxel dependiendo de la resolución del dispositivo.

El **campo**, también llamado contraste térmico, es la anchura del rango de temperaturas en el que estamos utilizando la paleta de colores. Tal y como se muestra en Figura 84, el rango de temperaturas determina la zona de trabajo, mientras que el campo se encarga de definir la amplitud.

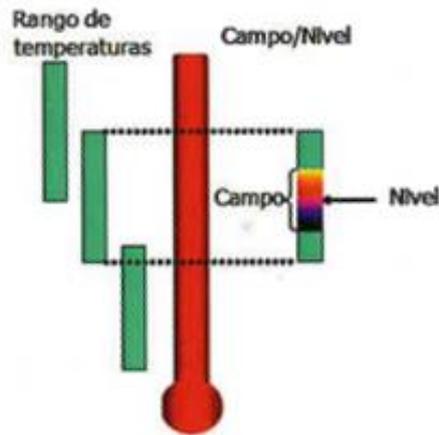


Figura 84: Rango, campo y nivel de temperaturas [28].

Los instrumentos termográficos tienen una función automática que nos proporciona un ajuste del campo térmico de la imagen teniendo en cuenta el **nivel**, también llamado brillo térmico, que es el punto medio del campo que se utiliza como referencia (Figura 84). Así, se consigue concentrar la variación de los colores de la imagen en el campo de interés para el análisis con el máximo contraste visual. En la siguiente figura se muestra un ejemplo donde ha sido necesario un ajuste manual aumentando límite inferior de temperaturas desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un contraste adecuado:

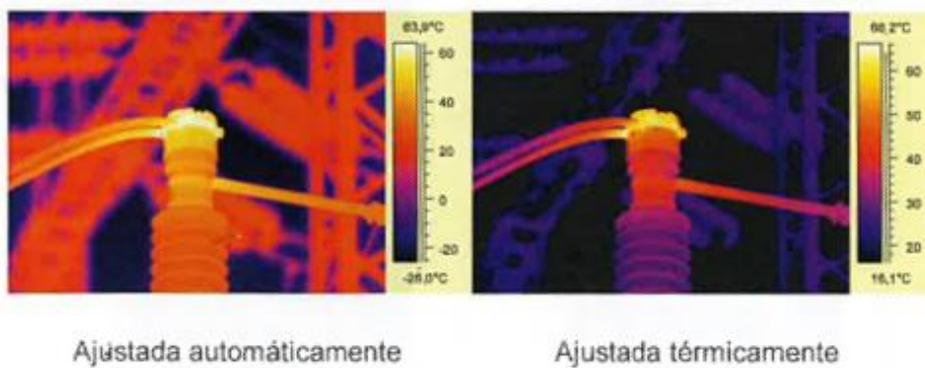


Figura 85: Ajuste térmico manual para un contraste adecuado [28].

La **paleta de colores** es la gama de colores distribuidos sucesivamente que se emplea para la discretización de las diferencias de temperatura en el campo de visión de la cámara. Dependiendo de la precisión digital con la que se trabaje, el número de colores puede variar. Habitualmente, las cámaras termométricas trabajan con 8 bits, lo cual proporciona 256 colores. La asignación de los colores a cada valor de temperatura se realiza de forma automática dentro del intervalo definido por el campo y el nivel. Se trata por lo tanto de una forma de representar la imagen térmica, que pueden servir para remarcar niveles específicos de la temperatura. Por consiguiente, una imagen puede tener más o menos contraste en función de la paleta de colores utilizada. Entre ellas, destacan las cuatro paletas que se muestra en la siguiente figura:

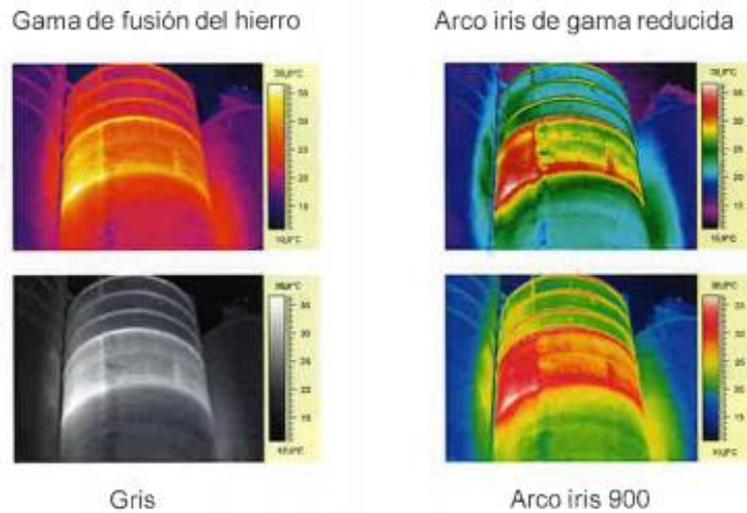


Figura 86: Paletas de colores de diferentes contrastes [28].

Generalmente, se emplean paletas de elevado contraste como el arco iris de gama reducida para casos de bajo contraste térmico con el fin de percibir pequeñas variaciones en la temperatura. Para elevados contrastes en la temperatura en cambio, es preferible la utilización de paletas de menor contraste como, por ejemplo, la gama de fusión del hierro. Como siempre, esto dependerá de cada caso de aplicación.

2.5. Trabajos en los que se han Medido Temperaturas en LMD

En la literatura, se pueden encontrar distintos trabajos en los que se han medido temperaturas del proceso *Laser Metal Deposition* (LMD); y aquí, se exponen los más relevantes para la realización del presente trabajo. Entre estos, se distinguen aquellos trabajos en los que se realiza una **estimación de la emisividad** (Ver 2.5.1), además de la definición de una metodología para la **medición de temperaturas con instrumentos radiométricos** (Ver 2.5.2) y las configuraciones para la **monitorización y control térmico** (Ver 2.5.3).

2.5.1. Estimación de la Emisividad

La estimación de la emisividad es una labor complicada (Ver subapartado D.2 de 2.3.2), especialmente en aplicaciones donde se desconozca la temperatura real, así como las propiedades del objeto que se desea analizar. **Altenburg et al.** [45] por su parte, realizaron una estimación de la emisividad en base a los ciclos de calentamiento y enfriamiento de las piezas fabricadas por LMD. Como bien es sabido, la temperatura es prácticamente constante en los cambios de fase debido al calor latente del material. Por consiguiente, la temperatura de un punto de la pieza presenta una tendencia que se caracteriza por dos partes semi-constantes, uno a cada lado del pico máximo de temperatura (Figura 87). Así, la temperatura de solidificación queda determinada por el *plateau* de la fase de enfriamiento. Variando el parámetro interno ε de la cámara IR con el fin de que la temperatura del *plateau* coincida con la de solidificación del material en cuestión, se consigue obtener una estimación de la emisividad.

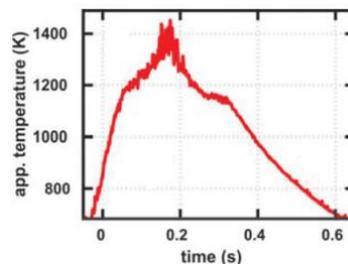


Figura 87: Ciclo de calentamiento y enfriamiento de un punto de la pieza fabricada por LMD [45].

Cabe destacar que la temperatura de solidificación del material no es del todo conocida debido a la complejidad del proceso LMD. Esto hace que se tenga una fuente de incertidumbre procedente de dicho dato extraído de la literatura. Sin embargo, se trata de una metodología simple que permite hacerse una idea del valor aproximado de la emisividad.

Como solución, **Del Campo et al.** [62] han empleado un espectrómetro FTIR [40] que permite la medición de la emisividad en función del ángulo de visión en diferentes condiciones ambientales. Se trata de un equipo que ofrece la posibilidad de realizar mediciones del objeto en cuestión y el cuerpo negro de forma simultánea. Cabe destacar que la radiancia (L) de cada uno de ellos difiere de la señal detectada por el equipo debido a la sensibilidad y la función de respuesta $R(\lambda)$ que ofrece el equipo empleado. Además, existe la influencia de la señal $S_0(\lambda)$ procedente de las emisiones de radiación del

entorno. Considerando la expresión (16) de la Ley de Planck (Ver subapartado C.2 de 2.3.2), se puede llegar a estimar la señal de radiación del cuerpo negro mediante la siguiente expresión:

$$S_{bb}(\lambda, T_{bb}) = R(\lambda) \cdot [L(\lambda, T_{bb}) + S_0(\lambda)] \quad (39)$$

En cuanto a la señal procedente del objeto (*sample*), también influyen las reflexiones del entorno, lo cual se caracteriza con un coeficiente de reflexividad $\rho_s(\lambda, T_s)$, además de la emisividad y la temperatura del entorno (*surrounding*). Así, se puede calcular la señal procedente del objeto siguiendo la expresión que se muestra a continuación:

$$S_s(\lambda, T_s) = R(\lambda) \cdot [(\varepsilon_s(\lambda, T_s) \cdot L(\lambda, T_s) + \varepsilon_{sur} \cdot L(\lambda, T_{sur}) \cdot \rho_s(\lambda, T_s)) + S_0(\lambda)] \quad (40)$$

El primer término de la expresión (40) hace referencia a la radiación emitida por el propio objeto, mientras que la segunda es la fracción de las emisiones del entorno que llegan al receptor al ser reflejadas sobre la superficie a analizar.

Conociendo las temperaturas del objeto (T_s), el cuerpo negro (T_{bb}) y el entorno (T_{sur}) de forma experimental, aparecen tres incógnitas en las ecuaciones (39) y (40), que son la emisividad del objeto (ε_s), la función de respuesta del instrumento (R) y la señal procedente del entorno (S_0). Por consiguiente, resulta necesario una tercera ecuación, lo cual se obtiene aplicando la expresión (39) para otro valor de temperatura del cuerpo negro (T'_{bb}). De esta forma, se puede llegar a obtener R y S_0 con las dos ecuaciones del cuerpo negro a diferentes temperaturas. Por último, la emisividad del objeto es obtenida despejando de (40), lo cual proporciona la siguiente expresión:

$$\varepsilon_s(\lambda, T_s) = \frac{S_s - S'_{bb}}{S_{bb} - S'_{bb}} \cdot \frac{L(T_{bb}) - L(T'_{bb})}{L(T_s) - \varepsilon_{sur} \cdot L(T_{sur})} + \frac{L(T'_{bb}) - \varepsilon_{sur} \cdot L(T_{sur})}{L(T_s) - \varepsilon_{sur} \cdot L(T_{sur})} \quad (41)$$

Mediante esta metodología es posible calcular la emisividad direccional ($\varepsilon(\lambda, T, \theta)$) variando el ángulo de visión de objeto. Los resultados obtenidos por Del Campo et al. ponen en evidencia el comportamiento prácticamente constante de este parámetro hasta los 60° de dirección de observación para el hierro comercial *Armco* (99,8% de pureza). A partir de ahí, $\varepsilon(\lambda, T, \theta)$ empieza a incremental hasta obtener su valor máximo, y terminando en un valor nulo para 90° (Figura 88).

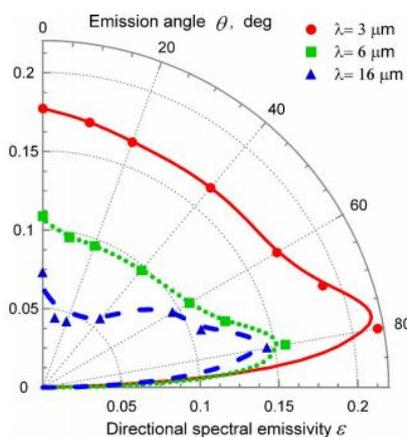


Figura 88: Emisividad direccional para una probeta a 740K [62].

Comparando los resultados obtenidos con la **relación de Hagens-Rubens** para la emisividad espectral en la dirección normal (Figura 89), se puede decir que hay una buena correlación para longitudes de onda superiores entre los datos experimentales y los calculados con (42) en el rango aceptable de dicha expresión (LWIR).

$$\varepsilon_{\lambda} = 36,5 \cdot \left(\frac{r_e}{\lambda}\right)^{1/2} - 464 \cdot \frac{r_e}{\lambda} \quad (42)$$

Donde:

r_e : Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot cm$), siendo $r_e = 4,2 \cdot 10^{13} \Omega \cdot cm$ para el titanio (Ti).

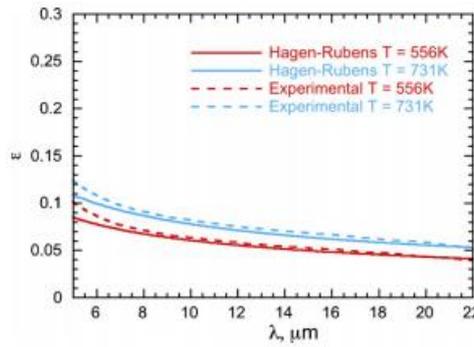


Figura 89: Comparación de la emisividad espectral en la dirección normal calculada con la relación (42) de Hagens-Rubens y los datos experimentales para probetas de hierro comercial Armco a 556K y 740K [62].

Una alternativa para la estimación de la emisividad es la presentada por **Hagqvist et al.** [63] haciendo uso de un pirómetro de rango espectral reducido (Ver subapartado A.3 de 2.4.3). Para ello, se iguala la señal de un pirómetro físico $u_r(T_p, \varepsilon_p)$ midiendo T_p para una temperatura de referencia (T_R) a la de uno virtual $u(T_R, \varepsilon)$. La emisividad de ajuste $\varepsilon(\lambda_c, T_R)$ del pirómetro virtual es la incógnita que se desea extraer de la ecuación (43), siendo su valor la correspondiente a una calibración para T_R .

$$\varepsilon(\lambda, T_R) = \varepsilon_p \cdot \frac{e^{c_2/(\lambda_c \cdot T_R)} - 1}{e^{c_2/(\lambda_c \cdot T_p)} - 1} \quad (43)$$

Donde:

ε_p : Emisividad del pirómetro físico.

T_p : Temperatura adquirida por el pirómetro físico (K).

T_R : Temperatura de referencia del pirómetro virtual (K).

c_2 : Segunda constante de Planck de valor $14.388 \mu m$.

λ_c : Longitud de onda central del pirómetro (μm).

Cabe destacar que la metodología mencionada únicamente es válida para rangos espectrales reducidos, donde la influencia de la longitud de onda es prácticamente despreciable. En caso de emplear rangos mayores como en el caso de las cámaras IR, resulta necesario la consideración de una longitud de onda media efectiva (λ_m) que según la referencia [64] se obtiene con la expresión (44). De esta forma, se puede calcular la emisividad en base los valores de temperatura de referencia (T_R), la emisividad (ε_p) y la lectura de temperatura (T_p) del instrumento en cuestión.

$$\frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{1/T_1 - 1/T_0} \cdot \int_{1/T_0}^{1/T_1} \frac{1}{\lambda_T} d(1/T) \quad (44)$$

Donde:

λ_T : Limite de la longitud de onda media efectiva (μm).

Por otra parte, tenemos el planteamiento de **Marinetti et al.**[65] que trata de ajustar la señal S_{tot} detectada por la cámara IR a una regresión lineal en función de la intensidad de radiación del cuerpo negro (I_{bb}). Para ello, se considera la contribución de la superficie objetivo (*target*) y el entorno (*surrounding*) con la expresión (45):

$$S_{tot}(t) = \varepsilon \cdot I_{bb}(T_t(t)) + (1 - \varepsilon) \cdot I_{bb}(T_{surr}) \quad (45)$$

Los componentes $I_{bb}(T_t(t))$ y $I_{bb}(T_{surr})$ se obtienen aplicando fórmulas internas de la cámara en cuestión, que son función de los parámetros B , R y F de calibración. Tal y como se ha hecho para el caso de los instrumentos radiométricos empleados en el desarrollo del presente trabajo, esto requiere de un estudio en profundidad (Ver 1. Tarea de 3.1).

Asimismo, la señal radiométrica S_{tot} se consigue midiendo la temperatura aparente (T_{ap}) del objeto y aplicando la expresión anterior. Para ello, hace falta compensar la contribución de la atmósfera, además de establecer los parámetros de distancia y emisividad en valores unitarios (Ver subapartado B.2 de 2.4.3). De esta forma se consigue una serie de puntos temporales en una representación de $S_{tot} = I_{bb}(T_{ap})$ como la que se muestra en la Figura 90, a la cual se le aplica la regresión lineal. En base a la expresión (46), la pendiente de la recta resultante corresponde a la emisividad (ε), mientras que la intersección con el eje de ordenadas sería la contribución de las reflexiones S_{refl} .

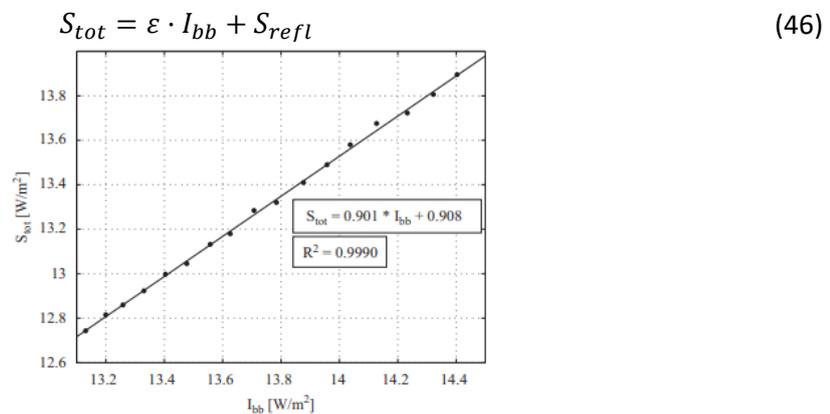


Figura 90: Regresión lineal de $S_{tot} = I_{bb}(T_{ap})$ [65].

2.5.2. Medición de Temperaturas con Instrumentos Radiométricos

La medición de temperaturas con instrumento radiométricos como los pirómetros (Ver subapartado A de 2.4.3) y las cámaras termométricas (Ver subapartado B de 2.4.3) no es un proceso directo, ya que la señal radiométrica que llega al detector ha de ser convertida en una señal eléctrica para poder ser interpretada por el software del procesador. De esta forma, se estima la temperatura en la superficie analizada a través de algoritmos internos como la emisividad y la temperatura, entre otros.

Arriola et al. [66] describen un procedimiento para la medición de parámetros durante el proceso de mecanizado haciendo uso de cámaras IR, que se asemeja a la empleada por **Pujana et al.** [67]. En el primero de ellos, se realiza una calibración del cuerpo negro (*blackbody*) y una corrección del NUC (*Non Uniformity Correction*) [68] como primer paso, con el fin de obtener la evolución de temperaturas T_{bb} durante el proceso de corte. A partir de este, se define el estado estacionario para poder comparar todos los ensayos con mayor repetibilidad. Posteriormente, se procede a la estimación de la temperatura real introduciendo el valor de la emisividad correspondiente, lo cual proporciona mapas térmicos del estado estacionario tanto en la pieza como en la herramienta de corte (Figura 91).

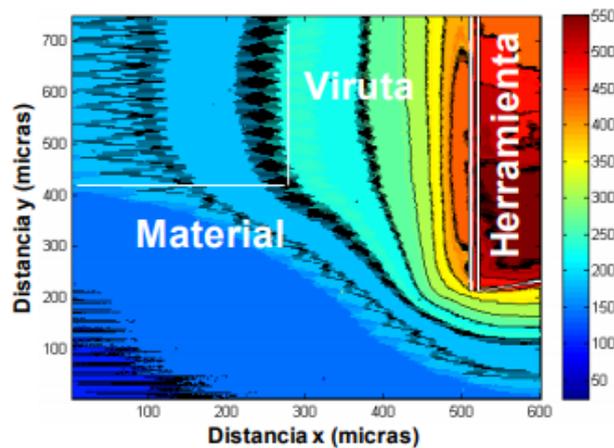


Figura 91: Mapa térmico del proceso de corte aplicando las calibraciones de un cuerpo negro [66].

Hay que tener en cuenta que el comportamiento del material, así como la viruta y la plaquita difieren notablemente de un cuerpo negro ideal en el que la emisividad es constante y de valor unitario para todo el espectro (Ver subapartado C.2 de 2.3.2). La emisividad de cualquier material real en cambio, presenta ciertas variaciones que repercuten en su comportamiento (Ver subapartado C.4 de 2.3.2). Por ello, un conocimiento de este parámetro resulta necesario a la hora de estimar temperaturas a través de cámaras IR, lo cual ha sido realizado mediante un interferómetro FTIR [40] en el caso de Arriola et al., mientras que Pujana et al. se han decantado por el método de radiometría directa. En ambos casos se refleja la importancia de la medición de la emisividad de la muestra a analizar para la obtención de mediciones de temperatura con precisión. En este sentido, se observa que los errores de temperatura son mayores para longitudes de onda y emisividades superiores (Figura 92).

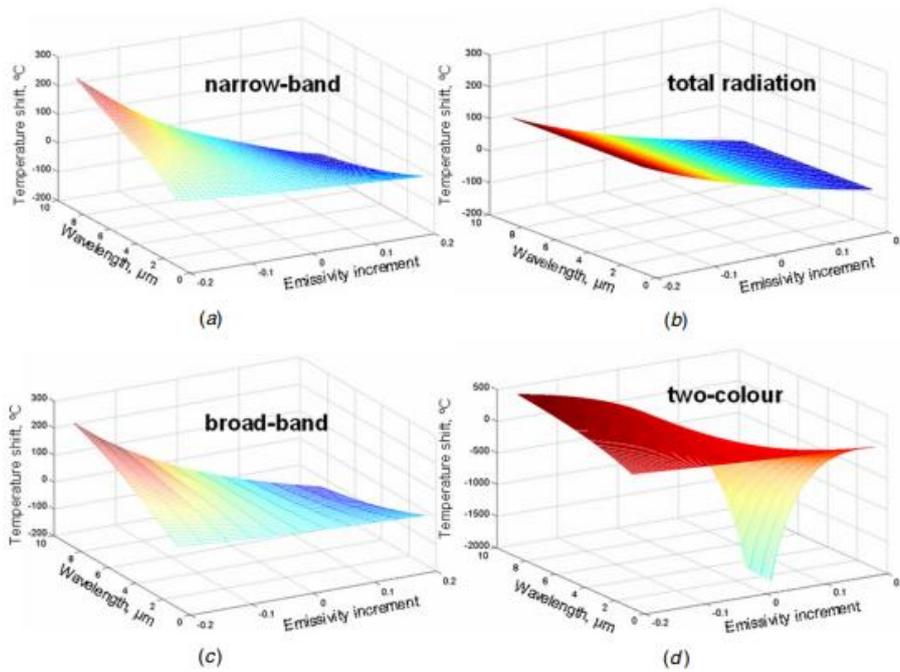


Figura 92: Variaciones de temperatura en función de la emisividad y la longitud de onda para termometría de radiación de banda reducida (a), radiación total (b), banda ancha (c) y el pirómetro de dos colores (d) [67].

Para el cálculo de la temperatura real, ambos grupos de investigación emplean la expresión (16) de la Ley de Planck igualando la emitancia del cuerpo negro M_{bb} con la del objeto a analizar M_s (*sample*) en el rango espectral de la cámara IR. Para ello, se considera la **termometría de banda ancha** con la expresión (47), donde la resolución de la temperatura T_s se realiza numéricamente. La temperatura que cumpla la dicha igualdad será la temperatura real alcanzada durante el proceso.

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{bb}}\right)} - 1} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon_{\lambda} \cdot \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_s}\right)} - 1} d\lambda \quad (47)$$

Donde:

c_2 : Segunda constante de Planck de valor $14.388 \mu m$.

En caso de admitir la idealización del cuerpo gris (Ver subapartado C.3 de 2.3.2), se podría aplicar la asunción de la **termometría de la radiación total** igualando la radiación total que emite el cuerpo negro y la superficie en cuestión a partir de la expresión (21) de Stefan-Boltzmann. La expresión resultante (48) supone que la emisividad es constante en todo el espectro, lo cual introduce un error en la modelización del comportamiento real de los materiales (Ver subapartado C.4 de 2.3.2). Sin embargo, al emplear cámaras IR para la medición de temperaturas, se pueden emplear ópticas para reducir el rango espectral y poder considerar la idealización de emisividad prácticamente constante.

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{T_{bb}^4}{\epsilon}} \quad (48)$$

En este caso, la resolución de (48) es directa y no requiere de integración numérica como (47), lo cual reduce el coste computacional significativamente. Eso sí, en ambos casos se realiza el proceso iterativamente píxel por píxel en cada fotograma (*frame*) del video IR, de manera que posibilita introducir el valor de emisividad correspondiente a cada píxel en función de las zonas definidas previamente en el mapa térmico (Figura 91). Así, se obtiene la evolución de la temperatura durante el proceso en cuestión, que en el caso de [66] y [67] es el mecanizado. Sin embargo, la metodología descrita puede ser generalizada para cualquier proceso térmico en la que se da la transferencia de calor por radiación (Ver 2.3.2).

2.5.3. Monitorización y Control Térmico del Proceso LMD

El presente subapartado se centra en las alternativas de monitorización y control térmico del proceso LMD que han sido introducidos en el apartado correspondiente del estado del arte (Ver 2.2.2). A continuación, se exponen los principales trabajos que se han realizado con cada uno de los instrumentos que se emplean para ello:

A. Cámaras de Visión

Una posible configuración empleada por **Bi et al.** [69] sería incorporar una cámara de visión CCD en el puerto óptico del cabezal (Figura 93), de forma que es posible monitorizar las emisiones del proceso coaxialmente por el mismo camino óptico que el láser del proceso (on-axis). Combinando la cámara de visión, con un fotodiodo incorporado en el cabezal que es sensible en el rango infrarrojo y un pirómetro colocado con cierto ángulo respecto al láser (off-axis), se consigue unas mediciones de temperatura de mayor precisión. Asimismo, **Ocylok et al.** [70] estudiaron la influencia de los distintos parámetros del proceso LMD en el tamaño del baño fundido haciendo uso de una cámara CCD. Implementando un control de la potencia del láser, se observó que el ancho del baño fundido se mantenía prácticamente constante durante el proceso de aporte de las paredes de un único cordón que realizaron.

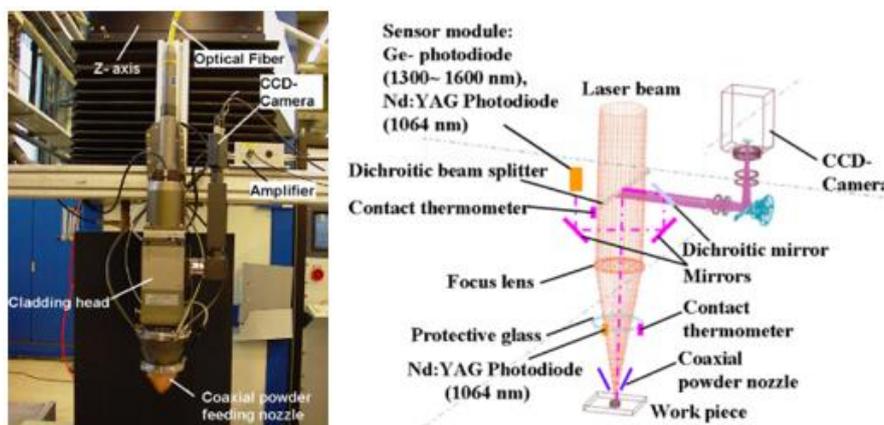


Figura 93: Configuración de cabezal de aporte empleando una cámara CCD [69].

Alternativamente, se pueden emplear cámaras de visión monocromáticas coaxialmente tal y como presentan **Hofman et al.** en [71], [72]. Esto presenta la desventaja de la posibilidad de contener píxeles iluminados que no corresponden al baño fundido (*melt pool*) debido a reflexiones. Por consiguiente, resulta necesario la aplicación de filtros para eliminar los píxeles indeseados. Además, las desviaciones de altura hacen que haya cambios en el tamaño del baño que será empleado para la determinación de temperaturas. Para ello, se aplica una operación de binarización que convierten la imagen de escala de grises a una imagen en blanco y negro. Así, se llega a ajustar el contorno del baño fundido a los ejes de una elipse en la dirección longitudinal y trasversal del movimiento de manera más precisa. Al existir una correlación entre el tamaño y la temperatura, se consigue mantener el aporte térmicamente estable controlando la potencia del láser en base al tamaño del baño fundido.

A pesar de que sea lo deseado, el control in situ basado en la monitorización con una cámara de visión presenta una baja frecuencia de control debido a la necesidad de un procesamiento de imágenes con el fin de extraer temperaturas a partir del tamaño del baño fundido. Esto se puede paliar o al menos minimizar a través del empleo de un FPGA (110 *fps*) [73] en lugar de una PC (3,3 *fps*), la cual es la solución adoptada por **Colodron et al.** en [74].

B. Cámaras Infrarrojas

Tal y como ha sido mencionado en el apartado 2.2.2, la monitorización térmica a través de cámaras infrarrojas (IR) puede ser llevada a cabo en una configuración coaxial o lateral. En la primera de ellas, el instrumento es incorporado en el puerto óptico del cabezal siguiendo el mismo camino del haz láser (*on-axis*). En la segunda en cambio, la cámara IR es colocado fuera del camino ópticos sin integrar en el puerto óptico (*off-axis*). Preferentemente, se opta por la configuración *on-axis* por la independencia con respecto a la dirección de aporte que se consigue. Eso sí, teniendo en cuenta las modificaciones necesarias de los elementos ópticos del cabezal para trabajar en el rango espectral de la cámara infrarroja en cuestión.

Una opción presentada por **Hu et al.** en [75] es la monitorización en el rango espectral de infrarrojo cercano a través de cámaras NIR que permite definir mejor la forma del baño, además de eliminar el ruido a causa del polvo metálico no fundido que siempre está presente en el proceso LMD-p. Se trata de una opción para la medición de temperaturas elevadas con buena estabilidad evitando reflexiones que pudieran aparecer en los rangos espectrales superiores.

Rodriguez-Araújo et al. [76] por su parte, llevaron a cabo una comparativa entre cámaras visibles de tipo CMOS y cámaras MWIR incorporando ambas en el puerto óptico del cabezal en una configuración coaxial. Los resultados del estudio demostraron la imposibilidad de detectar temperaturas inferiores a 900 °C en el rango visible debido a una rápida saturación, lo cual pone en evidencia su estrecho rango dinámico. A pesar de que las cámaras IR presentan un rango dinámico mayor, tienen menor resolución que las cámaras de visión. Además, resulta complicado la adaptación de los elementos ópticos para realizar una medida coaxial con cámaras IR, por no hablar de la mayor inversión de equipamiento que suponen. En la siguiente figura se muestran los resultados de la comparativa mencionada, donde se comprueba el mayor rango dinámico de la cámara MWIR al mismo tiempo que una resolución limitada:

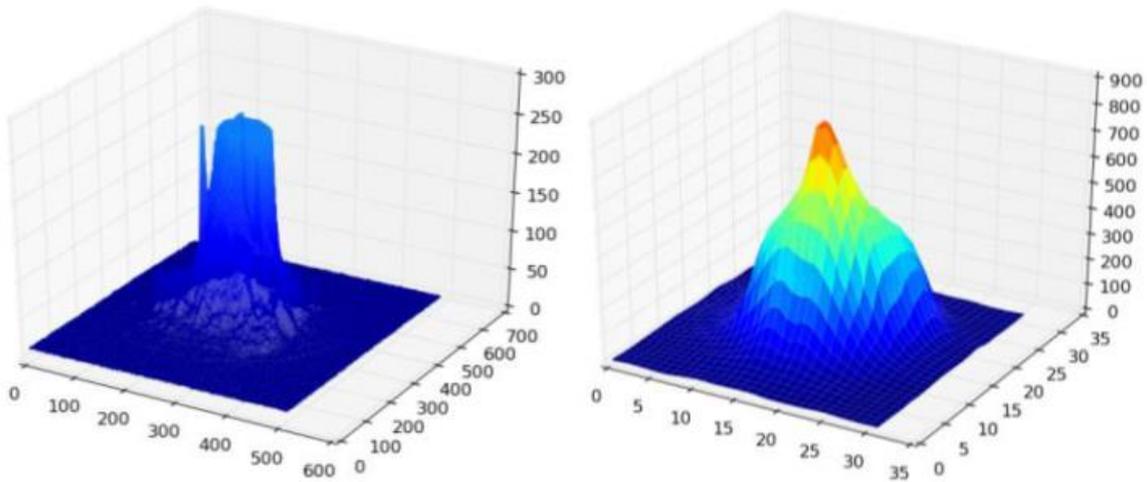


Figura 94: Comparativa de los niveles digitales en la monitorización del baño fundido de forma coaxial entre una cámara CMOS en el rango visible (Izq.) y un sensor PbSe no refrigerado operando en el rango MWIR (Drcha.) [76].

Por otra parte, el grupo de investigación de **Mazzarisi et al.** [22] realiza la adquisición con una cámara MWIR en disposición coaxial con el fin de correlar la dependencia de los datos térmicos con los parámetros del proceso y la microestructura resultante. A través del mapeo de solidificación que proponen (Figura 95), se consigue ajustar los resultados experimentales a los obtenidos en la literatura para las mismas condiciones de funcionamiento.

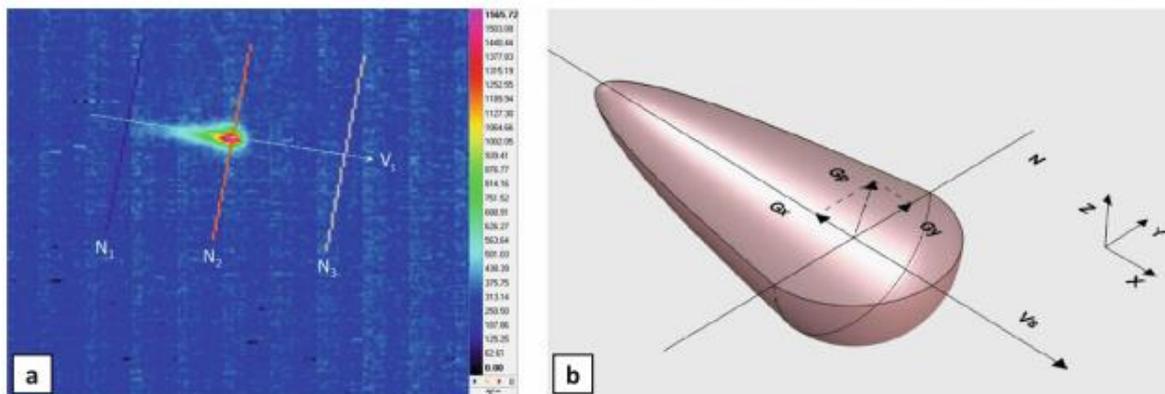


Figura 95: (a) Mapa de solidificación; (b) Representación esquemáticas del baño fundido [22].

En los casos en los que no es posible realizar una medida on-axis en el rango deseado, la alternativa consiste en una configuración off-axis, donde se incorpora una cámara IR de forma lateral. Se trata de una configuración dependiente de la dirección de aporte, por lo que su integración en un control de lazo cerrado es más tediosa. Sin embargo, se trata de la opción más empleada al no necesitar de modificaciones de los elementos ópticos del cabezal como la monitorización coaxial.

Wargulski et al. [77] llevaron a cabo una comparación entre las dos disposiciones mencionadas. En una primera tanda de ensayos, se observó la zona de aporte lateralmente colocando una cámara termométrica VIS en una configuración off-axis (Figura 96a). En la segunda, se colocó la cámara coaxialmente siguiendo el camino óptico del láser para la monitorización on-axis. Mediante esta última

configuración se captaban las reflexiones procedentes de la boquilla de aporte (Figura 96b), por lo que se decantó por la primera de las opciones. A pesar de que la distribución térmica en la monitorización off-axis sea fuertemente dependiente a la dirección de aporte, las imágenes que se consiguen están muchas veces exentas de reflexiones que pudieran dificultar el control que se requiera a la hora de conseguir la estabilidad deseada. Como solución, los investigadores de este trabajo proponen combinar cámaras en ambas configuraciones con el fin de aprovechar las ventajas de cada una de ellas.

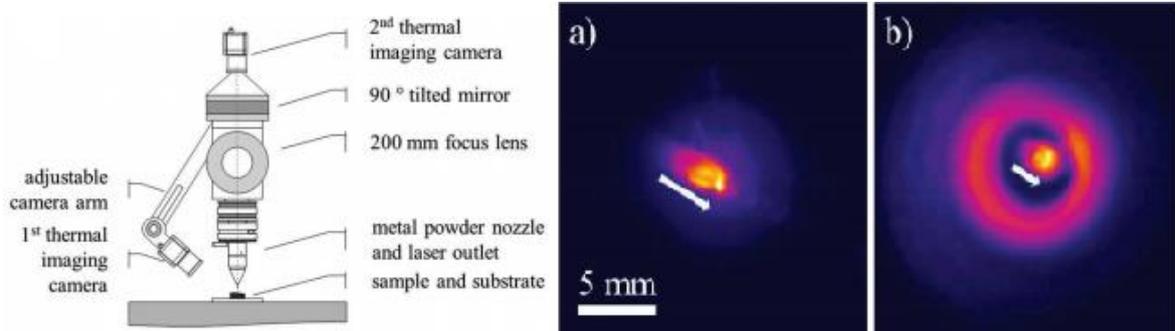


Figura 96: (Izq.) Primera configuración off-axis y una segunda on-axis; (a) Imagen de la configuración off-axis; (b) Imagen de la configuración on-axis [77].

En el caso de **Thiele et al.**, se optó por la monitorización off-axis en [23], para lo cual se dispuso de una cámara infrarroja operando en el rango visible (VIS) de forma lateral a 45° con respecto a la dirección normal a la superficie (Figura 97, Izq.). Dicho estudio expulsó como resultado la adecuación de las cámaras VIS en configuración lateral para la medición de temperaturas del baño fundido, además de la posibilidad para implementar un control térmico por alturas (Figura 97, Central). Esto garantiza la estabilidad durante el proceso de aporte de geometrías como las paredes delgadas (Figura 97, Drcha.) que, de no ser por el control, la fabricación de las mismas presenta grandes dificultades debido al desprendimiento del material.

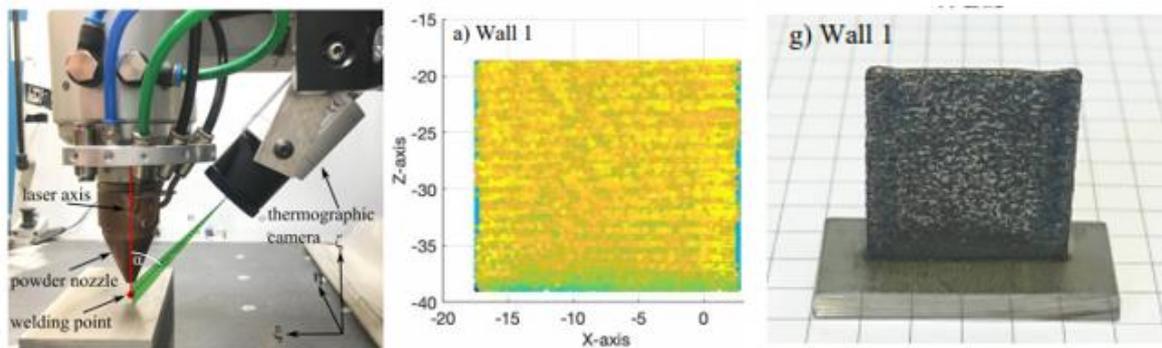


Figura 97: Control térmico por altura con una cámara VIS a 45° [23].

A modo de comparación entre los rangos espectrales de las cámaras IR, el grupo de investigación formado por **Altenburg et al.** [45] realizaron dos tandas de ensayos: en la primera de ellas emplearon una cámara MWIR y otra trabajando en el rango visible (VIS) en una disposición off-axis a 60° respecto a la normal de la superficie a analizar; en la segunda, hicieron lo propio con la cámara MWIR y una SWIR colocando esta última a 40° (Figura 98).



Figura 98: Cámara MWIR a 60° (Izq.), cámara de visión a 60° (central) y cámara SWIR a 40° [45].

Los resultados del primer ensayo verificaron el reducido rango dinámico de las cámaras VIS con respecto a la cámara MWIR, al mismo tiempo que la menor tendencia a la aparición de reflexiones. De la segunda tanda de ensayos se extrajo como conclusión las diferentes tendencias que presenta la emisividad según el rango espectral (Ver subapartado D.1 de 2.3.2). A diferencia del rango SWIR, la temperatura aparente que proporciona la cámara MWIR en el baño fundido es menor que en el resto de la pieza debido a la disminución de la emisividad que se produce en dicho rango a tan elevadas temperaturas (Figura 99). No se puede decir lo mismo en el rango SWIR a pesar de que no suceda lo mismo en la temperatura aparente de dicho rango, porque no se sabe la temperatura real del baño fundido. Como conclusión general, Altenburg et al. destacan la similitud entre los resultados de las distintas cámaras para las mediciones de las partes sólidas, cada cual con sus particularidades en la resolución y el rango dinámico.

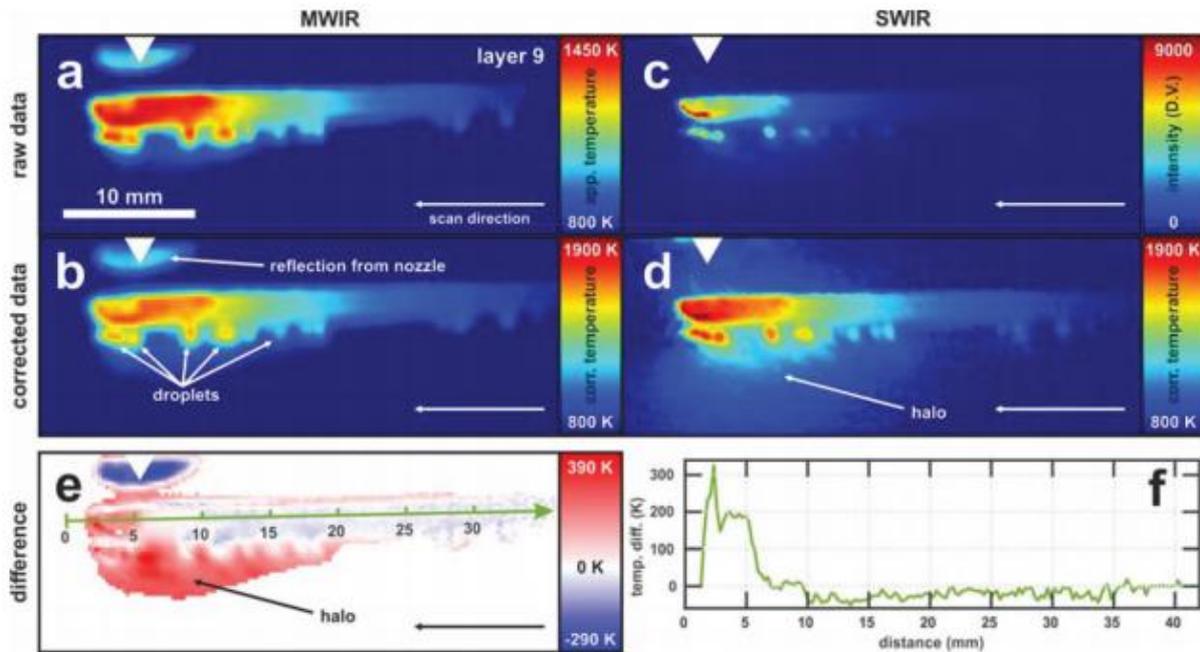


Figura 99: Comparativa de la evolución del proceso de aporte de la cámara MWIR y SWIR [45].

En este sentido, **Hassler et al.** [78] emplean una cámara que combina los rangos SWIR y MWIR al trabajar entre $1,5$ y $5 \mu m$. Esto hace que se tenga ventajas de ambos rangos espectrales a la hora de detectar defectos en la monitorización cuasi in situ que ha sido realizada. La configuración empleada permite validar los parámetros del proceso, así como la detección de la falta de unión entre capas. Además, gracias a la resolución aceptable de la cámara empleada, se pueden detectar defectos casi al momento en el que se producen. Sin embargo, los autores mencionan la dificultad de conseguir una repetibilidad aceptable con el sistema de monitorización off-axis fuera de la zona de trabajo empleado (Figura 100), y proponen integrar la cámara al cabezal de aporte en combinación con un escáner 3D que trabaje simultáneamente.



Figura 100: Disposición de cámara IR off-axis fuera de la zona de trabajo empleado por Hassler et al. [78].

Siguiendo esta recomendación, **Doubenskaia et al.** [79] emplean una cámara MWIR integrada en el cabezal formando 40° con la dirección normal (off-axis), de donde extraen como conclusión la conveniencia de dicha configuración para determinar los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza. Además, pudieron deducir la influencia de los parámetros del proceso en la distribución de temperaturas en el baño fundido. Como punto negativo, destacan la dificultad de realizar un control con una configuración off-axis como la que han sido llevada a cabo por su grupo de investigación.

Por último, tenemos el rango espectral LWIR. En la literatura se pueden encontrar trabajos como el de **Liu et al.** [80], donde se combinan cámaras IR trabajando en dicho rango con pirómetros en disposición off-axis (Figura 101). Asimismo, **Yan et al.** [81] hacen lo propio en combinación con termopares con el fin de predecir las distorsiones térmicas y la influencia de los distintos parámetros del proceso que tienen entre ellas.

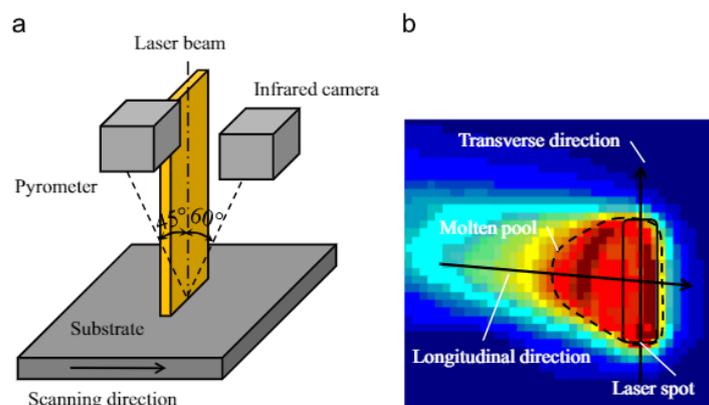


Figura 101: (a) Esquema de los instrumentos ópticos; (b) Medición de la temperatura de la cámara IR [80].

3. METODOLOGÍA

Este apartado corresponde a la explicación de la metodología que se ha seguido para la ejecución del presente Trabajo Fin de Máster (TFM), donde se ha realizado la monitorización térmica del proceso *Laser Metal Deposition* (LMD). Primero se exponen las tareas de la **metodología adoptada** (Ver 3.1), seguido de la **planificación** que se ha seguido (Ver 3.2). Posteriormente, se describen **el material y los instrumentos** que se han empleado para la ejecución del presente trabajo (Ver 3.3), así como los **cálculos y algoritmos** que se han implementado para la metodología desarrollada (Ver 3.4).

3.1. Metodología Adoptada

A continuación, se describen cada una de las tareas que has sido necesarias para la realización del presente trabajo según los objetivos expuestos en el apartado 1.2:

1. TAREA: Determinación de los Algoritmos Internos de las Cámaras

Antes de nada, resulta necesario determinar los algoritmos internos tanto de las cámaras como los softwares que han sido empleados para el procesamiento de las señales. En el caso de la **cámara OPTRIS PI 05 M**[®] (Ver subapartado B.3 de 3.3.5), se ha optado por el empleo del software PIX Connect[®] (Ver subapartado B de 3.3.6) para la adquisición de las señales. Por consiguiente, no ha sido necesario determinar sus algoritmos internos, dado que los datos han sido adquiridos y exportados a Matlab[®] directamente desde el propio programa. Sin embargo, la obtención de sus algoritmos internos es planteada como línea futura (Ver 5).

En los que respecta a la **cámara FLIR A325 G**[®] (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) en cambio, se pretende realizar la adquisición desde Matlab[®] a través del SDK que proporciona el fabricante *FLIR Systems*. Así, se desea desarrollar un programa propio, donde se posea todo el conocimiento sobre el principio de funcionamiento (Ver subapartado B.2 de 2.4.3) y los algoritmos internos (Ver subapartado B.4 de 2.4.3) de la cámara mencionada. Por lo tanto, esta tarea para la determinación de algoritmos internos corresponde únicamente a la cámara FLIR A325 G[®].

Para ello, se ha realizado una tanda de ensayos haciendo uso de una mesa térmica (Ver 3.3.4) y un termopar de tipo K (Ver subapartado A de 3.3.5). Asimismo, se han empleado los softwares ThermaCAM Researcher[®] (Ver subapartado A de 3.3.6) y Matlab[®] (Ver subapartado C de 3.3.6).

3. METODOLOGÍA

Haciendo uso de la mesa térmica, se calienta una pieza de material Ti_6Al_4V fabricada por un proceso de aporte LMD-w a distintas temperaturas. En cada una de ellas, se captura la imagen térmica (IR) de la pieza durante 10 segundos aproximadamente con los dos softwares. Debido a que la transmisión de calor desde la mesa térmica a la pieza se produce por conducción, las variaciones de temperatura y el gradiente térmico a lo largo de la pieza son aspectos a tener en cuenta. Por consiguiente, resulta necesario mantener la temperatura nominal de la mesa caliente durante un periodo lo suficientemente prolongado para que la temperatura se estabilice, cuyo control se ha realizado con el termopar de tipo K. Así, se consigue analizar el comportamiento estacionario del sistema, lo cual es coherente con los principios de medición de temperaturas expuestos en el estado del arte (Ver 2.3).

El procedimiento se repite para cada rango y modo de funcionamiento de la cámara con el fin de correlar los resultados de ambas fuentes de adquisición. Además, se toman tres registros en cada prueba con el fin de aminorar el efecto de las distintas fuentes de incertidumbre que pudieran haber. En la Tabla 22, se muestra el resumen de las distintas pruebas que se han realizado con cada software:

Tabla 22: Pruebas para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325 G®.

Prueba	Modo de Funcionamiento	Rango de Temp.	N° Registros	ThermaCAM Researcher®	MATLAB®
1	Signal Linear Mode	R0	3	✓	✓
2		R1	3	✓	✓
3		R2	3	✓	✓
4	Temperature Linear Mode	R0	3	✓	✓
5		R0	3	✓	✓
6		R1	3	✓	✓
7	Mode	R2	3	✓	✓
8		R0	3	✓	✓
9		R1	3	✓	✓

En todas las grabaciones se han mantenido constante los parámetros que se muestran en la Tabla 23. Así, se llega a obtener temperaturas del cuerpo negro tal y como se detalla en el apartado correspondiente al principio de funcionamiento de las cámaras termométricas (Ver subapartado B.2 de 2.4.3).

Tabla 23: Parámetros constante en los ensayos para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325G®.

$\epsilon(-)$	$d(m)$	HR (%)	$\theta_{cam}(^{\circ})$
1	1	50	0

En la Tabla 24 se muestran las nueve pruebas que constituyen la tanda de ensayos que se han llevado a cabo con el software ThermaCAM Researcher®, donde se indican las correspondientes temperaturas de referencia que han sido tomadas con el termopar de tipo K:

Tabla 24: Pruebas del software ThermaCAM Researcher® para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325 G®.

Prueba	IRFormat	Rango	$T_{ref}(^{\circ}C)$
1	0	R0	295,6
2	0	R1	295,9
3	0	R2	295,6
4	0	R0	295,5
5	1	R0	295,5
6	1	R1	295,2
7	1	R2	295,4
8	1	R0	295,0
9	1	R1	294,6

Asimismo, las comprobaciones de Matlab® han sido realizadas con la siguiente tanda de ensayos de siete pruebas que se detalla en la siguiente tabla combinando modos de funcionamiento y rangos de temperatura:

Tabla 25: Pruebas de Matlab® para la determinación de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325G®.

Prueba	IRFormat	Rango	$T_{ref}(^{\circ}C)$
1	0	R0	295,6
2	0	R1	288,5
3	0	R2	290,0
4	1	R0	291,8
5	1	R1	292,0
6	1	R2	292,3
7	1	R0	293,7

Correlando la lectura de ambas fuentes, se han estimado los algoritmos internos que utiliza la cámara para el cálculo de temperaturas. Para ello, se toman como referencia las mediciones de obtenidas con la cámara FLIR A325 G® en combinación con el software ThermaCAM Researcher®. Los resultados que proporcionan los algoritmos de cálculo que se han implementado (Ver 3.4.1), y las correspondientes conclusiones de esta primera tarea son detallados en el subapartado 4.1.1 de los resultados científico-técnicos.

2. TAREA: Calibración de la Emisividad

Adicionalmente, se han llevado a cabo una serie de pruebas con intención de tener una idea sobre la emisividad de las piezas de Ti_6Al_4V que se obtienen mediante el proceso LMD-w. Asimismo, se pretenden verificar los resultados de temperaturas en base a la emisividad que proporciona la metodología desarrollada posteriormente (Ver 3. Tarea). Para ello, se ha realizado una calibración de la emisividad mediante la cámara FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) siguiendo el **método del taladrado de agujero** (Ver subapartado D.2 de 2.3.2). Cogiendo una de las piezas fabricadas por la tecnología de FA mencionada, se ha realizado un agujero de 5,8 mm de diámetro y 39 mm de profundidad (Figura 102). Esto cumple con las especificaciones de 1: 3 de relación mínima entre ambos parámetros dimensionales para conseguir emisividades del cuerpo negro. Complementariamente, se hace uso de un termopar de tipo K (Ver subapartado A de 3.3.5) para verificar la medición de temperaturas del cuerpo negro en el agujero obtenidas con la cámara IR.

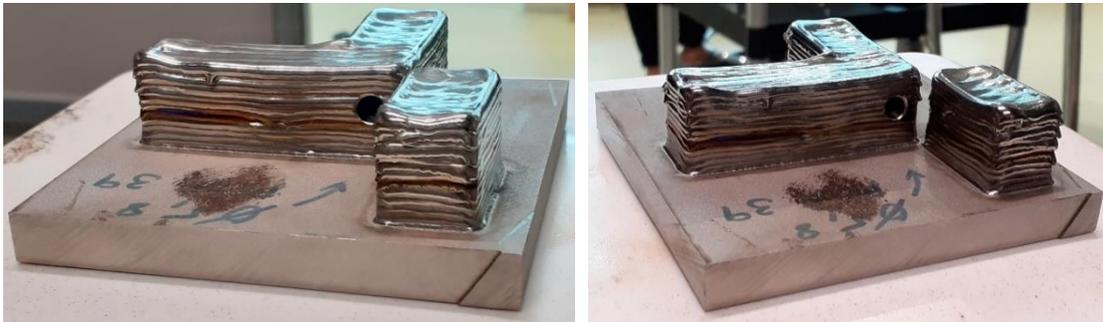


Figura 102: Calibración de la emisividad con el método del taladrado de agujeros.

Así, se toma la lectura de la temperatura en la pared de la pieza a través de la selección de píxeles en las imágenes IR obtenidas con la cámara FLIR A325 G®. Dependiendo de los píxeles que se cojan, la lectura puede variar de manera sustancial. Por consiguiente, se ha optado por la media de 5x5 píxeles, lo cual proporciona menores incertidumbres de medida (Ver 4.1.2). Variando el parámetro ε en la configuración de la cámara, se consigue ajustar esta a la temperatura del cuerpo negro del agujero ($\varepsilon = 1$) para diferentes rangos de temperatura. En la Tabla 38 se muestran las pruebas que se han llevado a cabo, donde se distinguen las pruebas estacionarias (1-10) y transitorias (11-12):

Tabla 26: Pruebas para la calibración de la emisividad.

Prueba	$\varepsilon(-)$	$T_{tp}(^{\circ}C)$	$T_{bb}(^{\circ}C)$	$T_{pared}(^{\circ}C)$
1	1	280	278,9	-
2	0,30	-	-	228,4
3	0,28	-	-	241,5
4	0,25	-	-	259,9
5	0,22	-	-	281,8
6	1	290	280,1	-
7	0,23	-	-	274,6
8	0,23	-	-	290,2
9	1	300	289,2	-
10	0,28	-	-	263,6

11	1
	0,35
	0,30
	0,25
	0,33
	0,28
	0,20
	0,33
	1
12	1
	0,35
	0,30
	1
	0,28
	0,25
	0,22
	1
	0,20
1	

La razón por la que los ensayos han sido realizados a distintos rangos de temperatura es tener una idea sobre la evolución de la emisividad a lo largo de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza. Esto se ha conseguido haciendo uso de una mesa térmica y un horno calefactable (Ver 3.3.4), con capacidades de 600 °C y 1.100 °C respectivamente. Mediante la mesa caliente se ha calentado la pieza a 200 °C y 400 °C, mientras que con el horno la pieza ha sido calentada a 700°C y 900 °C. En este sentido, las pruebas realizadas se dividen en dos: en la primera se mantiene la temperatura constante con la mesa caliente; mientras que, en la segunda, se deja enfriar la pieza una vez extraída del horno a las temperaturas mencionadas. De esta forma, se tiene una idea del comportamiento estacionario y transitorio de la emisividad respectivamente.

Para las pruebas estacionarias, se han grabado distintos videos IR con una emisividad diferente cada una, y el juste de ε se ha realizado iterativamente e in situ. Para las pruebas transitorias en cambio, la emisividad ha ido variando al extraer la pieza del horno debido al enfriamiento y la oxidación atmosférica. Por ello, se define una secuencia para el cambio de la emisividad durante las grabaciones con la cámara FLIR A325 G®. En la primera tanda de pruebas transitorias con 700 °C de temperatura inicial, la secuencia que se ha seguido es 1 – 0,35 – 0,30 – 0,25 – 0,33 – 0,28 – 0,20 – 0,33 – 1. Intercalando secuencias de grabación con $\varepsilon = 1$, se consiguen temperaturas de referencia a lo largo del enfriamiento, que es precisamente lo que se ha realizado en la segunda de las pruebas transitorias. Aquí, la temperatura nominal del horno ha sido de 900 °C, y la secuencia del parámetro interno ε ha sido la siguiente: 1 – 0,35 – 0,30 – 1 – 0,28 – 0,25 – 0,22 – 1 – 0,20 – 1.

Los resultados que proporciona este método de calibración de la emisividad (método del taladrado de agujeros) en piezas de Ti₆Al₄V fabricadas por LMD-w son detallados en 4.1.2. Cabe destacar la coherencia de estos con respecto a los datos de la literatura [34], lo cual pone en evidencia la validez de la metodología que se ha seguido.

3. TAREA: Estimación de Temperaturas

El primer paso a la hora de estimar la temperatura real de la pieza con cámaras termométricas (T_{CR}) es el de la obtención de la emisividad (ε), para lo cual cabe la posibilidad de llevar a cabo una calibración como en la tarea anterior (Ver 2. Tarea). Sin embargo, como las características de mucho de los procesos productivos imposibilitan su aplicación de forma directa, se requieren de adaptaciones como las expuestas en el estado del arte (Ver 2.5.1).

Una vez que se tenga una idea sobre ε , se procede a la obtención la temperatura real (T_{CR}). En el caso del presente trabajo, se ha optado por un procedimiento basado en lo descrito en 2.5.2. A continuación, se detalla la metodología que se ha desarrollado para ello.

El procedimiento experimental consiste en la **construcción de paredes delgadas de material Ti₆Al₄V** mediante la tecnología LMD-w, lo cual se ha realizado en la celda robotizada de fabricación aditiva que se dispone en las instalaciones de Tekniker (Ver 3.3.2).

Entre los instrumentos que han sido empleados para la medición de temperaturas sin contacto destacan el **pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22[®]** (Ver subapartado B.1 de 3.3.5) y la **cámara termométrica FLIR A325 G[®]** (Ver subapartado B.2 de 3.3.5). Esta última opera en el rango espectral LWIR, por lo que su rango de temperaturas R2 es de $400 \div 1.200 \text{ } ^\circ\text{C}$ según los resultados de sus algoritmos internos (Ver 4.1.1). Por lo tanto, la metodología que se ha desarrollado para la estimación de temperaturas sólo es válida para el rango mencionado.

En cuanto a las características de los ensayos que se han llevado a cabo en esta tarea y en la siguiente (Ver 4. Tarea), cabe destacar la **ausencia de la cámara de atmósfera inerte** (Ver 3.3.2) debido a la imposibilidad de insertar la cámara FLIR A325 G[®] en su interior. A pesar de proteger la zona de aporte con argón (Ar), se observa una oxidación apreciable en las piezas fabricadas por LMD-w debido a la falta de control atmosférico que se ha tenido durante el proceso de aporte (Figura 103). Tal y como se ha comentado en 2.4.2, la generación de compuestos óxidos en la aleación Ti₆Al₄V se produce a partir de 20 ppm de concentración de oxígeno (O₂) a las temperaturas del proceso LMD. Consecuentemente, la emisividad y la correspondiente temperatura estimada se ven influenciadas (Ver 4.1.3).

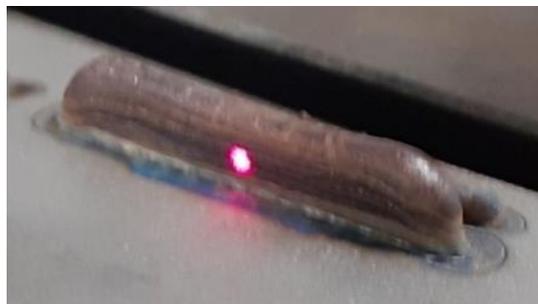


Figura 103: Colocación del puntero del pirómetro en cordón oxidado por a la falta de control atmosférico.

Asimismo, los ensayos de estas dos tareas comparten los parámetros del proceso que se muestran la Tabla 27, los cuales se mantienen constantes en todas las pruebas realizadas.

Tabla 27: Parámetros constantes para la determinación de ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Potencia del láser	P	2.500	W
Velocidad de avance del robot	v_R	25	mm/s
Velocidad del hilo	v_H	3,4	m/min
Rango R2 de la cámara	T_C	400* ÷ 1.200	$^{\circ}C$

* Saturación inferior impuesta (Ver 4.1.1).

A lo que se refiere al resto de los parámetros, en la Tabla 28 se muestran aquellos que se varían para las pruebas realizadas. Aquí, destacan la altura de capas (h_{cap}), el tiempo de espera entre cordones (t_{esp}) y la dirección de observación de la cámara (θ_c).

Tabla 28: Pruebas para la estimación de temperaturas.

Nº Prueba	$h_{cap}(mm)$	$t_{esp}(s)$	$\theta_c(^{\circ})$
1	0,80	0	0
2	0,80	0	0
3	0,90	0	0
4	0,90	10	0
5	1,00	10	0
6	1,06	6	0
7	1,00	6	0
8	1,00	6	0
9	1,00	3	0
10	1,00	1	0
11	1,00	3	15
12	1,00	6	15
13	1,00	3	45
14	1,00	6	45
15	1,00	6	45
16	1,00	3	45

Mediante la colocación del pirómetro en la dirección perpendicular a la superficie de medición, se obtiene la temperatura de referencia (T_p) a la que se tratará de ajustar la lectura de la cámara (T_c). Enfocando el puntero en la parte baja de la pared como se muestra en la Figura 103, se obtiene la evolución de T_p a lo largo del ciclo de calentamiento y enfriamiento durante el proceso de aporte de las paredes delgadas. En cuanto a la cámara, se hace variar la dirección de observación (θ_c) empezando con un ángulo de 90° (Figura 104) hasta los 45° aproximadamente con respecto a la normal de la superficie de la pared. Así, se pretende obtener la emisividad en cada dirección de observación, lo cual se caracteriza con lo que se denomina emisividad direccional ($\varepsilon(\lambda, T, \theta)$). El resultado de este procedimiento supone la obtención de un diagrama como la que se muestra en la Figura 88. En lo que respecta a este proyecto, el estudio se centra en la obtención la emisividad normal ($\varepsilon_n(\lambda, T)$), por lo que el análisis de la influencia de la direccional de observación en la emisividad (Ver subapartado D.1 de 2.3.2) queda fuera del alcance del trabajo y se plantea como una posible línea futura de investigación (Ver 5). Esto quiere decir que a partir de la prueba número 10 no se va a considerar en el presente estudio de $\varepsilon_n(\lambda, T)$.



Figura 104: Adquisición a 90° tanto del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® como la cámara FLIR A325 G® para la determinación de ciclos de calentamiento y enfriamiento de piezas de Ti_4Al_6V fabricados mediante LMD-w.

Para la estimación de la emisividad normal, se requiere de una selección de píxeles de las imágenes de la cámara que coincida con los puntos de lectura del pirómetro, es decir, el área del puntero sobre la pared. Este paso es de vital importancia a la hora de procesar los datos, dado que una variación entre la posición de ambas supone unos errores de medición de temperaturas apreciables. Por consiguiente, los ajustes de posición entre los instrumentos empleados para el tratamiento de las señales térmicas ha de ser realizado con sumo cuidado si se desean obtener valores de la emisividad de que ajusten al comportamiento real de la superficie analizada. Ha de decirse que el procedimiento desarrollado para la estimación de la emisividad normal es generalizable a cualquier proceso productivo donde la transferencia de calor se produzca por radiación (Ver 2.3.2) y se puedan realizar mediciones de temperatura sin contacto con instrumentos radiométricos (Ver 2.4.3).

Asimismo, la variación de los parámetros del proceso repercute en la adquisición de datos térmicos y en los correspondientes resultados, debido a la sensibilidad del ruido proveniente de las reflexiones (Ver 4.1.3). Aquí, destaca el tiempo de espera entre cordones (t_{esp}) por la necesidad de solidificación antes de comenzar la siguiente capa para evitar desprendimientos de material. Siendo esto así, los valores del parámetro t_{esp} que han sido empleado son 1s, 3s, 6s y 10s, lo cual supone la omisión de las tres primeras pruebas de la Tabla 28.

Una vez que se tienen la temperatura de referencia del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (T_p) y la temperatura original de la cámara FLIR A325 G® (T_o), se procede a la **corrección de temperaturas** de esta última con la fórmula (49) en base a los resultados de sus algoritmos internos (Ver 4.1.1). Tal y como se ha comentado en 2.5.2, las temperaturas corregidas (T_c) que han sido obtenidas de esta forma son las correspondientes al cuerpo negro (T_{bb}) por estar calibrado frente a un cuerpo negro ideal.

Posteriormente, se realiza un **postprocesado de los registros de temperatura** con el fin de ajustar las señales y hacer coincidir los instantes temporales. Así, se pretende representar los mismos fenómenos

térmicos en cada dato que se obtenga. Para ello, el primer paso consiste en remuestrear las señales con la misma frecuencia para tener la misma cantidad de datos en los registros obtenidos con cada instrumento. Luego, se lleva a cabo el ajuste del inicio de las señales según el inicio de funcionamiento del láser. Adicionalmente, se hacen terminar las señales en el mismo instante acortando la señal más larga al final de la más corta. Para terminar, se impone unos límites de saturación para garantizar la fiabilidad de los datos de temperatura obtenidos (Ver 3.4.2).

Admitiendo la **idealización del cuerpo gris** para las piezas de material Ti_6Al_4V fabricadas por el proceso LMD por hilo (Ver subapartado C.3 de 2.3.2), se supone que la emisividad es constante en todo el espectro, por lo que se desprecia la dependencia con respecto a la longitud de onda ($\varepsilon_n(T)$). Esto hace que sea posible considerar la idealización de la **termometría de la radiación total** con la fórmula (21) de Stefan-Boltzmann. Siguiendo el procedimiento descrito en el subapartado 2.5.2, se igualan las emisiones totales de radiación del cuerpo negro M_{bb} a las de la pieza M_s (*sample*) con el fin de obtener la emisividad de la pieza a partir de la expresión (48). La resolución se realiza por uno de los métodos de ajuste que se han desarrollado (Ver 3.4.2) debido a la serie de datos de temperatura que se tienen del pirómetro (T_p) y la cámara (T_c). Cambiando la dirección de observación de la cámara (θ_c), y repitiendo el procedimiento descrito hasta ahora, se conseguiría la emisividad direccional ($\varepsilon(T, \theta)$) para cada una de las direcciones de observación.

En caso de no admitir la idealización del cuerpo gris, no sería correcto aplicar la expresión (21) de la Ley de Stefan-Boltzmann debido a la variación de ε con respecto a la longitud de onda (λ). En este caso, sería necesario considerar la termometría de banda ancha con la expresión (47) para el tratamiento de las señales obtenidas de los instrumentos empleados. Tal y como se describe en 2.5.2, la resolución de dicha consideración se realiza numéricamente aumentando sustancialmente el coste computacional. Por consiguiente, resulta inviable su aplicación en la monitorización térmica in situ que se pretende llegar a conseguir en un futuro a través del presente trabajo (Ver 5).

Por lo tanto, se supone una **emisividad espectral constante y de mismo valor para toda la superficie de la pieza analizada**. De esta forma, resulta factible la aplicación de los algoritmos de cálculo que se han implementado para la corrección de temperaturas de la cámara FLIR A325 G® (Ver 3.4.2).

En realidad, la emisividad no presenta el mismo valor en toda la superficie debido a la influencia de diversos factores (Ver subapartado D.1 de 2.3.2). En caso de que se tuvieran datos sobre la distribución de ε por zonas gracias a instrumentos como el interferómetro FTIR [40], se podría adjudicar este valor iterativamente a cada punto con el fin de obtener la temperatura real en cada uno de los píxeles de las imágenes termográficas (Ver 2.5.2). Sin embargo, como no se dispone del instrumento mencionado (Ver 3.3), habría que repetir el procedimiento descrito hasta ahora apuntando el pirómetro en la zona deseada. Por consiguiente, este aspecto queda fuera del alcance de este trabajo (Ver 1.2), y se plantea como línea futura admitiendo la suposición mencionada (Ver 5).

El siguiente paso una vez que se tiene ε es el de la **obtención la temperatura real (T_{cR})**. Para ello, se realiza una corrección de temperaturas píxel por píxel (320×240 px) en cada una de las imágenes (fotogramas) que han sido capturadas. Al igual que se ha realizado para la obtención de la emisividad con la expresión (21) igualando M_s a M_{bb} , se obtiene la temperatura real del objeto directamente aplicando la expresión (48). Así, se llega a calcular T_{cR} de una forma sencilla y rápida, suponiendo la misma emisividad para todos los píxeles de cada fotograma.

4. TAREA: Determinación de los Ciclos de Calentamiento y Enfriamiento de la Pieza

La determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de cualquiera pieza fabricada por LMD requiere de un rango de temperaturas superior a la obtenida en la tarea anterior con una única cámara termométrica (Ver 3. Tarea). Esto es debido a la necesidad de tener información durante la mayor parte de la evolución térmica. Por consiguiente, se realiza una **combinación de instrumentos termométricos**, donde se incluyen pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5) y las cámaras termométricas FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) y OPTRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las temperaturas estimadas con la **cámara FLIR A325 G®** siguiendo la metodología desarrollada sólo son válidas para el rango $400 \div 1.200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ver 3. Tarea). Las que proporciona la **cámara OPTRIS PI 05 M®** en cambio, son superiores por trabajar en el rango espectral visible (VIS). Concretamente, su rango de temperaturas es de $900 \div 2.450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En este sentido, la superposición de temperaturas supone ampliar el rango a $400 \div 2.450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se tienen datos redundantes entre $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

La parte experimental de esta tarea tiene aspectos en común con la anterior para la estimación de temperaturas (Ver 3. Tarea), donde todos los ensayos se han realizado **sin la cámara de atmósfera inerte** (Ver 3.3.2). Consecuentemente, las piezas de $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ fabricadas por el proceso LMD-w presentan una oxidación acusada (Figura 103). Además, los **parámetros del proceso** que se muestran en la Tabla 27 también permanecen constantes, mientras que los de la siguiente tabla son variados con el fin de llevar a cabo distintas pruebas:

Tabla 29: Pruebas para la determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza.

Prueba	$n_{\text{capas}}(-)$	$t_{\text{esp}}(s)$	$\epsilon_{\text{optris}}(-)$	$\theta_{\text{optris}}(^{\circ})$
1	1	0	1	0
2	1	0	1	0
3	4	5	1	0
4	8	5	1	0
5	4	3	1	0
6	20	3	1	0
7	4	6	1	0
8	20	6	1	0
9	4	10	1	0
10	20	10	1	0
11	4	3	0,3	0
12	20	3	0,3	0
13	4	6	0,3	0
14	20	6	0,3	0
15	4	10	0,3	0
16	20	10	0,3	45
17	4	3	0,3	45
18	20	3	0,3	45
19	4	6	0,3	45
20	20	6	0,3	45

Al igual que en la tarea anterior, el pirómetro IMPAC y la cámara FLIR A325 G[®] han sido colocados a 90° en una posición segura fuera de la zona de trabajo de forma estática (Figura 104). Sin embargo, la cámara OPTRIS PI 05 M[®], ha sido integrada en el cabezal COAXwire[®] de *Fraunhofer IWS* (Figura 23, Izq.) formando 60° con la dirección vertical del haz láser (Figura 105), lo cual proporciona imágenes IR de la zona de aporte a lo largo de las trayectorias del registro de posición ejecutados por el robot *ABB* (Figura 108). Asimismo, se ha hecho uso de un escáner con el fin de ejecutar el control de posición mediante una monitorización dimensional y geométrica (Ver 2.2.1). Este aspecto no es objeto de estudio del presente trabajo, por lo que su análisis queda fuera del alcance de este proyecto (Ver 1.2).

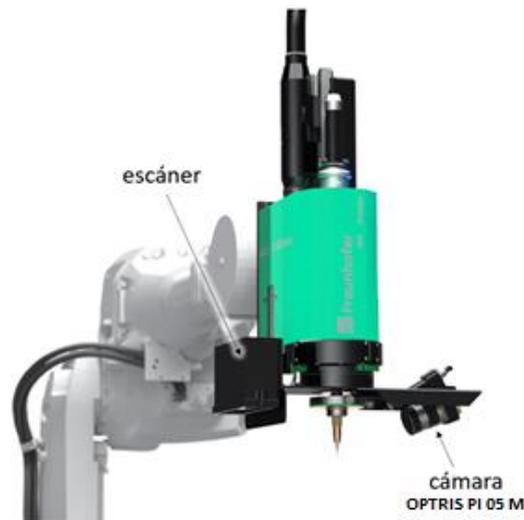


Figura 105: Integración a 60° de la cámara OPTRIS PI 05 M[®] en el cabezal COAXwire[®] de Fraunhofer IWS.

La metodología que se ha seguido en esta cuarta tarea es similar a la tercera (Ver 3. Tarea), con la particularidad de incluir el uso de la cámara OPTRIS PI 05 M[®]. Por lo tanto, el procedimiento experimental consiste en la **construcción de paredes delgadas de material Ti₆Al₄V mediante la tecnología LMD-w** en la celda robotizada de fabricación aditiva sin la cámara de atmósfera controlada (Ver 3.3.2). Así, se realiza la adquisición de imágenes térmicas con estos instrumentos en la disposición mencionada, y se plantea como línea futura la posibilidad de insertar el pirómetro y la cámara FLIR A325 G[®] dentro de una cámara o bolsa de atmósfera inerte más grande con el fin de evitar la oxidación de las piezas resultantes (Ver 5).

En el caso de los datos que proporciona la cámara OPTRIS PI 05 M[®], el formato de exportación es RAVI y su integración ha sido realizada en el cabezal de aporte (Figura 105). Por consiguiente, resulta necesario un **procesado de sus videos IR** con el fin de conseguir el mismo campo visual con las dos cámaras y poder así ampliar el rango de temperaturas superponiendo los datos obtenidos. Para ello, se emplea el software PIX Connect[®] de *OPTRIS GmbH* (Ver subapartado B de 3.3.6), que ofrece la posibilidad de realizar la adquisición de datos puntuales a partir de perfiles de temperatura lineales a posteriori, es decir, postprocesando los datos térmicos una vez que se hayan adquirido las imágenes térmicas. El procedimiento que se ha desarrollado para ello es detallado en el subapartado de cálculos y algoritmos para el procesado de videos IR de OPTRIS PI 05 M[®] (Ver 3.4.3). Asimismo, el procedimiento implementado para la ampliación del rango de temperaturas está descrito en 3.4.4. Así, los resultados científico-técnicos de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza son expuestos en 4.1.3.

5. TAREA: Determinación del Tamaño y Distribución de Temperaturas en el Baño Fundido

Por último, se ha llevado a cabo una tarea adicional con el fin de determinar el tamaño y distribución de temperaturas en el baño fundido (*melt pool*). Tal y como se ha visto en el subapartado 2.4 del estado del arte, las mediciones a altas temperaturas presentan ciertas particularidades que dificulta la obtención de resultados precisos por la presencia de muchas fuentes de incertidumbre. Entre ellas destacan los cambios de fase del material (Ver 2.4.1) y la evolución de la emisividad (Ver 2.4.2). Además, la imposibilidad de realizar mediciones de temperaturas elevadas por contacto hace que sea necesario el empleo de instrumentos como los pirómetros (Ver subapartado A de 2.4.3) y las cámaras termométricas (Ver subapartado B de 2.4.3).

En este sentido, se ha planteado una tanda de ensayos en la **máquina de fabricación aditiva TITAN®** (Ver 3.3.3) que ha sido diseñada y fabricada íntegramente por *Tekniker*. Este dispone de un **pirómetro de dos colores integrado de forma coaxial en el cabezal CoaxPrinter®** de *Precitec GmbH & Co. KG* (Figura 23, Drcha.) que tiene un rango de $600 \div 2.300 \text{ }^\circ\text{C}$. Tomando su medida como referencia, se sigue la metodología desarrollada para la estimación de temperaturas en el baño fundido (Ver 3. Tarea). Para ello, se hace uso de la **cámara OPTRIS PI 05 M®** (Ver subapartado B.3 de 3.3.5). Adicionalmente, se dispone de la **cámara FLIR A325 G®** (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) con el fin de ampliar el rango de temperaturas y poder así determinar los ciclos de calentamiento y enfriamiento de una forma más precisa siguiendo el procedimiento de la tarea anterior (Ver 4. Tarea).

La razón por la que se ha optado por el pirómetro coaxial en lugar de la IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5) reside en la mayor precisión que proporciona al realizar mediciones de temperaturas elevadas como los que se dan en el baño fundido. Al ejecutar la lectura de temperaturas de forma lateral como se ha hecho hasta ahora con el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Figura 104), la fuente de incertidumbre procedente de las reflexiones exteriores aumenta. Colocando un instrumento semejante en una configuración coaxial en cambio, las mediciones de temperatura son de mayor precisión, además de ofrecer una accesibilidad superior en la zona de aporte.

Por otra parte, está la cámara FLIR A325 G® que ha sido sustituida por la **OPTRIS PI 05 M® para la estimación de temperaturas** debido al rango que ofrecen. Las mediciones de altas temperaturas sin contacto requieren de instrumentos radiométricos que trabajan en longitudes de onda inferiores (Tabla 8), y la cámara OPTRIS PI 05 M® opera en el rango espectral visible (VIS) mientras que la FLIR A325 G® lo hace en LWIR. Por consiguiente, las temperaturas que proporciona OPTRIS PI 05 M® son superiores, siendo su rango de $900 \div 2.450 \text{ }^\circ\text{C}$. Así, las mediciones de la **cámara FLIR A325 G®** no son empleadas para estimación de temperaturas, sino **para la ampliación del rango** de forma complementaria. Asimismo, se pretende realizar un **análisis de la influencia de la longitud de onda en la emisividad del baño fundido** combinando cámaras que operan en distintos rangos espectrales.

Siguiendo un procedimiento similar a la descrita para la estimación de temperaturas de la pieza (Ver 3. Tarea), se consigue estimar la emisividad y la correspondiente temperatura del baño fundido. En el caso del presente TFM, esta tarea ha planteado ciertos problemas técnicos a la hora de operar con el pirómetro de dos colores con la integración coaxial. Por consiguiente, no se han podido obtener los resultados deseados y se plantea como una línea futura (Ver 5).

3.2. Planificación

En el presente subapartado se muestra la planificación que se ha seguido para llevar a cabo el TFM. Así, se especifican las **fases** (Ver 3.2.1) e **hitos** (Ver 3.2.2) del proyecto, así como el **diagrama de Gantt** correspondiente (Ver 3.2.3).

3.2.1. Fases del Proyecto

1. Revisión Bibliográfica

En esta primera fase, se realiza una búsqueda de las referencias bibliográficas para adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo del proyecto. Empezando por las distintas tecnologías de fabricación aditiva (FA) donde se centra en el proceso *Laser Metal Deposition* (LMD), pasamos a los conceptos radiométrico. Aquí, resulta necesario ahondar en las teorías de la radiación infrarroja, además de los instrumentos para su medición. Adicionalmente, se hace una búsqueda de información sobre trabajos relacionados con la medición de temperaturas en procesos LMD. De esta forma se pretende tener una idea más general de la metodología que se puede implementar en cada caso, así como las adaptaciones que son necesarias para la aplicación del presente trabajo.

Duración (A1): 90 días.

2. Ensayos Experimentales

En cuanto a la parte experimental, se distinguen diferentes ensayos con el fin de comprobar los instrumentos empleados y verificar distintos aspectos del proceso FA mencionado.

Duración (A2): 25 días.

Actividad 2.1: Para empezar, se ejecutan la integración de los instrumentos radiométricos. La solución adoptada para cada instrumento podría variar, por lo que la utilización de usillos específicos resulta necesaria, y es por ello que se hace uso de impresoras 3D. Así, se construyen piezas tridimensionales en materiales poliméricos para la colocación y sujeción de instrumentos termométricos (Ver 3.3.5). En el caso del presente trabajo, esto es lo que se ha hecho para la integración de la cámara termométrica OPTRIS PI 05 M® en el propio cabezal de aporte (Figura 105). El resto de los instrumentos, entre los cuales destacan la cámara FLIR A325 G® y el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®, han sido instalados en una posición segura fuera de la zona de trabajo (Figura 104).

Duración (A 2.1): 5 días.

Actividad 2.2: Una vez integrado los instrumentos en la posición que se considere más adecuada para cada caso de aplicación, se procede a la ejecución de los ensayos necesarios. Como primer paso se llevan a cabo pruebas de puesta en marcha para comprobar la validez de la solución adoptada. Además, se obtiene conocimiento sobre el formato de exportación de datos que tiene cada instrumento, así como sus conexiones analógicas y digitales.

Duración (A 2.2): 3 días.

Actividad 2.3: Posteriormente, se trata de conseguir los algoritmos internos de cada una de las cámaras empleadas para realizar la monitorización térmica desde Matlab®. Para ello, se llevan a cabo distintas tandas de ensayos variando los parámetros internos de la cámara en cuestión, y comprobando cada uno de los rangos y modos de ejecución (Ver 1. Tarea).

Duración (A 2.3): 5 días.

Actividad 2.4: Una vez que se tiene el conocimiento sobre el funcionamiento interno de las cámaras termométricas se procede a la obtención de la emisividad con el fin de tener una idea sobre la misma y poder contrastar con los valores que se obtienen con la metodología desarrollada en la actividad posterior. Para ello, se lleva a cabo una calibración según el método del taladrado de agujeros con la cámara FLIR A325 G® (Ver 2. Tarea).

Duración (A 2.4): 3 días.

Actividad 2.5: Como siguiente ensayo, se realiza el aporte de paredes delgadas, donde se ejecuta el análisis de la distribución térmica mediante la cámara FLIR A325 G®. Variando distintos parámetros del proceso, se desarrolla una metodología que permite estimar temperaturas considerando variaciones en la emisividad del material en cuestión (Ver 3. Tarea).

Duración (A 2.5): 3 días.

Actividad 2.6: Una vez se haya controlado la utilización de la cámara FLIR A325 G®, se realiza una combinación de instrumentos radiométricos para superponer la información, y poder así ampliar el rango de temperaturas. Consecuentemente, se consigue ampliar el campo de visión analizable de la pieza de interés, lo cual permite la determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de las piezas fabricadas. Para ello, se hace uso del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® y las cámaras termométricas FLIR A325 G® y OPTRIS PI 05 M® (Ver 4. Tarea).

Duración (A 2.6): 5 días.

Actividad 2.7: Por último, se plantea una tanda de ensayos en la máquina TITAN® de *Tekniker* con el fin de estimar el tamaño y la distribución térmica del baño fundido (*melt pool*). La razón por la que se ha optado por esta máquina de FA reside en su integración coaxial del pirómetro de dos colores, la cual proporciona mediciones de temperaturas en el baño fundido de forma más precisa que la configuración lateral. Tal y como se ha mencionado anteriormente en la descripción de la tarea correspondiente (Ver 5. Tarea), se han tenido algunos problemas técnicos a la hora de operar con este instrumento termométrico que han imposibilitado obtención de unos resultados satisfactorios. Consecuentemente, esta actividad es planteado como una línea de investigación que se podía abordar en un futuro (Ver 5).

Duración (A 2.7): 4 días.

3. Programación del Código

A medida que se ejecuten los ensayos anteriores, se trabaja en la parte de programación con el fin de solucionar los problemas que se van encontrando y satisfacer las necesidades de cada caso. La herramienta utilizada para el presente trabajo ha sido Matlab® [82], donde se ejecutan las funciones necesarias con el fin de realizar una monitorización térmica adecuada del proceso LMD.

Duración (A3): 150 días.

Actividad 3.1: El primer paso dentro de la programación consiste en la importación de los datos térmicos obtenidos mediante distintos instrumentos termométricos. Para ello, se tienen en cuenta los formatos de exportación a partir de la actividad 2.2.

Duración (A 3.1): 15 días.

Actividad 3.2: Posteriormente, se procede al ajuste de las señales con el fin de asemejar cada fenómeno que se detecta con cada instrumento. De esta forma, se consigue una sincronización de las distintas fuentes de datos.

Duración (A 3.2): 30 días.

Actividad 3.3: Una vez completada la actividad 2.3, se procede a la implementación de algoritmos internos de las cámaras con el fin de desarrollar una herramienta propia en Matlab®. Así, se pretende crear una herramienta alternativa con la misma funcionalidad que los softwares de los instrumentos en cuestión.

Duración (A 3.3): 45 días.

Actividad 3.4: A continuación, se trata de procesar las imágenes térmicas mediante las herramientas específicas que ofrece Matlab®. El resultado de dicha tarea es la generación de datos y diagramas representativas de los fenómenos térmicos.

Duración (A 3.4): 45 días.

Actividad 3.5: Para terminar, se procede a la obtención del código que permita la determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de las piezas que han sido fabricadas por LMD, lo cual es el objetivo final del TFM (Ver 1.2).

Duración (A 3.5): 60 días.

4. Redacción de la Memoria

Para terminar, está la parte de la recopilación escrita de todo el trabajo que se ha realizado. Para ello, se redacta una memoria, donde se detallan las bases teóricas, la metodología adoptada y el análisis de resultados del proyecto, entre otros aspectos. Al igual que la actividad anterior de programar, el desarrollo de esta ha tenido que ser compaginada con otras actividades como la búsqueda bibliográfica y la ejecución de los ensayos experimentales.

Duración (A4): 60 días.

3.2.2. Hitos del Proyecto

En cuanto a los hitos que se han estipulado para la ejecución del presente trabajo, se ha dividido en distintas partes con el fin de ir completando objetivos parciales durante el desarrollo del mismo. En la Tabla 30, se muestran los hitos adoptados para el caso de este TFM con sus respectivas fechas de ejecución aproximadas:

Tabla 30: Hitos del Trabajo de Fin de Máster.

Ref.	Concepto	Fecha
H1	Integración de sensores para la aplicación de monitorización	Semana 6
H2	Determinación de algoritmos internos de cámaras infrarrojas (IR)	Semana 9
H3	Calibración de la emisividad	Semana 10
H4	Definición de metodología para la determinación de ciclos térmicos	Semana 12
H5	Programación del código	Semana 24
H6	Redacción de la memoria	Semana 26
H7	Entrega de la documentación	Semana 27
H8	Defensa del Trabajo Fin de Máster (TFM)	Semana 28

3.2.3. Diagrama de Gantt

En base al diagrama de Gantt que se muestra en la Figura 106, la duración estimada del proyecto es de 210 días aproximadamente, lo cual equivale a 7 meses de trabajo.

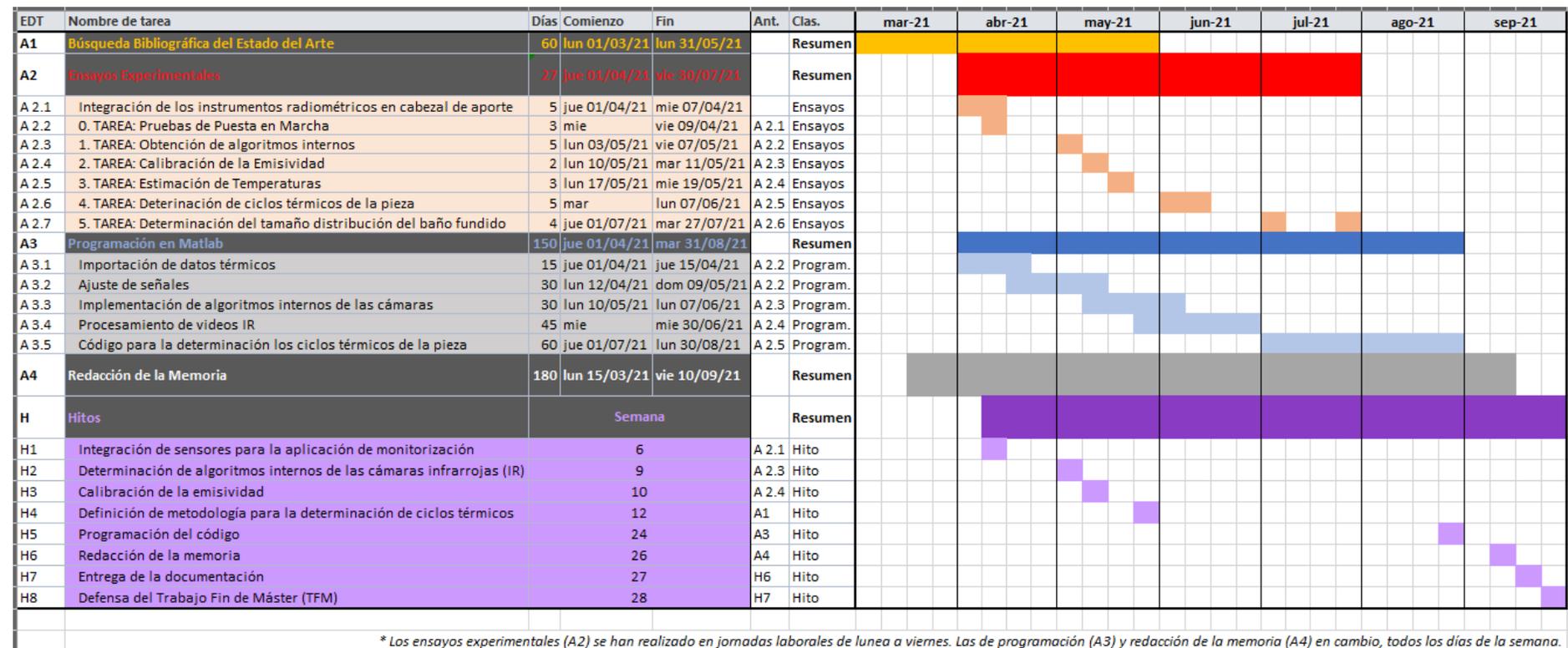


Figura 106: Diagrama de Gantt del proyecto.

3.3. Material e Instrumentos

El material y los instrumentos que se ha utilizado para la realización del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) son los siguientes:

3.3.1. Material de Aporte

El material de aporte que ha sido empleado es la aleación Ti_6Al_4V , donde su composición química es detallada en la siguiente tabla:

Tabla 31: Composición química del material Ti_6Al_4V [43].

Elemento	Al	V	O	N	H	Fe	C	Ti
Composición (wt%)	5,97	4,04	0,195	0,036	0,010	0,24	0,061	Bal.
ASTM F136	5,5-6,75	3,5-4,5	<0,2	<0,05	<0,015	<0,3	<0,08	Bal.

Entre sus propiedades destacan la soldabilidad y la resistencia a la corrosión, así como la ligereza. Además, se trata de un material biocompatible que permite ser utilizado en implantes medicinales. En la Tabla 32 se muestran las propiedades físicas y mecánicas de piezas de Ti_6Al_4V fabricadas por LMD:

Tabla 32: Propiedades físicas y mecánicas de piezas de Ti_6Al_4V fabricadas por LMD [43], [83], [84].

Soldabilidad		✓
Resistencia a la Corrosión		✓
Biocompatibilidad		✓
Ligereza		✓
Densidad		4,41 g/cm ³
Punto de Fusión		1.670 °C
Tamaño de Poros		< 100 μm
Ratio de Poros		< 0,1 %
Dureza		Min. 300 HV10
Tensión de Rotura (UTS)	Horizontal (XY)	992,8 MPa
	Vertical (Z)	956,8 MPa
Tensión de Fluencia (YD)	Horizontal (XY)	922,6 MPa
	Vertical (Z)	868,0 MPa
Módulo de Young	Horizontal (XY)	110 GPa
	Vertical (Z)	100 GPa
Elongación a la Rotura	Horizontal (XY)	8,0 %
	Vertical (Z)	13,8 %

Como las aplicaciones están dirigidas al proceso LMD-w, el suministro se realiza en forma de bobinas, donde el diámetro del hilo que se ha empleado es de 1,2 mm (Figura 107, Izq.). En la parte derecha de la Figura 107 se muestra la integración de dicha bobina en el alimentador de hilo.



Figura 107: Bobina de Ti_6Al_4V (Izq.) y su montaje en el alimentador de hilo (Drcha.).

3.3.2. Celda Robotizada de Fabricación Aditiva LMD-w

La celda robotizada está compuesta por el brazo robótico IRB 4600® (Figura 108, Izq.) y el posicionador IRBP A® (Figura 108, Drcha.) de ABB. Combinando el movimiento de estos dispositivos cinemáticos, se consiguen 8 grados de libertad [85], [86].



Figura 108: Posicionador IRBP A® (Izq.) [85] y brazo robótico IRB 4600® de ABB (Drcha.) [86].

Con el fin de utilizar este mecanismo en la aplicación de fabricación aditiva, se han integrado el cabezal de aporte COAXwire® de Fraunhofer IWS (Figura 23, Izq.) y el alimentador de hilo en el brazo robótico (Figura 109, a). Además, se dispone de una cámara de atmósfera inerte (Figura 109, b) con el fin de evitar la generación de óxidos durante el proceso de aporte, que en el caso del material Ti_6Al_4V (Ver 3.3.1) se establecen una concentración de oxígeno por debajo de 20 ppm como requisito de calidad.

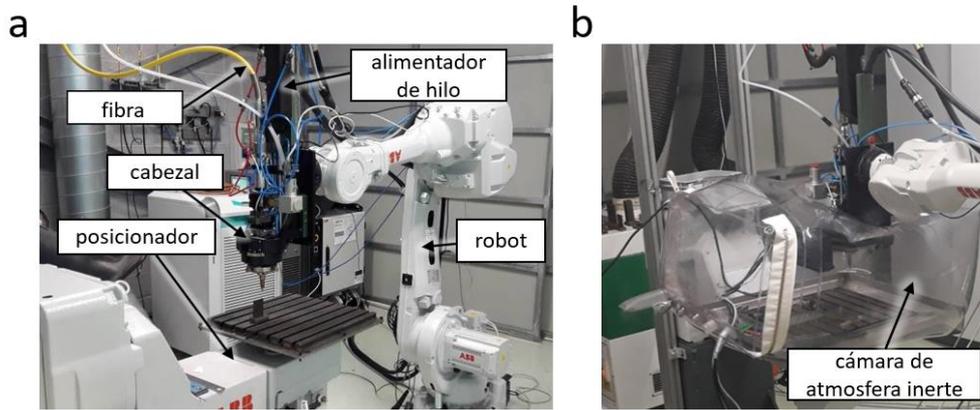


Figura 109: Celda robótico de 8 GDL de ABB: a) Alimentador de hilo, cabezal, fibra, posicionador y robot; b) Cámara de atmósfera inerte [19].

3.3.3. Máquina TITAN®

Adicionalmente, Tekniker dispone de la máquina TITAN® (Figura 110) que está diseñada y fabricada en el propio centro con el fin de producir piezas de grandes dimensiones dirigidas al sector aeronáutico. Esta máquina de FA presenta las siguientes características:

Tabla 33: Especificaciones técnicas de la máquina TITAN® de Tekniker.

Tecnología de FA	LMD-w
Grados de libertad	3+2
Láser	CW 4 KW Yb fiber laser, 1070 nm
Cabezal de aporte	CoaxPrinter® de Precitec GmbH & Co. KG (Figura 23, Drcha.)
Instrumentación auxiliar	Pirómetro de dos colores para rangos de 600 ÷ 2.300 °C apto para medición de temperaturas en el baño fundido (MP) gracias a la integración coaxial
Volumen de trabajo	1900 x 900 x 750 mm
Control atmosférico	Cámara de vacío (< 4 ppm) o atmósfera inerte (Ar y He)
Monitorización y control	Geométrico y térmico

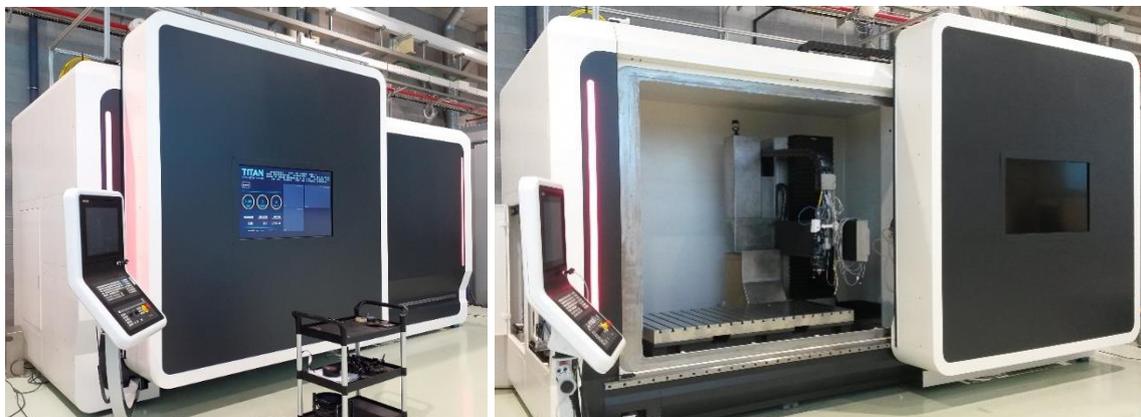


Figura 110: Máquina TITAN® de Tekniker con la puerta cerrada (Arriba) y abierta (Abajo).

3.3.4. Instrumentos Calefactables

Dentro de los instrumentos calefactables que se han utilizado para la realización de las tareas de la metodología adoptada (Ver 3.1), están la **mesa térmica** (Figura 111, Izq.) y el **horno calefactable** (Figura 111, Drcha.) con capacidades de 600 °C y 1.100 °C respectivamente.

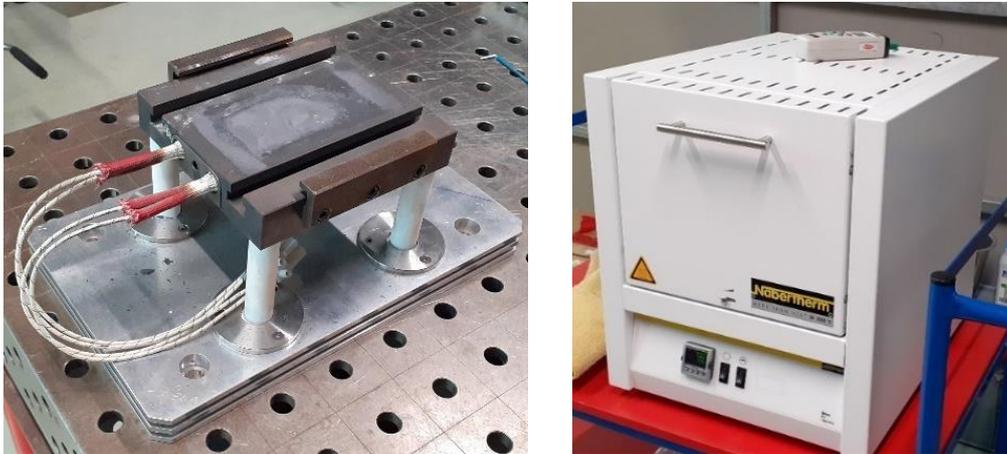


Figura 111: Mesa térmica (Izq) y horno calefactable (Drcha).

3.3.5. Instrumentos Termométricos

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.3, las mediciones de temperaturas se realizan por contacto en base a la conducción de calor (Ver 2.3.1) o sin contacto a través de la medición de la radiación emitida (Ver 2.3.2). A continuación, se describen cada uno de los instrumentos termométricos que se disponen, entre los cuales están los **instrumentos termométricos que funcionan por contacto** (Ver A) y los **instrumentos radiométricos que funcionan sin contacto** (Ver B):

A. Instrumentos Termométricos que Funcionan por Contacto

El termopar que se ha empleado para la realización de las tareas de la metodología adopta (Ver 3.1) es de tipo K, cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 34: Especificaciones del termopar de tipo K [87].

ESPECIFICACIONES	
Rango	-200 ÷ 1.250 °C
Error	0,75 ÷ 2,2 °C a 0 °C 2% bajo 0°C
Ambiente	Oxidante e inerte
Elemento positivo	Níquel-Cromo (Cromel)
Elemento negativo	Níquel-Aluminio (Alumel)
Magnéticamente sensible	Níquel-Cromo (Alumel)

B. Instrumentos Radiométricos que Funcionan sin Contacto

Los instrumentos termométricos que funcionan sin contacto en base a la medición de la radiación como mecanismo de transmisión de calor son denominados instrumentos radiométricos. En el caso del presente trabajo, se disponen de tres dispositivos de este tipo: El **pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®** (Ver B.1), las **cámaras infrarrojas FLIR A325 G®** (Ver B.2) y **OPTRIS PI 05 M®** (Ver B.3).

B.1. Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®

El pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Figura 112) presenta las características que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 35: Especificaciones técnicas del Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® [88].

MEDICIONES	
Rangos de temperatura	500 ÷ 2.200 °C
Procesamiento de señales	Corriente fotoeléctrica, digitalizado
Rango espectral	$\lambda_1=1,28 \mu\text{m} / \lambda_2=1,65 \mu\text{m}$
Modos de medición	2-color-mode, Mono-mode y Metal-mode
ENTRADAS Y SALIDAS (I/O)	
Alimentación	24 V DC o 24 V AC, 48 ÷ 64 Hz
Consumo máximo de potencia	10 W
Salida analógica	0÷20 mA o 4÷20 mA, 0÷500 Ω
Interfaz digital	RS232 o RS485, baud rate 2,4÷115,2 kBd
Resolución	Display: 1 °C Interfaz: 0,1 °C Salida analógica: <0,025 % del rango de temperaturas
Tiempo de exposición t_{90}	2 ms, ajustable a 0,01s, 0,05s, 0,25s, 1s, 3s y 10s

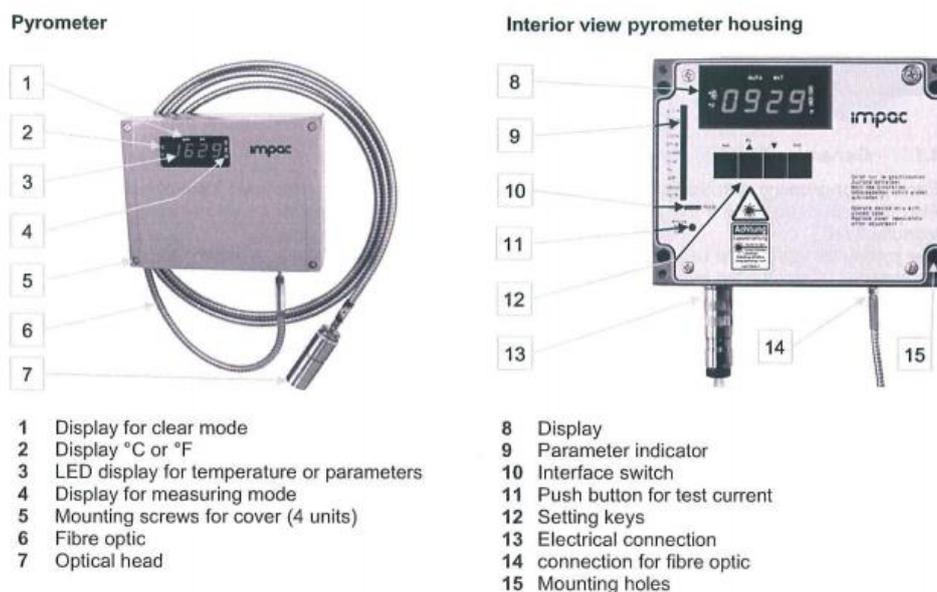


Figura 112: Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® [88].

B.2. Cámara FLIR A325 G®

En la Tabla 36 se detallan las especificaciones técnicas de la cámara FLIR A325 G® (Figura 113) que han sido extraídas de las referencias [89]:

Tabla 36: Especificaciones técnicas de la cámara FLIR A325 G®.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	
Campo de visión	25° x 18,8° / 0,4m
Enfoque	Auto-focus o Manual
Tipo de detector	Focal Plane Array (FPA), Microbolómetro sin refrigeración
Rango espectral	7,5 ÷ 13,0 µm (LWIR)
Resolución	320 x 240
Frecuencia de muestreo	60 Hz con resolución completa
MEDICIONES	
Rangos de temperatura	R0: -20 / 120 °C R1: 0 / 350 °C R2: 0 / 1.200 °C
Sensibilidad térmica	70 mK (a 30 °C)
Precisión	±2 °C con ±2 %
ENTRADAS Y SALIDAS (I/O)	
Alimentación	Adaptador AC 110/220VAC 50/60Hz
Salida digital	Gigabit Ethernet- 1000 Mbit. 16 bits radiométricos
Correcciones de medidas	Reflexiones, Distancia, Humedad relativa y Óptica externa
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Peso	0,7 kg
Dimensiones	170 x 70 x 70 mm
Anclaje	2 x M4 en tres lados



Figura 113: Cámara FLIR A325 G® [89].

B.3. Cámara OPTRIS PI 05 M®

La siguiente tabla muestra las especificaciones técnicas obtenidas de la referencia [90] para la cámara infrarroja OPTRIS PI 05 M® (Figura 114):

Tabla 37: Especificaciones técnicas de la cámara OPTRIS PI 05 M®.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	
Campos de visión	26° x 16° / 25 mm (764 x 480 px) 13° x 10° / 25 mm (382 x 288 px)
Enfoque	Auto-focus o Manual
Tipo de detector	CMOS (15 x 15 µm)
Rango espectral	500 ÷ 540 nm (VIS)
Resolución	764 x 480 (32 Hz) 382 x 288 (80 Hz) 72 x 56 (1 kHz) 764 x 8 (1 kHz)
Frecuencias de muestreo	27 Hz 32 Hz 80 Hz 1 kHz
MEDICIONES	
Rangos de temperatura	R0: 900 / 2.450 °C (27 Hz) R1: 950 / 350 °C (32 / 80 Hz) R2: 1.100 / 2.450 °C (1 kHz)
Sensibilidad térmica	<2 K (a 1.400 °C)
Precisión	±1 % (<2.000 °C) / ±1.5 % (>2.000 °C)
ENTRADAS Y SALIDAS (I/O)	
Alimentación	Por USB
Salida digital	USB 2.0 / USB-GigE (PoE) opcional
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Peso	245 - 311 g (Dependiendo de la óptica)
Dimensiones	46 x 56 x 88-129 mm (Dependiendo de la óptica)
Anclaje	¼ - 20 UNC



Figura 114: Cámara OPTRIS PI 05 M® [90].

3.3.6. Softwares

En cuanto a los softwares que han sido necesarios para la ejecución del presente trabajo, destacan **ThermaCAM Researcher**[®] (Ver A) y **PIX Connect**[®] (Ver B) de las cámaras IR, y **Matlab**[®] (Ver C).

A. ThermaCAM Researcher[®]

El software ThermaCAM Researcher[®] de *FLIR Systems* permite las siguientes posibilidades [91]:

- ✓ Conexión entre cámara y PC a través de interfaz Gigabit Ethernet.
- ✓ Visualización, análisis y registro de imágenes almacenadas o en tiempo real.
- ✓ Posibilidad de comparación entre imágenes a través de resta de imágenes.
- ✓ Control de todas las funciones de la cámara desde PC externo.
- ✓ Grabación de imágenes en el disco duro del PC con 60 *Hz* de frecuencia de muestreo.
- ✓ Incorporación de funciones de análisis en la imagen IR:
 - 99 puntos.
 - 99 perfiles.
 - 99 áreas.
 - 10 isoterma.
- ✓ Posibilidad de modificación de todos los parámetros del objeto tanto de la imagen completa como de puntos individuales:
 - Emisividad.
 - Distancia.
 - Temperatura ambiente reflejada.
 - Temperatura atmosférica.
 - Humedad relativa.
 - ...
- ✓ Exportación de imágenes en distintos formatos:
 - Bitmap.
 - AVI.
 - Matlab.
 - ASCII.
- ✓ Posibilidad de vincular con programas como hojas de cálculo y bases de datos del entorno Windows.
- ✓ Exportación de los resultados cuantitativos a Excel.

B. PIX Connect®

Las principales características del software PIX Connect® de *OPTRIS GmbH* son las que se detallan a continuación [92]:

- ✓ No hay límite en la concesión de licencias.
- ✓ Visualización de imágenes a tiempo real.
- ✓ Análisis y post procesado de imágenes y videos almacenadas.
- ✓ Posibilidad de muestrear las imágenes con una frecuencia de hasta 1 *kHz*.
- ✓ Completo control remoto de la cámara termográfica.
- ✓ Control automático del proceso.
- ✓ Variedad de funciones para analizar las imágenes almacenadas:
 - Puntos.
 - Perfiles.
 - Áreas de distintas geometrías.
 - Isotermas.
 - Histogramas.
 - Diagramas temporales.
 - Alarmas de aviso.
 - Reducción de fotogramas.
- ✓ Posibilidad de modificación de todos los parámetros del objeto tanto de la imagen completa como por zonas:
 - Emisividad.
 - Transmisividad.
 - Temperatura ambiente.
- ✓ Variedad de formatos para la grabación:
 - Video.
 - Video de la señal radiométrica.
 - Captura de imágenes.
- ✓ Un amplio análisis en conexión (online) y sin conexión (offline).
- ✓ Documentación y análisis de los datos de temperatura.

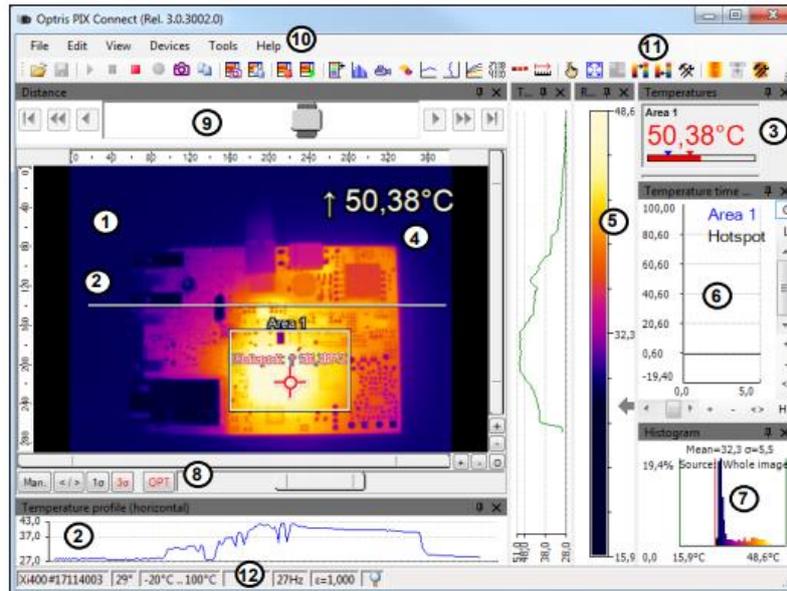


Figura 115: Interfaz del Software Optris PIX Connect © [92].

C. Matlab®

Matlab® es una herramienta de programación de *MathWorks* dirigida a aplicaciones científicas de ingeniería, que presenta las siguientes características [82]:

- ✓ Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería basado en el álgebra de matrices.
- ✓ Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- ✓ Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- ✓ Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control y muchas otras tareas.
- ✓ Herramientas complementarias (*Toolboxes*) para una amplia variedad de aplicaciones científicas e ingenieriles.
- ✓ Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- ✓ Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft Excel®.
- ✓ Opciones de implementación libres de derechos para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales.

3.4. Cálculos y Algoritmos

En el presente subapartado se detallan los cálculo y algoritmos que se han implementado en Matlab® siguiendo los objetivos que han sido expuesto en 1.2. Primero, se presenta la **implementación de algoritmos internos de las cámaras** (Ver 3.4.1), seguido de la metodología que se ha desarrollado para la **corrección de temperaturas de la cámara FLIR A325 G®** (Ver 3.4.2). Posteriormente, se describe el **procesado de videos IR de la cámara OPTRIS PI 05 M®** (Ver 3.4.3). Para terminar, se expone la metodología para la **ampliación del rango de temperaturas** (Ver 3.4.4).

3.4.1. Implementación de Algoritmos Internos de las Cámaras

El primer paso a la hora de procesar los datos obtenidos de las cámaras es la aplicación de algoritmos de cálculo que corresponde a compensaciones internas. De esta forma, se realizan las conversiones necesarias para conseguir las temperaturas de salida.

En base a los resultados de la primera tarea (Ver 4.1.1), el modo de procesamiento de señales que ha sido seleccionada para la **cámara FLIR A325 G®** (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) es el *Temperature Linear Mode* ($IRFormat = 1$). Por consiguiente, la conversión de la temperatura original (T_o) a la temperatura de salida de la cámara (T_c) se realiza en base a la fórmula (38). Despreciando el ajuste del rango ($IRAlignment = 0$), llegamos a la siguiente expresión que ha sido implementado en Matlab® en unidades de grados centígrados ($^{\circ}C$):

$$T_c = 0,1 \cdot T_o \quad (49)$$

Por otra parte, está la **cámara OPTRIS PI 05 M®** (Ver subapartado B.3 de 3.3.5). Tal y como se ha mencionado en la tarea correspondiente (Ver 1. Tarea), la adquisición de datos ha sido realizada a través del software PIX Connect® de *OPTRIS GmbH* (Ver subapartado B de 3.3.6). Por consiguiente, no ha sido necesario la implementación de algoritmos internos para la compensación de temperaturas, dado que es el propio software lo que considera dicho aspecto. Sin embargo, la obtención de la distribución térmica ha tenido que ser procesada con perfiles de temperatura lineales; por lo que, la labor de postprocesado de los videos IR que se obtiene con esta cámara supone mayor coste computacional que la cámara FLIR A325 G® (Ver 3.4.3). Esto es debido al formato de exportación del software mencionado, así como la necesidad de adaptar el campo de visión del baño fundido (*melt pool*) que proporciona la cámara OPTRIS PI 05 M® al realizar la integración en el cabezal de aporte formando 60° respecto a la dirección vertical del haz láser (Figura 105).

3.4.2. Corrección de Temperaturas de FLIR A325 G®

Una vez que se tiene la temperatura de salida (T_c) de la cámara FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5), resulta necesario hacer el **ajuste entre las señales de temperatura** de esta y un instrumento de referencia con el fin de compensar las variaciones en la emisividad (ε). Considerando las lecturas de un pirómetro de dos colores más exactas que una cámara por despreciar la influencia ε al trabajar con dos longitudes de onda cercanas (Ver subapartado A.3 de 2.4.3), se toma la medida de referencia con el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5). En la Figura 116 se muestra la lectura de la temperatura adquirida con el pirómetro (Arriba en rojo), así como la señal de temperatura original (Centro en negro) y de salida (Abajo en azul) de la cámara.

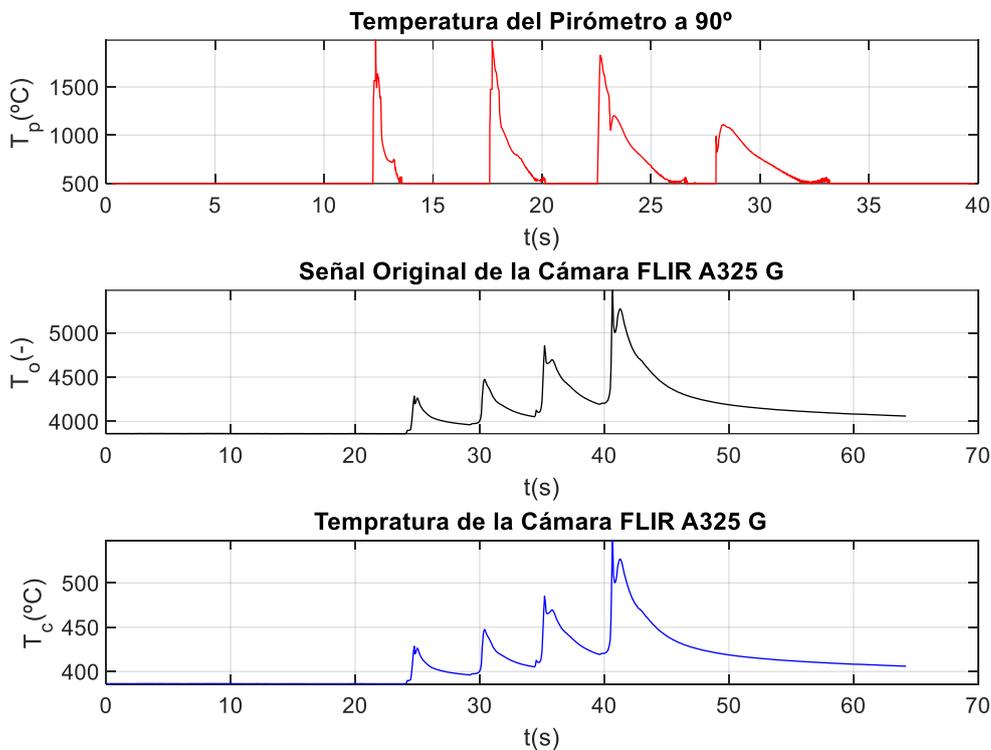


Figura 116: Adquisición de señales de temperatura del pirómetro (Arriba en rojo), así como la señal de temperatura original (Centro en negro) y de salida (Abajo en azul) de la cámara.

Para ello, primero se realiza un **remuestreo** de ambas señales a la misma frecuencia (f_s) con el fin de tener el mismo número de datos en los instantes de adquisición (t_s). Después, se efectúa el **ajuste** de las dos señales de forma que capten los mismos fenómenos en cada t_s . Aquí, puede ser que el ajuste se realice mediante los máximos absolutos de ambas señales o el inicio de funcionamiento del láser, siendo esta última la opción más acertada para la mayoría de las aplicaciones que se han llevado a cabo. Posteriormente, se trata de acortar la señal más larga según el **final** del registro más corto. Por último, resulta necesario una **saturación** de señales que es dependiente de los límites del rango preseleccionados en los ajustes de la cámara al realizar la adquisición de las imágenes. En base a los resultados obtenidos de los algoritmos internos de la cámara FLIR A325 G® (Ver 4.1.1), estos límites

han sido fijados en 400 y 1.200 °C para el rango $R2$. Este último paso se ha hecho de cara a aumentar la precisión en el ajuste, a costa de perderlo en los valores fuera del rango. Sin embargo, los valores por debajo de 400 °C no se consideran relevantes para el análisis del proceso; y los superiores a 1.200 °C, serán captadas con la cámara OPTRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5) por ser más fiable para temperatura superiores. En la siguiente figura se muestra un ejemplo del procedimiento descrito:

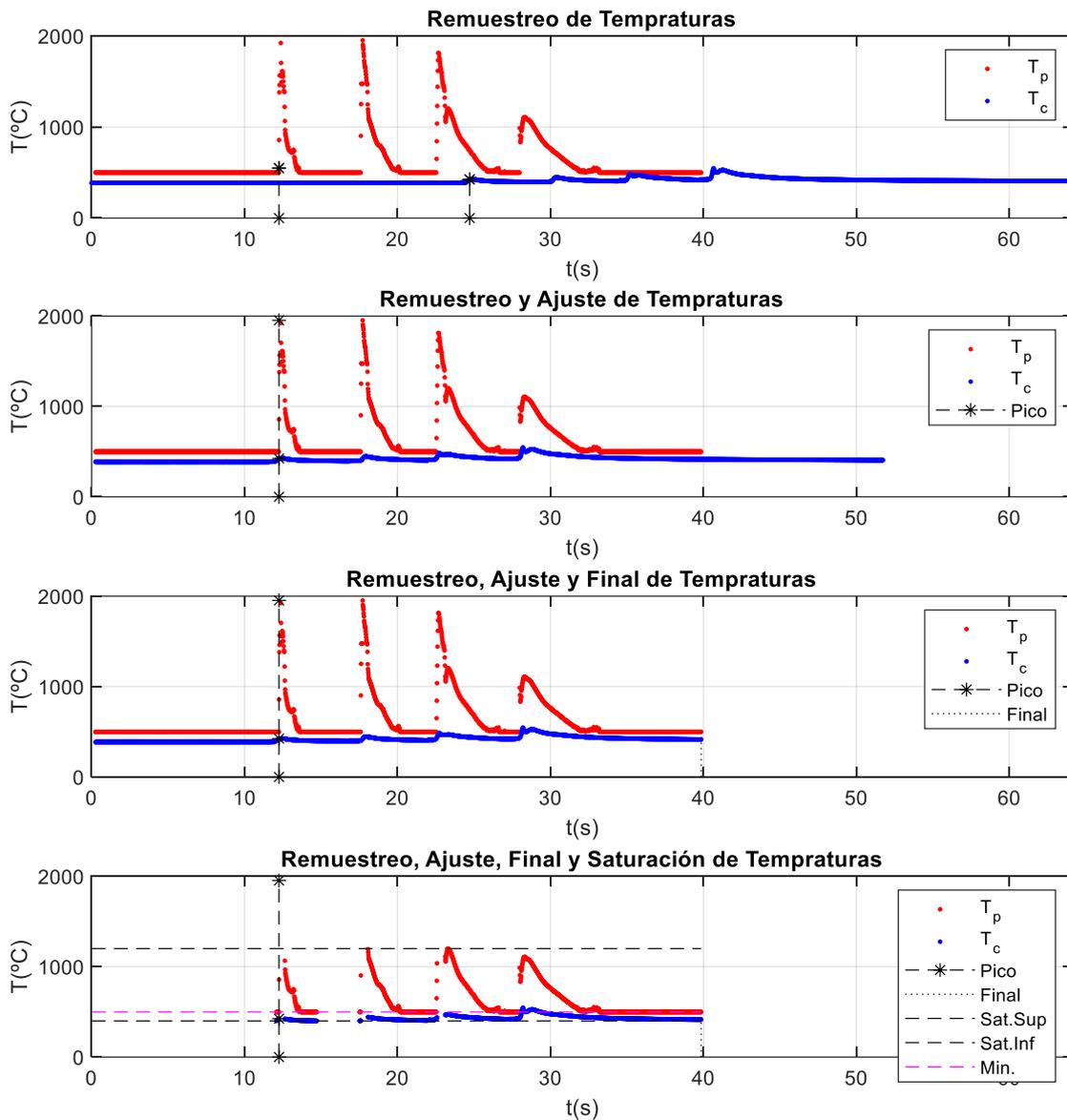


Figura 117: Remuestreo, ajuste, final y saturación de las señales de temperatura.

Una vez que se tiene el ajuste de temperaturas, se procede a la aplicación de los algoritmos de cálculos correspondientes a **compensaciones por las variaciones de la emisividad (ϵ)**. Siguiendo el procedimiento desarrollado para la estimación de temperaturas (Ver 3. Tarea), se admite la termometría de radiación total con la idealización del cuerpo gris (Ver subapartado C.3 de 2.3.2). Siendo esto así, el procesamiento de datos térmicos puede ser llevada a cabo a través de los siguientes métodos de ajuste a través de la fórmula (48) que se basa en la Ley de Stefan-Boltzmann con (21):

A. Método de Ajuste $T_c - \varepsilon$

A partir de las señas temporales de temperaturas del pirómetro $T_p(t)$ y la cámara $T_c(t)$, se obtiene la **emisividad temporal** $\varepsilon(t)$ a lo largo del tiempo de adquisición (t_s) mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon(t) = \frac{T_c(t)^4}{T_p(t)^4} \quad (50)$$

Representando la emisividad temporal $\varepsilon(t)$ respecto a la temperatura de la cámara ($T_c - \varepsilon$), se consigue una nube de puntos en la que se ajusta una curva polinómica de grado n . Aquí, el grado del polinomio que mejor ajuste proporciona ha sido el tercero ($n = 3$), por lo que es esta el único polinomio de ajuste que se ha implementado en casos de aplicación que se han llevado a cabo con el método de ajuste $T_c - \varepsilon$. En la Figura 118 se muestra un ejemplo de aplicación de dicho método, donde se han considerado dos registros de temperatura con el fin de aumentar los datos de ajuste y poder así mejorar la precisión del método desarrollado.

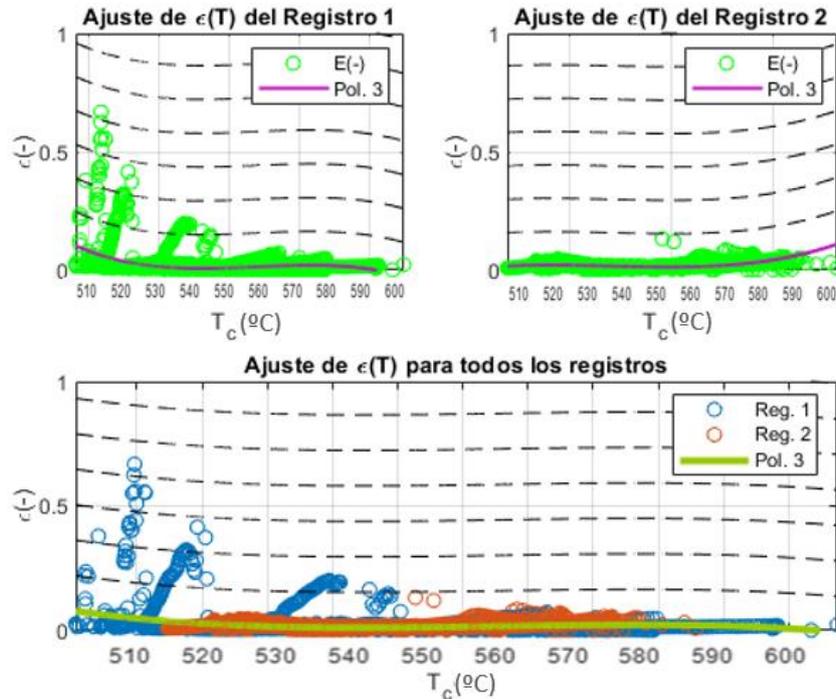


Figura 118: Ajuste polinómico de grado 3 para la nube de puntos $T_c - \varepsilon$ de dos registros.

Así, se obtiene la curva polinómica $\varepsilon_{POL.}(T_c)$, mediante la cual se obtiene el valor correspondiente de la emisividad en función de la temperatura de la cámara en cada instante. Aplicando la expresión (48) entrando con los valores de temperatura de la cámara $T_c(t)$ y la correspondiente emisividad polinómica de cada instante $\varepsilon_{POL.}(T_c(t))$, se consigue la **temperatura real de la cámara corregida** $T_{CR}(t)$, lo cual da lugar a la siguiente expresión:

$$T_{CR}(t) = T_c(t) / \sqrt[4]{\varepsilon_{POL.}(T_c(t))} \quad (51)$$

B. Método de Ajuste $T_c - T_p$

Alternativamente, se ha ideado una metodología en la que se representan las parejas temperaturas temporales de la cámara y el pirómetro en una gráfica $T_c - T_p$ con el fin de obtener unas curvas polinómicas de ajuste de grado n ($T_{Pol.n}$). Tal y como se puede ver en la Figura 119, se han considerado los tres primeros polinomios para la aplicación de este método de ajuste, es decir, los grados 1, 2 y 3:

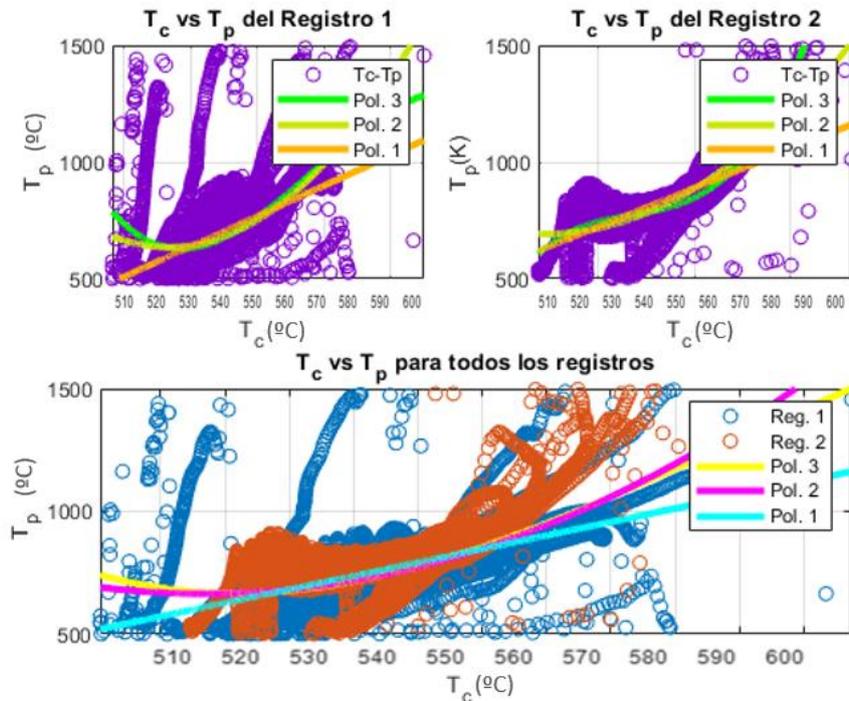


Figura 119: Ajuste polinómico para nube de puntos $T_c - T_p$ de dos registros.

A partir de estas curvas, se considera cada apareja de valores T_c y $T_{Pol.n}$ para llegar a la siguiente expresión de la **emisividad polinómica de grado n** ($\varepsilon_{Pol.n}$) particularizada para este método:

$$\varepsilon_{Pol.n} = \frac{T_c^4}{T_{Pol.n}^4} \quad (52)$$

Una vez que se tiene la emisividad, se puede calcular la **temperatura real de la cámara corregida de grado n** ($T_{CR,n}$) de la misma forma que en el método anterior con la expresión (48). En este caso, el resultado da lugar a $T_{Pol.n}$ tal y como se muestra a continuación:

$$T_{CR,n} = T_c / \sqrt[4]{\frac{T_c^4}{T_{Pol.n}^4}} = T_{Pol.n} \quad (53)$$

El análisis de estos métodos de ajuste para la corrección de temperaturas de la cámara termométrica FLIR A325 G® es realizado en el subapartado correspondiente a los resultados de la estimación de temperaturas (Ver 4.1.3).

3.4.3. Procesado de Videos IR de OPTRIS PI 05 M®

Tal y como se ha mencionado anteriormente en la descripción de los cálculos y algoritmos para la implementación de algoritmos internos de las cámaras (Ver 3.4.1), el procesado de videos IR de cámara OPTRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5) es un tanto tediosa. Esto es debido al formato RAVI de exportación que utiliza este instrumento termométrico, lo cual imposibilita el procesado directamente desde Matlab® por ser propiedad intelectual de *OPTRIS GmbH*. Además, la integración de dicha cámara ha sido realizada en el propio cabezal COAXwire® de *Fraunhofer IWS* (Figura 23, Izq.) formando 60° con la dirección vertical del haz láser (Figura 105). Consecuentemente, las imágenes IR que se obtienen a lo largo de las trayectorias del registro de posición ejecutadas por el robot *ABB* (Figura 108) son de la zona de aporte con una perspectiva angular (Figura 120, Drcha.). Por lo tanto, resulta necesario hacer un cambio del campo visual con el fin de superponer con los datos que proporciona la cámara FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) y poder así ampliar el rango de temperaturas, ya que las imágenes IR de esta cámara son en la dirección perpendicular a la superficie a analizar debido al posicionamiento a 90° que se ha realizado en la 4. Tarea (Figura 120, Drcha.).

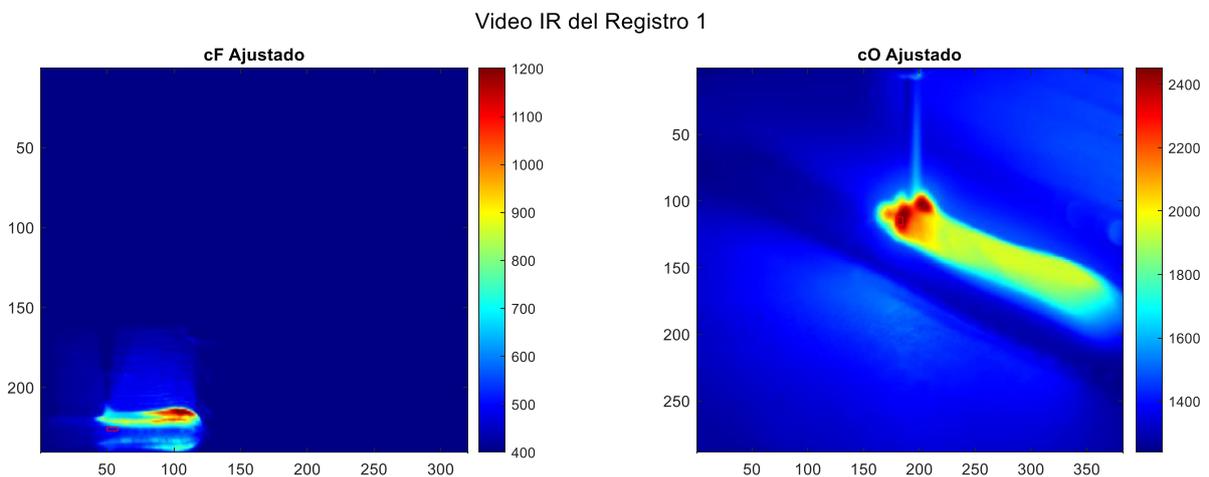


Figura 120: Imágenes IR ajustadas de la cámara FLIR A325 G® (Izq.) y OPTRIS PI 05 M® (Drcha.).

Para ello, se utiliza el software PIX Connect® (Ver subapartado B de 3.3.6), por el cual se procesan los datos con **perfiles de temperatura lineales** colocados en la dirección horizontal (X) y vertical (Z). A partir de estos, se obtienen datos de temperatura en los puntos que la forman, y posteriormente, se estima la distribución térmica por interpolación de los puntos de adquisición de cada línea. En el caso del perfil horizontal, se han empleado 9 puntos para la adquisición (H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 y H9), mientras que en la vertical ha sido suficiente con 6 (V1, V2, V3, V4, V5 y V6). En todas ellas, se ha tomado la media de 3×3 píxeles para disminuir la incertidumbre de medida. Cabe decir que el punto H5 central de la distribución horizontal, así como el V2 de la vertical, corresponden al *Tool Centre Point* (TCP) del proceso LMD-w. Por consiguiente, las lecturas de dichos puntos son tomadas como referencia para las correspondientes distribuciones. En la Figura 121 se muestra un pantallazo del software mencionado, donde en la parte izquierdas se aprecian los perfiles de temperatura lineales, y a la derecha los registros tiempo-temperatura ($t - T$) de cada punto de adquisición que la forman. Asimismo, se proporciona un histograma de la distribución térmica en la parte inferior derecha.

3. METODOLOGÍA

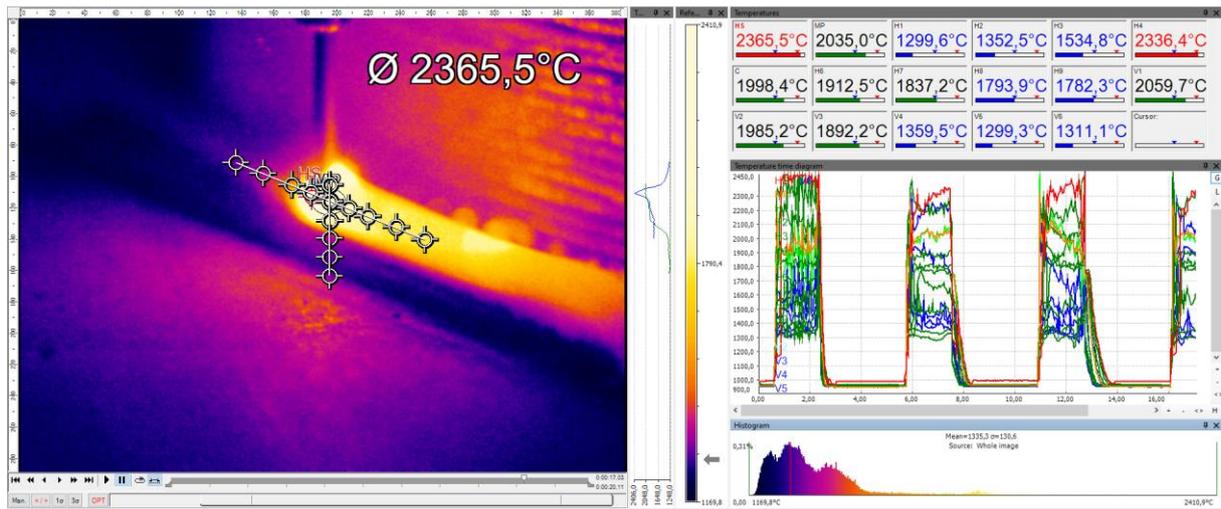


Figura 121: Procesado de videos IR de la cámara OPTRIS PI 05 M® a través del software PIX Connect®.

Una vez se tenga el registro de todos los puntos de adquisición a lo largo de las trayectorias ejecutadas por el robot ABB (Figura 121, Drcha.), se procede a interpolar para la obtención de las **distribuciones térmicas en cada dirección** de forma independiente. Aquí, hay varias opciones, entre las cuales destacan la interpolación gaussiana y la polinómica. Tal y como se puede observar en la Figura 122, las oscilaciones que proporciona la distribución polinómica no se ajustan al comportamiento térmico real. Por consiguiente, se imponen ciertas restricciones (*constraints*) para que los extremos de la distribución descendan de manera progresiva hasta la atenuación de temperaturas y conseguir una representación térmica más fidedigna. Así, las distribuciones aceptables son la gaussiana y la polinómica con restricciones de grado 6, siendo esta última la implementada en la herramienta de monitorización térmica que se ha desarrollado por su menor coste computacional.

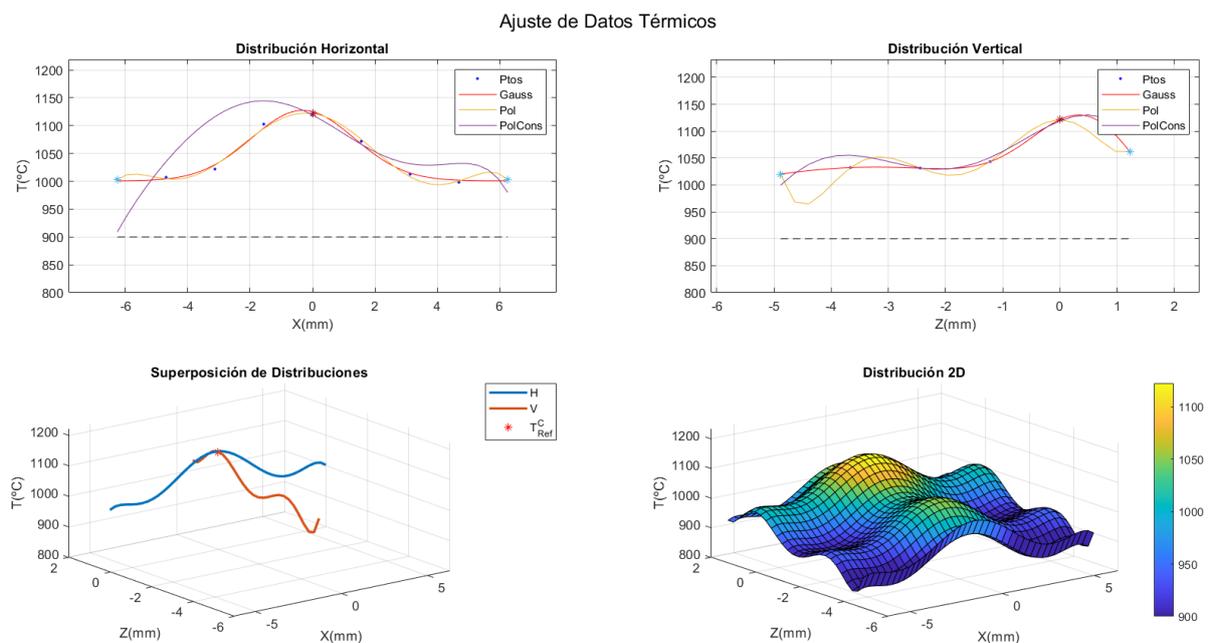


Figura 122: [Arriba, Izq.] Distribución horizontal; [Arriba Drcha.] Distribución Vertical, con interpolación gaussiana (Rojo), polinómica sin restricciones (Amarillo) y con restricciones (Morado); [Abajo] Superposición de distribuciones (Izq.) e distribución 2D cartesiana (Drcha.) para la interpolación polinómica sin restricciones.

El siguiente paso consiste en la obtención de la **distribución 2D del campo térmico** en la pared, para lo cual cabe la posibilidad de implementar una interpolación cartesiana o polar. La primera de ellas proporciona una distribución térmica ortogonal por barrido que no representa bien la realidad en las direcciones diagonales. La interpolación polar en cambio, genera la distribución 2D por revolución, lo cual se ajusta al comportamiento térmico real. La comparativa de los resultados que se obtienen por cada una de estas alternativas de interpolación bidimensionales son detallados en 4.1.4.

La distribución 2D que ha sido obtenida por **interpolación cartesiana** trabaja con las distribuciones de cada dirección de forma independiente evaluando los puntos del registro de posición. La distribución horizontal considera los puntos que estén entre los puntos de adquisición H1 y H9 de cada instante, así como en un rango de alturas de $\pm 0,5 \text{ mm}$ con respecto a la coordenada Z del TCP. La vertical por su parte, hace lo propio entre los puntos V1 y V6, así como H3 y H7 de la horizontal para abarcar una anchura dependiente de los puntos de adquisición. De esta forma, se crea una zona de puntos del registro de posición común para la evaluación de temperaturas con dicha interpolación. En la Figura 123 se muestra un ejemplo de seguimiento de puntos del registro de posición, donde se distinguen los puntos que considera cada distribución. En color verde se indican aquellos puntos que se evalúan por la distribución horizontal, mientras que los azules son los de la vertical. Los puntos de color magenta por su parte, son los puntos comunes del registro de posición que entran dentro de ambas distribuciones. Para terminar, también se han ilustrado el resto de los puntos en negro con el fin de hacer el seguimiento del historial de las trayectorias. En la gráfica de la izquierda se muestra el registro original, donde se muestran las oscilaciones debidas a la imprecisión del robot *ABB*. Como la componente en la dirección Y no es de interés para la construcción de paredes delgadas de un único cordón por capa, dicha componente ha sido despreciada (Figura 123, Centro). Por lo tanto, el seguimiento de los puntos del registro de posición ha sido llevada a cabo en el plano XZ, tal y como se muestra en la gráfica de la parte derecha.

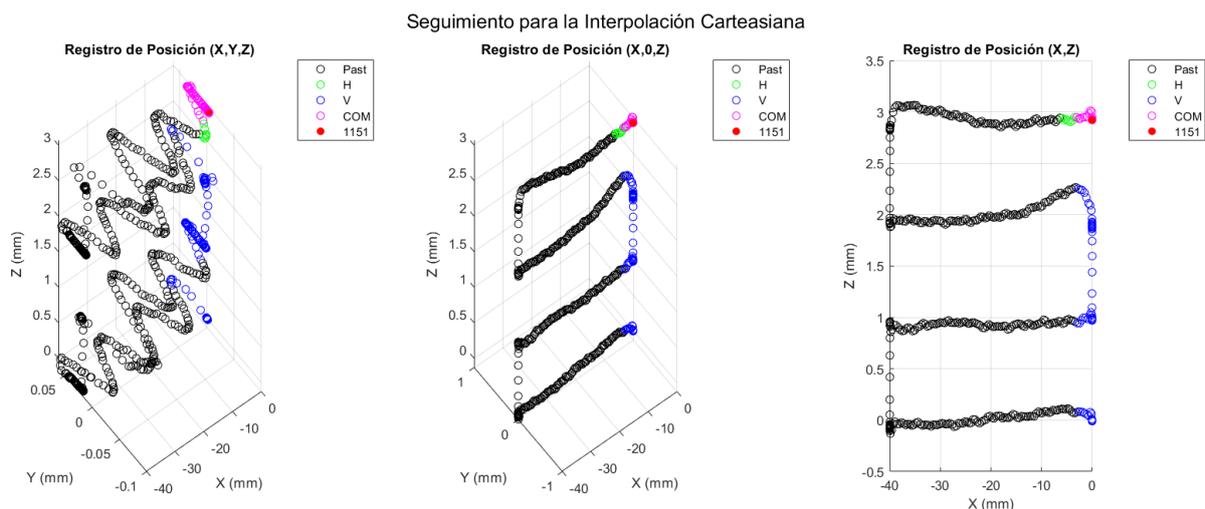


Figura 123: Seguimiento de puntos del registro de posición para la interpolación 2D cartesiana: Original (Izq.), Despreciando la componente en Y (Centro) y mostrando en el plano XZ (Dcha.).

3. METODOLOGÍA

Alternativamente, se puede ampliar la resolución de las cámaras IR a través de una discretización de la pared que se obtiene mediante un mallado virtual preestablecido. Esta solución ha sido adoptada para la **interpolación polar**, donde se consideran todos los puntos de la malla discretizada en lugar de los puntos del registro de posición únicamente. En la Figura 124 se muestra ejemplo de mallado de la pared para una discretización de 150×50 , es decir, 150 punto en la horizontal y 50 en la vertical.

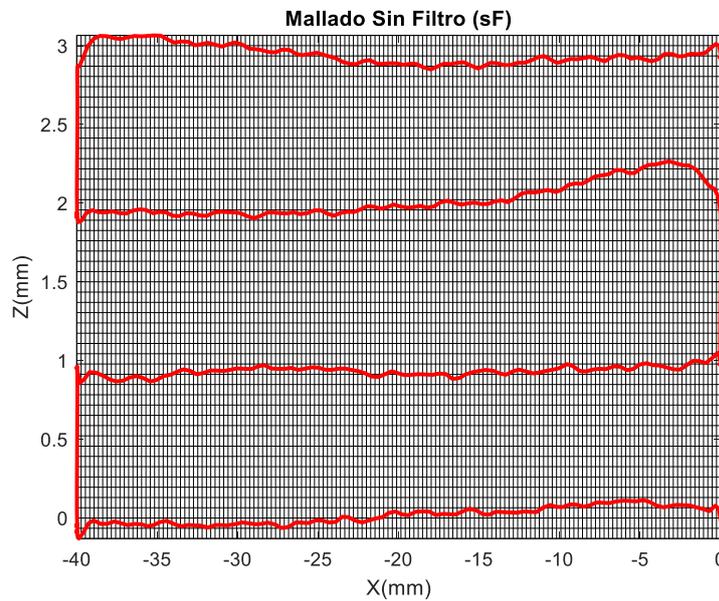


Figura 124: Mallado de la pared sin filtros (sF) con una discretización de 150×50 .

Para ello, cabe la posibilidad de considerar datos mediante distintos filtrados de la trayectoria que se muestran en la Figura 125. Sin embargo, se toma como referencia la **trayectoria del robot ABB sin filtro (sF)** que se muestra en rojo en la gráfica de la parte superior:

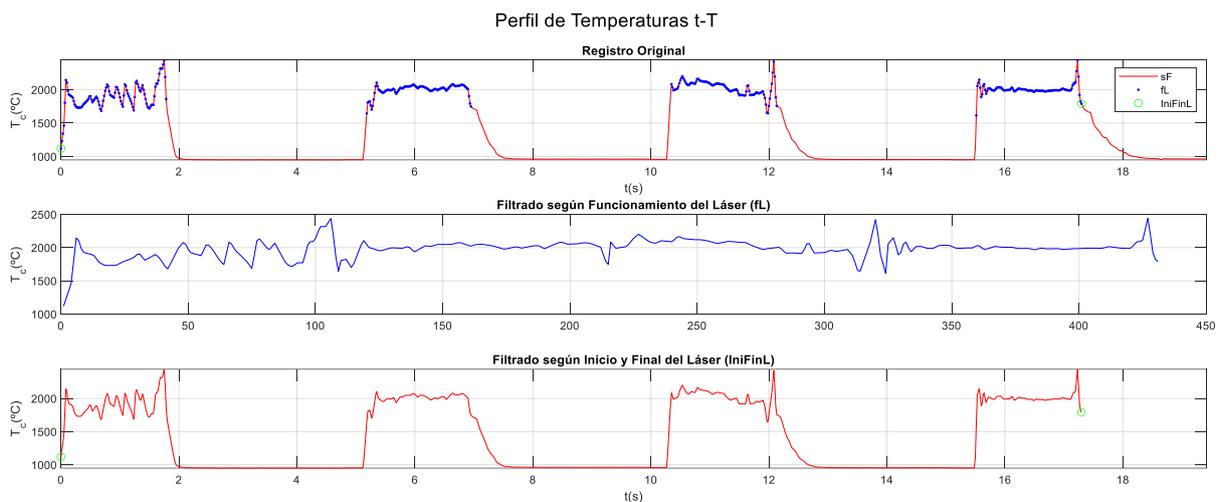


Figura 125: Perfiles de temperaturas en el TCP según el registro original sin filtro (sF, Arriba en rojo), el funcionamiento del láser (fL, Central en azul) y inicio y final del funcionamiento del láser (IniFinL, Abajo en verde).

Esto quiere decir que se considera la trayectoria que sigue el robot ABB desde el inicio de funcionamiento del láser hasta el final una vez que se hayan realizado los ajustes pertinentes siguiendo un procedimiento similar al que se describe en 3.4.2 pero considerando los registros de todos los instrumentos (Figura 126).

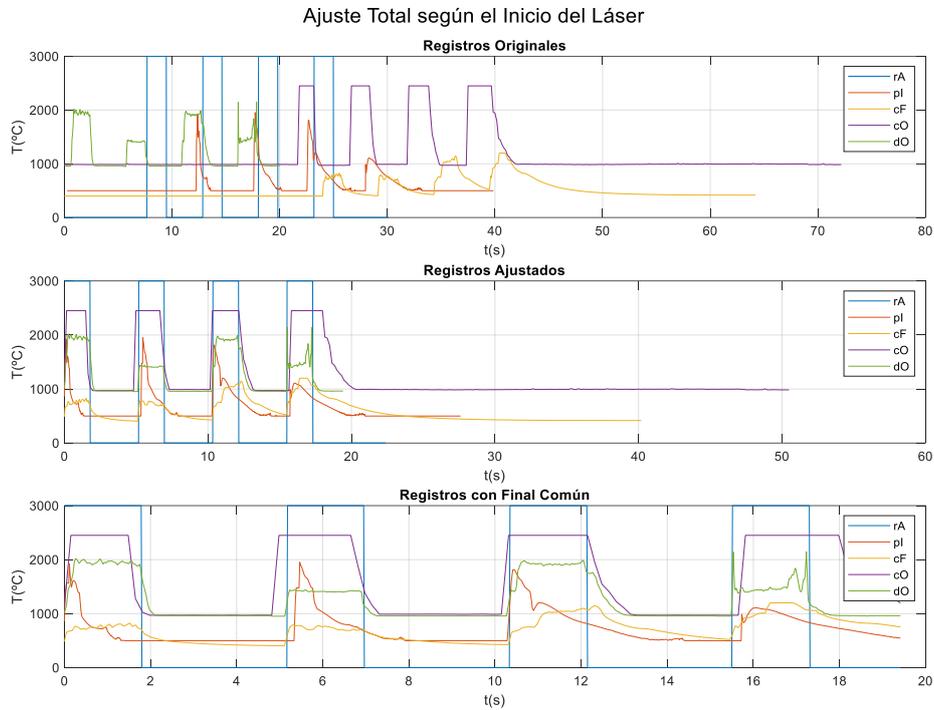


Figura 126: Resultados del ajuste de todos los registros según el inicio de funcionamiento del láser y final común según el registro más corto.

Posteriormente, se lleva a cabo una **recolocación y reorientación del registro de posición sin filtro (sF)** con el fin de posicionar el origen de coordenadas en (0,0,0) y la dirección de avance a lo largo del plano XZ (Figura 127).

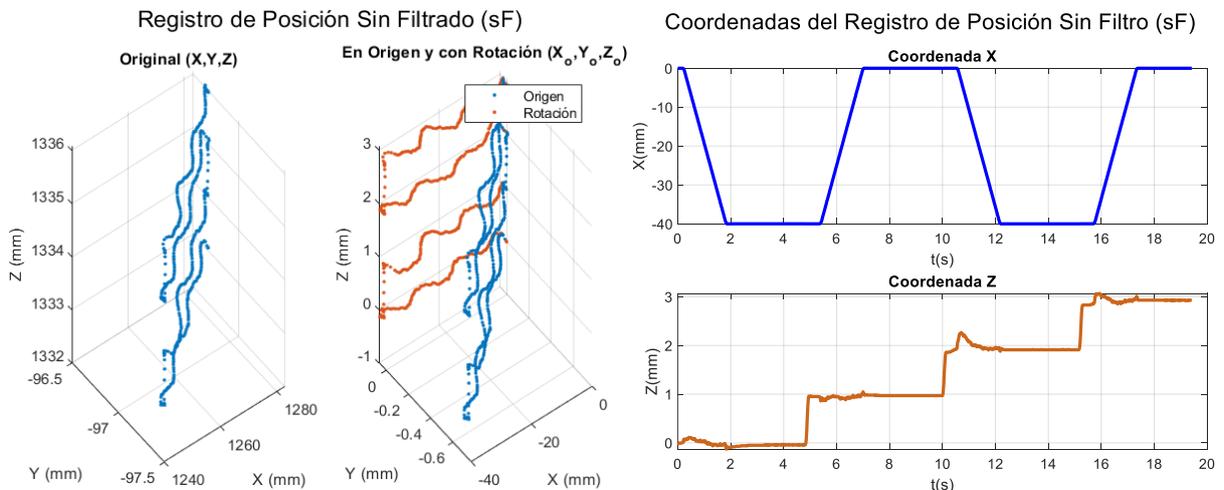


Figura 127: Representación tridimensional (Izq.) y coordenadas (Dcha.) tras la recolocación y reorientación del registro de posición sin filtros (sF) del robot ABB.

El procedimiento consiste en la **evaluación de todos los puntos de la malla** (Figura 124) que entren dentro del campo de alcance de la distribución 2D polar anteriormente mencionada. La condición para ello se basa en el rango de temperaturas de la cámara OPTRIS PI 05 M® ($900 \div 2.450 \text{ }^\circ\text{C}$) y la distancia radial desde el TCP al punto correspondiente. En caso de que la temperatura de uno de los puntos del mallado este dentro de dicho rango y su distancia hasta el TCP sea menor que el radio de alcance del campo 2D, se lleva a cabo una evaluación mediante la interpolación polar. El radio de alcance queda determinado por la envergadura de la distribución horizontal, ya que sólo son considerados aquellos puntos de la malla que estén por debajo del TCP de cada instante (Figura 128).

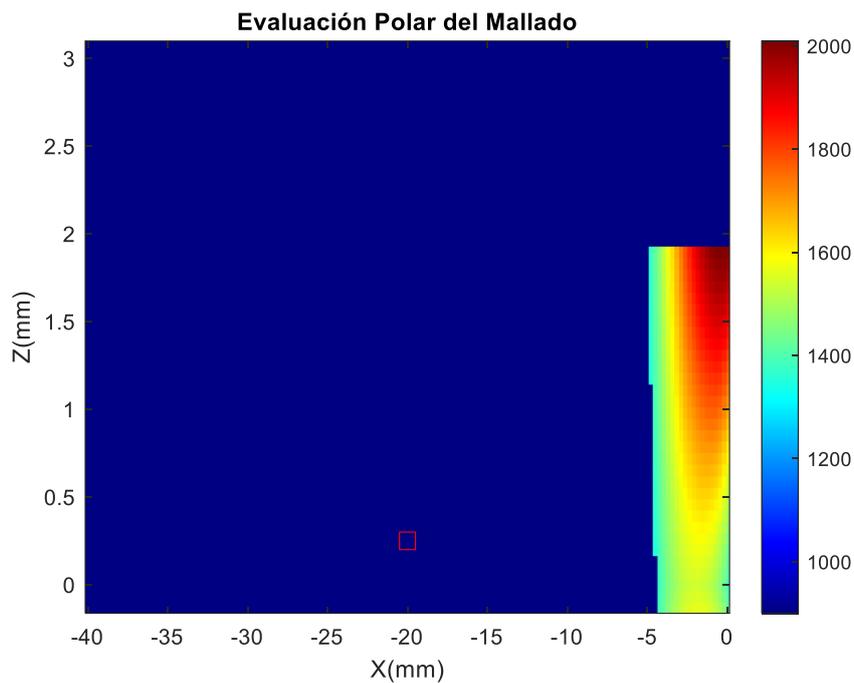


Figura 128: Evaluación del mallado según la interpolación polar al inicio de la tercera capa.

Almacenando los registros de temperatura de cada uno de los puntos del mallado virtual con el procedimiento descrito, se consigue la evolución térmica de todos los puntos que se han discretizado. El rango que se consigue de esta forma es de $900 \div 2.450 \text{ }^\circ\text{C}$ debido a la fuente de datos procedente de la cámara OPTRIS PI 05 M®. Combinando este registro con la obtenida de la cámara FLIR A325 G® para temperaturas de $400 \div 1.200 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ver 3.4.2), se consigue ampliar el rango a $400 \div 2.450 \text{ }^\circ\text{C}$. Para ello, se han implementado los cálculos y algoritmos que se describen en el siguiente subapartado.

3.4.4. Ampliación del Rango de Temperaturas

Una vez que se tienen las temperaturas de la cámara FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) corregidas (Ver 3.4.2) y los videos IR de OPRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5) procesados (Ver 3.4.3), se lleva a cabo la **superposición de temperaturas** con el fin de ampliar el rango. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el rango resultante de dicha combinación es de $400 \div 2.450 \text{ }^\circ\text{C}$, donde se tienen datos redundantes entre $900 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$. Por consiguiente, se tiene un rango con datos en común que posibilita un análisis sobre la coherencia de las fuentes de adquisición empleadas.

Antes de nada, resulta necesario una discretización de los datos de la pared obtenidas de la cámara FLIR A325 G® que sea igual a la de OPRIS PI 05 M® para poder realizar la superposición. El mado preestablecido de la Figura 124 es por tanto tomada como referencia para el **remuestreo de la pared** en los videos de FLIR A325 G®. El primer paso consiste en hacer un zoom de la pared para la única consideración del mismo, y posteriormente se procesa mediante una interpolación bidimensional a través de la función *interp2* de Matlab®. Una vez que se tenga el mismo número de puntos en cada fotograma de los videos IR procedentes de las dos cámaras, cabe la posibilidad de realizar la superposición. Para ello, se selecciona un punto de la pared con el fin de extraer el registro de temperaturas que proporciona cada una de ellas en su correspondiente rango (Figura 129).

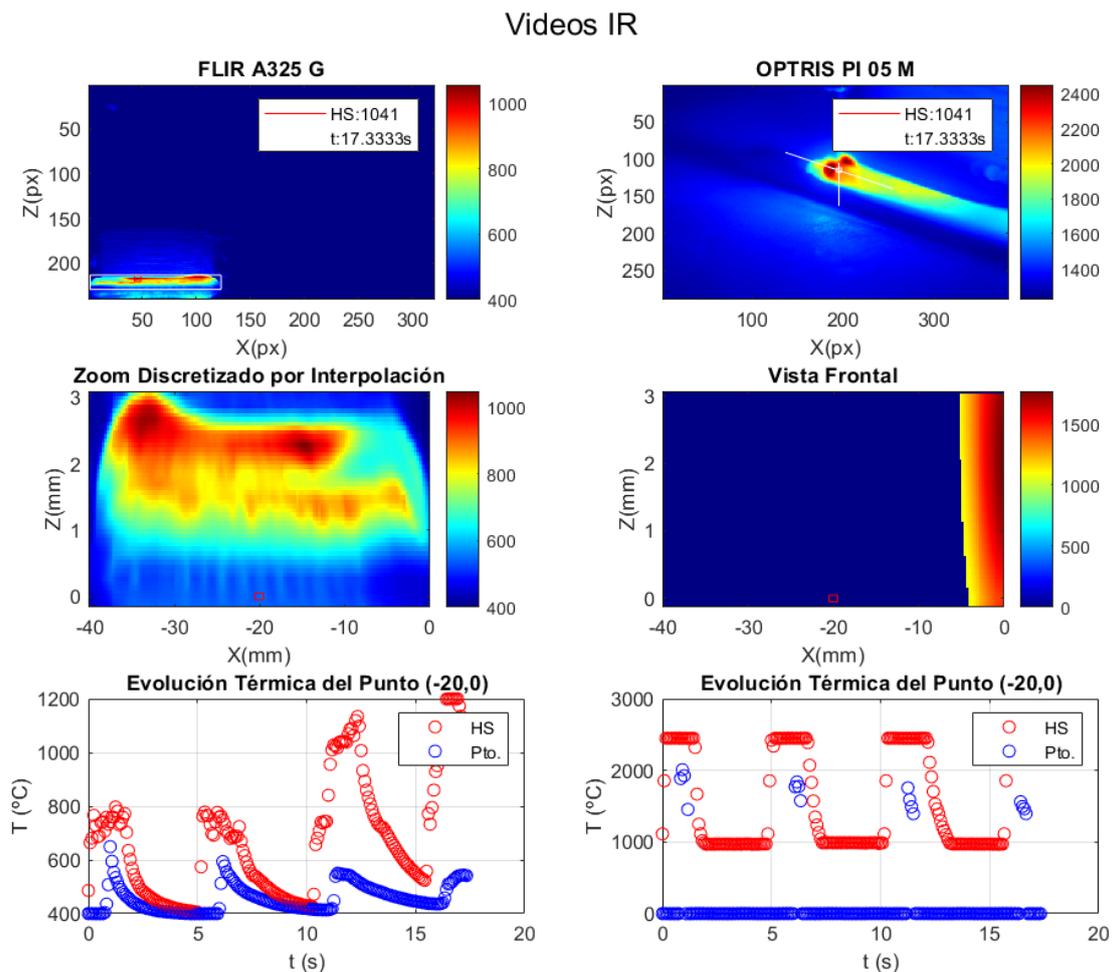


Figura 129: Videos IR originales (Arriba), procesadas (Centro) y diagramas t-T en los puntos seleccionados (Abajo) de la cámara FLIR A325 G® [Izq.] y OPRIS PI 05 M® [Drcha.].

En la figura anterior se muestra un ejemplo de videos IR que proporciona cada una de las cámaras, donde la columna de la izquierda corresponde a FLIR A325 G[®] y la derecha a la OPTRIS PI 05 M[®]. Los videos de la parte superior son las originales, mientras que las del centro son las procesadas mediante el procedimiento descrito. A los videos de FLIR A325 G[®] se les ha aplicado un zoom en el recuadro blanco de la figura de la parte superior izquierda, así como una interpolación a través de la función predefinida de Matlab[®]. Los de OPTRIS PI 05 M[®] en cambio, han sido procesados con la interpolación 2D polar en base a la distribución horizontal y vertical, que han sido indicadas con líneas blancas en la figura de la parte superior derecha. Cabe decir que estas figuras centrales están en coordenadas espaciales en unidades de *mm* tras la recolocación y reorientación (Figura 127), mientras que los videos originales de las figuras superiores están en coordenadas digitales en unidades de *px*. Para terminar, en la parte inferior de la Figura 129 se han ilustrado los diagramas $t - T$ que proporciona cada cámara en el punto $(-20,0)$ seleccionado en la pared, el cual ha sido indicado con un recuadro rojo en las figuras centrales. Asimismo, se ha ilustrado la temperatura del *Hot Spot* (HS) con el fin de hacer una comparación de temperaturas entre esta y el punto seleccionado.

Superponiendo las gráficas de la parte inferior de la Figura 129 y tomando el límite en $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, se consigue una gráfica como la que se muestra en la Figura 130. En el caso del ejemplo expuesto para el punto $(-20,0)$, se observa ruido procedente de las reflexiones en la primera de las pasadas. Aquí, las temperaturas superiores al límite corresponden a la cámara OPTRIS PI 05 M[®] (Rojo), mientras que las inferiores son procedentes de FLIR A325 G[®] (Azul). La combinación de temperaturas (Verde) muestra un salto acusado entre las fuentes de datos. Por consiguiente, resulta necesario la implementación de algoritmos de cálculo para la corrección de las temperaturas que han sido obtenidas con la cámara FLIR A325 G[®] (Ver 3.4.2).

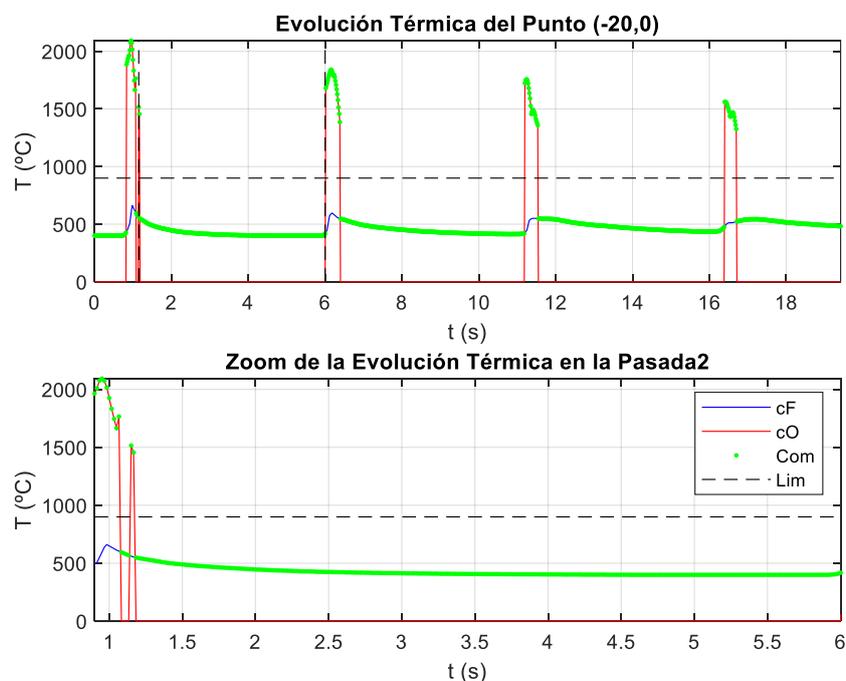


Figura 130: Superposición de temperaturas para el punto seleccionado de la pared.

Para ello, se sigue la metodología desarrollada en la 3. Tarea para la estimación de temperaturas, donde se toma la lectura del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5) apuntando al mismo punto de la pared como referencia. Aquí, cabe destacar que las señales adquiridas son dependientes con respecto al punto seleccionado, por lo que resulta necesario un reajuste de las mismas con la única consideración del pirómetro y las dos cámaras. Se trata por lo tanto de una combinación de instrumentos con el fin de compensar las variaciones en la emisividad, y poder así determinar los ciclos térmicos de la pieza de forma más precisa. En base al ajuste de ε que se detalla en 3.4.2, cabe la posibilidad de realizar distintas compensaciones de dicho parámetro.

En la Figura 131 se muestran las emisividades y las correcciones de temperatura correspondientes al ajuste $T_c - \varepsilon$ (Izq.) y $T_c - T_p$ (Drcha.). Para el método de ajuste $T_c - \varepsilon$, se muestran la emisividad temporal sin ajustar $\varepsilon(t)$, la calculada por mínimos cuadrados ε_{LS} , la media ε_m y la ajustada según la temperatura de la cámara de forma variable $\varepsilon_{var}(T_c)$. En el método $T_c - T_p$ por su parte, se muestran las emisividades ε_{Pol3} , ε_{Pol2} y ε_{Pol1} ajustadas con polinomios de grado 3, 2 y 1 respectivamente.

Corrección de Temperaturas

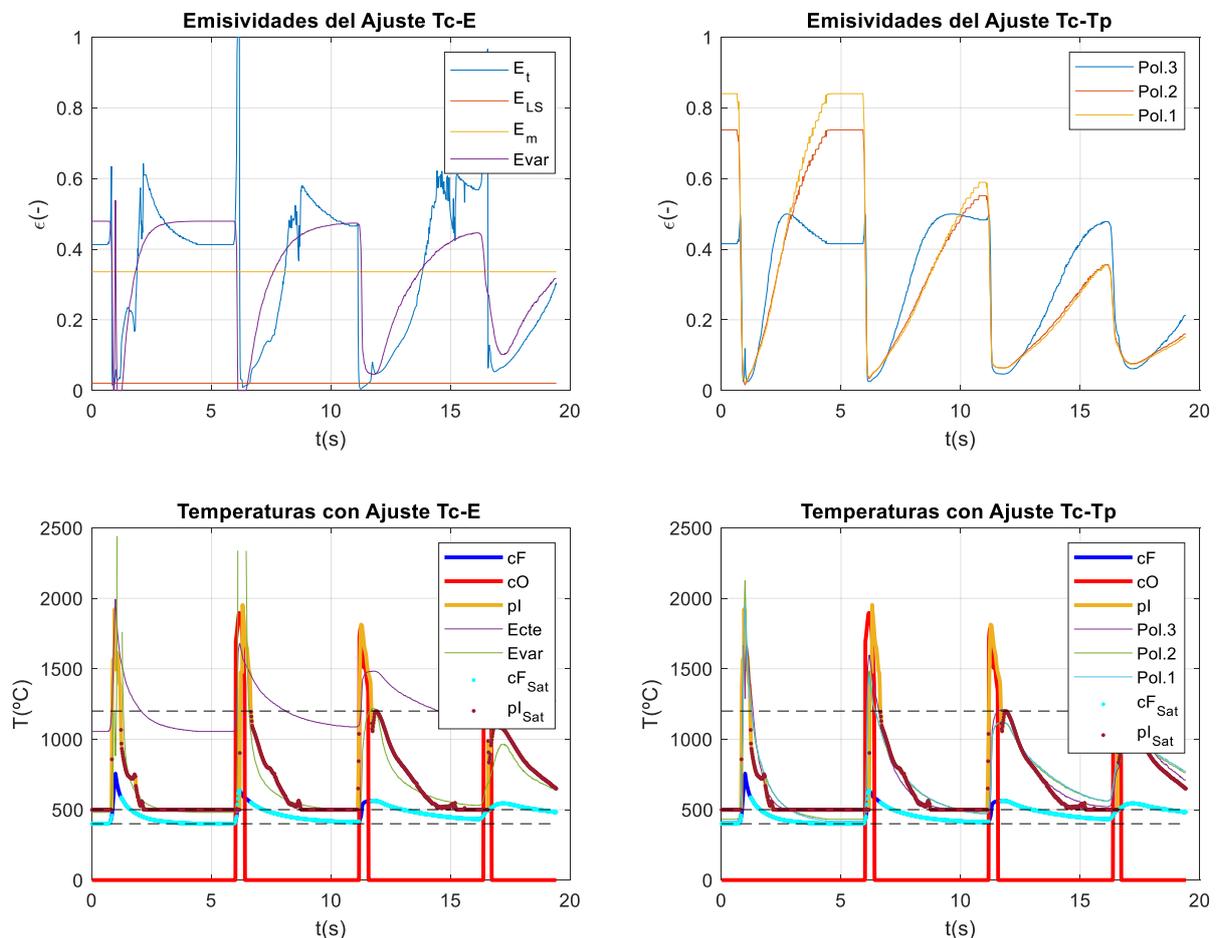


Figura 131: Corrección de temperaturas con el ajuste $T_c - \varepsilon$ (Izq.) y $T_c - T_p$ (Drcha.).

En el ajuste $T_c - \varepsilon$, la emisividad variable (ε_{var}) es la que proporciona mejores resultados, mientras que la emisividad polinómica de grado 3 (ε_{pol3}) es para el ajuste $T_c - Tp$. En el subapartado 4.1.3 se lleva a cabo un análisis más exhaustivo de los resultados de la corrección de temperaturas, donde se muestran las gráficas correspondientes a las variaciones que proporciona cada uno de los métodos de ajuste que se han desarrollado. Asimismo, en el subapartado 4.1.4 se exponen los resultados finales de la metodología desarrollada para la determinación de los ciclos térmicos de la pieza.

Mediante la metodología descrita hasta ahora para la implementación de los algoritmos de cálculo (Ver 3.4), se consigue la evolución térmica para uno de los puntos espaciales que se ha seleccionado en la pieza. Extrapolando para el resto de los puntos espaciales que genera el registro de posición del robot *ABB*, cabe la posibilidad de conocer la evolución térmica de todos los puntos espaciales.

Por lo tanto, la metodología que se ha desarrollado para la determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de cualquier punto de las piezas fabricadas por LMD-w permite conocer la microestructura resultante. Asimismo, se puede llegar a predecir las distorsiones y las tensiones residuales, lo cual juega un papel importante en la predicción del comportamiento estructural y resistente de las piezas finales. El estudio de dicho análisis queda fuera del alcance de este trabajo y se planea como una posible línea de investigación futura (Ver 5).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza el análisis de los resultados que se han obtenido siguiendo la metodología adoptada (Ver 3.1). Primero, se exponen los **resultados científico-técnicos** (Ver 4.1), donde se detallan las contribuciones y conclusiones extraídas. Posteriormente, se procede al **análisis de riesgos** que supone la ejecución del presente trabajo (Ver 4.2), así como el **análisis económico** del cómputo total de los resultados obtenidos (Ver 4.3).

4.1. Resultados Científico-Técnicos

Dentro de los resultados científico-técnicos, se ha realizado una clasificación dependiendo de la tarea correspondiente de la metodología adoptada (Ver 3.1) a excepción de la quinta y última tarea (Ver 5. Tarea) que se plantea como línea futura (Ver 5). Siendo esto así, se tienen los **resultados de los algoritmos internos de la cámara** (Ver 4.1.1), así como los **resultados de la calibración de la emisividad** (Ver 4.1.2), los **resultados de la estimación de temperaturas** (Ver 4.1.3) y los **resultados de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza** (Ver 4.1.4).

4.1.1. Resultados de los Algoritmos Internos de las Cámaras

Tal y como se ha comentado en la descripción de los algoritmos internos de las cámaras termométricas (Ver subapartado B.4 de 2.4.3), la cámara FLIR A325 G[®] presenta tres **modos de funcionamiento**. En el caso del *Signal Linear Mode*, la temperatura del objeto (T_c) es obtenida a partir de la señal radiométrica (S_c) que llega al detector; mientras que en el *Temperature Linear Mode*, la conversión se basa en el valor original de la temperatura (T_o). En base a los resultados obtenidos de los ensayos realizados para la determinación de algoritmos internos de dicha cámara (Ver 1. Tarea), el modo que mayor correlación muestra entre las lecturas obtenidas con el software ThermaCAM Researcher[®] y Matlab[®] es el *Temperature Linear Mode*. Siendo esto así, las temperaturas de la cámara FLIR A325 G[®] son obtenidas siguiendo la fórmula (49), donde el valor de los parámetros *IRFormat* y *IRAlignment* han sido establecidos en 1 y 0 respectivamente (Ver 3.4.1).

Comparando cualitativamente las imágenes térmicas (IR) que se obtienen en el software ThermaCAM Researcher[®] y Matlab[®] con la solución adoptada (Figura 132), se observa cierta variación que puede deberse a cambios en las condiciones ambientales, dado que las grabaciones no se han realizado de forma simultánea. Sin embargo, este hecho se toma como despreciable y se acepta la solución adoptada como procedimiento para obtener temperaturas con la cámara FLIR A325 G[®] directamente

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

desde Matlab®. Por lo tanto, esto pone en evidencia la validez de los algoritmos de cálculo implementados con el objetivo mencionado (Ver 3.4.1).

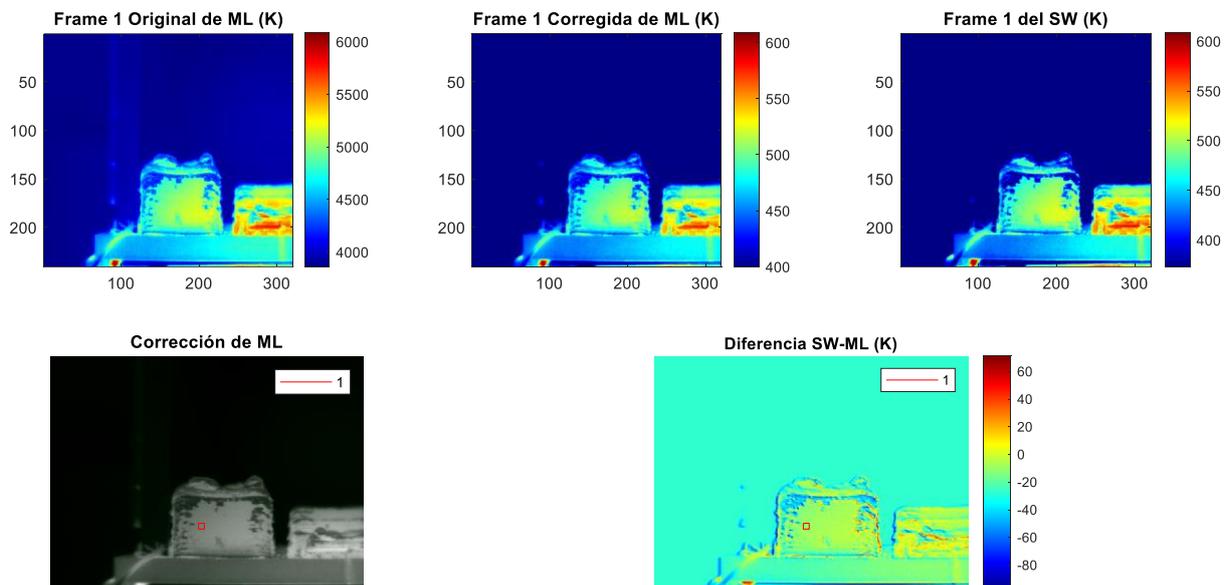


Figura 132: Corrección del primer fotograma de Matlab® (ML) y su diferencia con el software (SW) en el rango R2.

Por otra parte, cabe destacar que el procesamiento en los límites del rango es un tanto complicado debido a la **saturación de las señales** . Centrando la atención en el rango R2 por ser de interés para las aplicaciones de monitorización térmica posteriores, se observa una saturación diferente en el límite inferior dependiendo del sistema de adquisición empleado. Esto se puede ver en la Figura 133, donde se muestran los valores de todos los píxeles para el primer fotograma (*frame*) para una de las grabaciones realizadas. La gráfica de arriba corresponde a los valores proporcionados por el software ThermaCAM Researcher® (SW), mientras que la central sería la correspondiente a los valores originales (T_o) de Matlab® (ML). En la de abajo, se muestra la superposición de valores obtenidos con ambas fuentes, donde los de Matlab® son los corregidos (T_c) con la fórmula (49). En esta última gráfica se puede observar que las señales de temperatura de Matlab® saturan en 388 °C, mientras que los del software lo hacen en 373 °C. Esto puede ser debido a algún ajuste interno que permite ampliar el dicho rango de la cámara, lo cual es propiedad intelectual de FLIR Systems. Puesto que el resto del rango la medida de la temperatura permanece inalterado, se establece un límite inferior en 400 °C. De esta forma, únicamente se admiten las temperaturas que se encuentren por encima de dicho valor, por lo que el rango R2 queda limitada entre 400 y 1.200 °C para el resto de las aplicaciones de la cámara FLIR A325 G®.

Aunque los resultados expuestos correspondan al rango R2 por ser de interés para las aplicaciones de monitorización térmica del proceso LMD, también se han realizado pruebas en el resto de los rangos (Ver 1. Tarea). El rango intermedio R1 no presenta problema alguno en los límites de temperatura. Sin embargo, no sucede lo mismo con el rango inferior R0. Aquí, sucede lo contrario que en R2, donde la saturación de temperaturas en el límite superior del rango es el problemático. En este caso, la solución adoptada es capar dicho rango de -20 a 425 °C, lo cual permite mediciones de temperaturas fuera del rango R0 estipulado por el fabricante FLIR Systems [89].

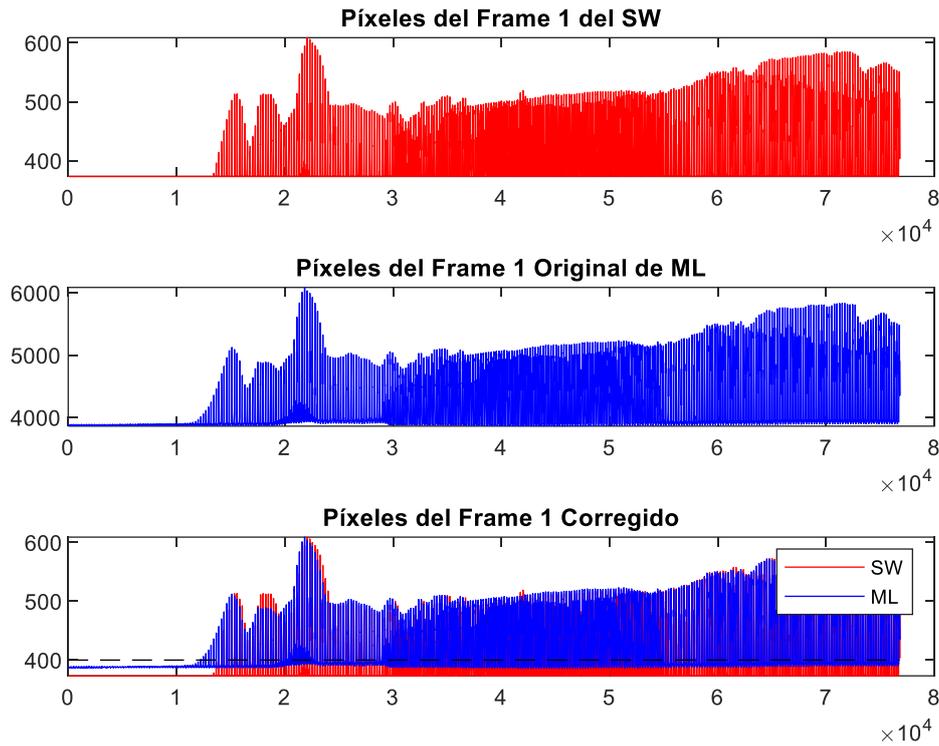


Figura 133: Valor de los píxeles del primer fotograma para el rango R2 de la cámara FLIR A325 G[®] obtenidas con el software (Arriba), y Matlab[®] sin corrección (Central) y con corrección (Abajo).

4.1.2. Resultados de la Calibración de la Emisividad

En cuanto a la tanda de ensayos para la calibración de la emisividad (Ver 2. Tarea), se han realizado las siguientes observaciones que se detallan en la Tabla 38:

Tabla 38: Observaciones de las pruebas de calibración para la estimación de la emisividad.

Prueba	Observaciones
1	
2	
3	
4	
5	Ajuste del Rango R1
6	Comprobación por repetición de la prueba
7	
8	Ajuste del Rango R2
9	Comprobación por repetición de la prueba
10	
11	Temperatura nominal: $T_0 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ Leve oxidación de la pieza
12	Temperatura nominal: $T_0 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ Pieza completamente oxidada

Algunas de las **pruebas estacionarias** que se han realizado han sido descartadas por las emisiones del entorno, que influye en mayor o menor medida las lecturas de temperatura obtenidas de la pared de la pieza. Tal y como se puede ver en las imágenes superiores de la Figura 134, la parte del sustrato de color negro (Izq.) irradia más que el resto de la superficie y su influencia se ve reflejada en la pared de la pieza al igual que la pared de la parte derecha (Drcha.). Esto hace que las mediciones de temperatura a través de las imágenes IR estén falseadas. Por consiguiente, se decide minimizar este error poniendo una chapa reflectante de aluminio (Al) sobre el sustrato con el fin de reducir las emisiones (Figura 134, Inf., Izq.), lo cual queda justificado con la Ley de Kirchhoff. Según la expresión (27) para los cuerpos opacos, las emisiones corresponden a la parte complementaria de las reflexiones, por lo que, poniendo una chapa reflectante, se consigue evitar estas emisiones procedentes de la parte negra del sustrato (Figura 134, Inf. Drcha.). Por lo demás, se considera que el resto del entorno apenas influye por ser las temperaturas muy inferiores con respecto a la pieza.

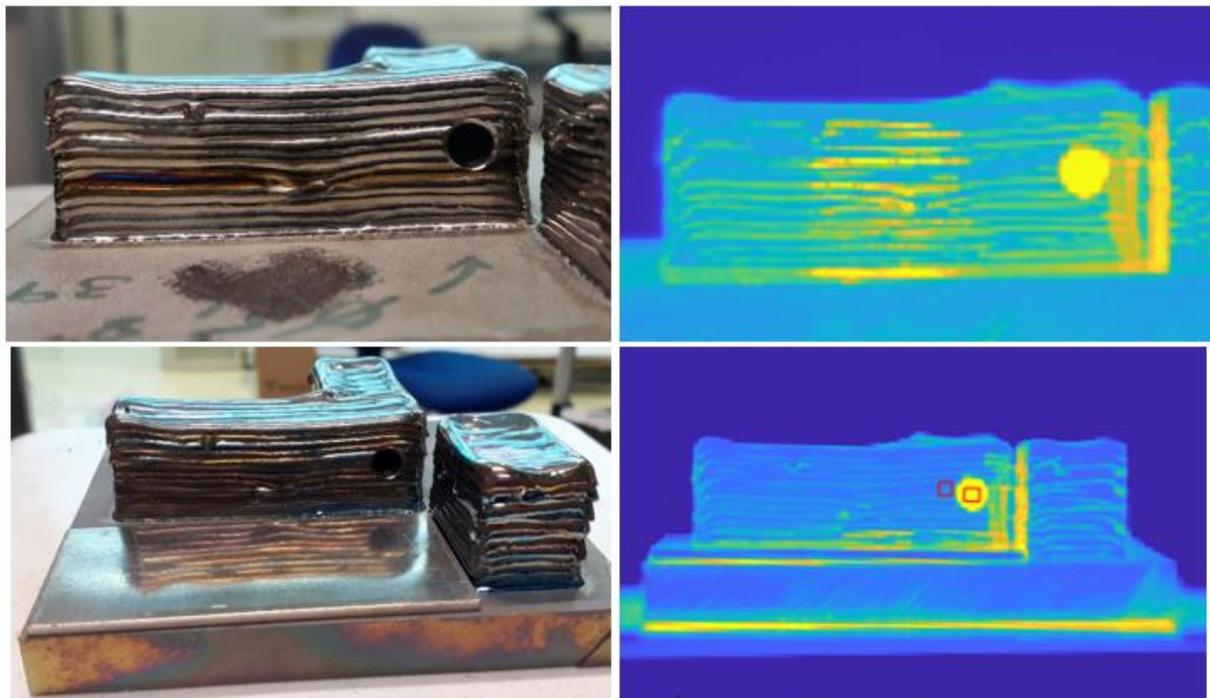


Figura 134: Influencia de las emisiones del entorno en la pared sin chapa reflectante (arriba) y con chapa reflectante (abajo).

Cogiendo como referencia la segunda de las configuraciones mencionadas al tratarse de mediciones más precisas por el menor número de fuentes de incertidumbre, se consiguen una emisividad que ronda sobre 0,22 para 280,1 °C de temperatura en el rango R1. Comprobando en el rango R2 de la cámara FLIR A325 G® hay una ligera variación, dando lugar a una emisividad de 0,23 para una temperatura constante de 289,2 °C. En ambos casos, la temperatura nominal de la mesa caliente ha sido de 400 °C, lo cual pone en evidencia las pérdidas de calor y el gradiente térmico a lo largo de la pieza. Los resultados obtenidos de esta primera parte de calibración estacionaria de la emisividad, son coherentes con los datos de la literatura [34].

En cuanto a las **pruebas transitorias** donde la pieza es extraída del horno para la posterior medición de temperaturas, las emisividades a las que se han realizado las comprobaciones están muy por debajo de la real. Esto es debido a la oxidación que ha sufrido las piezas al extraer del horno a tan elevada temperatura. En la parte izquierda de la Figura 135, se muestra la oxidación de una pieza de prueba al ser extraída a 700 °C; mientras que, a la derecha se muestra la pieza final tras la prueba del horno a 900 °C de temperatura.



Figura 135: Oxidación de la pieza al extraer del horno a 700°C (Izq.) y 900°C (Drcha.).

Como las emisividades que se han utilizado para la comprobación no corresponden con la emisividad real, se ha ideado una metodología para su estimación. Como primer paso, se calcula el error de temperatura que se produce en cada tramo de emisividad según la secuencia de ε de cada una de las pruebas transitorias (Pruebas 11 y 12 de la Tabla 26). Para ello, se compara la temperatura de la pared medida con su correspondiente ε con la temperatura de referencia que proporciona la temperatura del cuerpo negro en el agujero. Esto se consigue interpolando los datos de $\varepsilon = 1$ en el agujero durante la secuencia de adquisición (Figura 136, arriba). Tal y como se puede ver en la parte inferior de la Figura 136 para la prueba transitoria de 900 °C, los errores de temperatura van en aumento según disminuye el parámetro ε de comprobación, lo cual es coherente con el comportamiento de la emisividad ante la oxidación que sufre la pieza (Figura 135, Drcha.).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

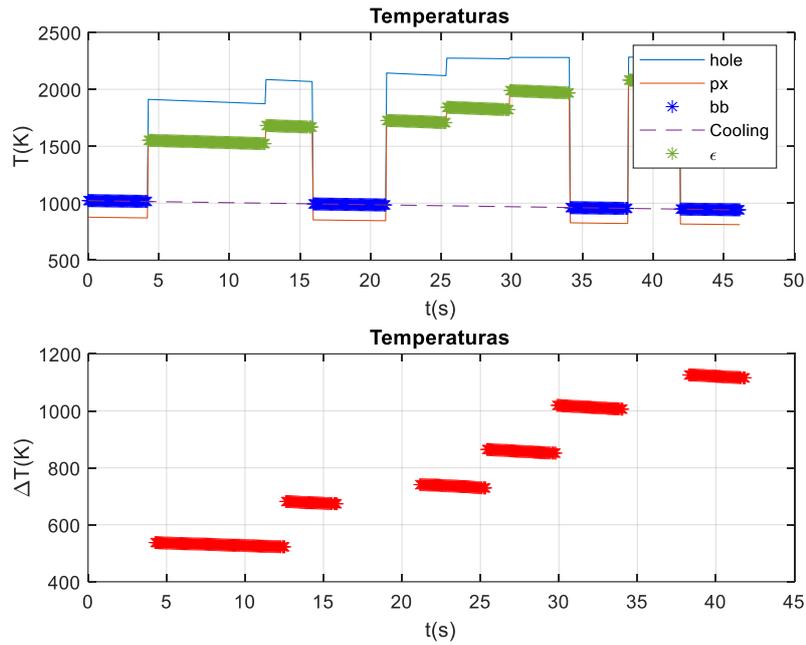


Figura 136: Evolución de temperaturas (Arriba) y sus errores (Abajo) para la variación de ϵ en la prueba transitoria a 900 °C.

El segundo paso consiste en la estimación de la emisividad en base a los datos obtenidos, que se realiza mediante la búsqueda del valor del parámetro ϵ que proporcione errores de temperatura nulos. Para lo cual, se extrapolan los datos representados en un diagrama $\epsilon - \Delta T$ como el que se muestra en la parte inferior de la Figura 137 para la prueba transitoria de 900 °C. Los resultados de dicha prueba expulsan una emisividad del 0,48. Haciendo lo propio en la prueba transitoria de 700 °C, se consigue 0,59 como valor de la emisividad estimada.

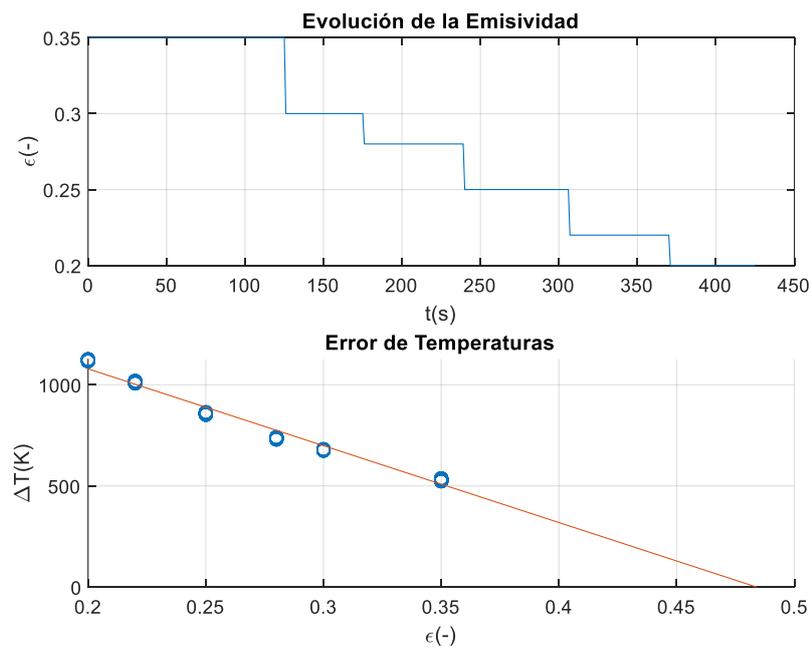


Figura 137: Evolución del parámetro ϵ (Arriba) y la estimación de la emisividad (Abajo) en la prueba transitoria a 900 °C.

4.1.3. Resultados de la Estimación de Temperaturas

En la Tabla 39 se muestran las observaciones para las distintas pruebas que se han realizado en la 3. Tarea para la estimación de temperaturas:

Tabla 39: Observaciones de las pruebas para la estimación de temperaturas.

Prueba	Observaciones
1	Oxidación excesiva sin Ar
2	Oxidación a pesar de Ar
3	Mayor n° de capas, pero fallo por temperaturas elevadas
4	
5	
6	
7	
8	Rango R1 de la cámara: $T_c = 0 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$
9	Mayor altura de la pared con desprendimiento final
10	Rango R1 de la cámara: $T_c = 0 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$
11	
12	
13	Puntero descentrado hacia la izquierda
14	Cambio de zona de trabajo en otra fila de cordones
15	Repetición de (14) ajustando el enfoque del pirómetro
16	

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el procedimiento descrito en la 3. Tarea para la estimación de temperaturas con la cámara FLIR A325 G[®] (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) sólo es válida para el rango $400 \div 1.200 \text{ }^\circ\text{C}$, donde el material $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ está en estado sólido por ser las temperaturas inferiores a su punto de fusión de $1.670 \text{ }^\circ\text{C}$ [43]. Sin embargo, es bien sabido que las temperaturas en el proceso LMD superan dicha temperatura, por los que se dan **cambios de estado** que influyen en la emisividad del material (Ver 2.4.1). Además, la longitud de onda en la que se realizan las grabaciones de los videos IR repercute en las mediciones de temperaturas (Ver 2.4.2). Todo esto se ha podido apreciar al realizar la estimación de temperaturas con la cámara FLIR A325 G[®] siguiendo la metodología desarrollada (Ver 3. Tarea).

Las temperaturas en el baño fundido del proceso LMD superan el límite superior del rango R2 de la cámara FLIR A325 G[®] debido al desplazamiento de las emisiones de radiación a longitudes de onda corta fuera de su rango espectral correspondiente a LWIR. Por consiguiente, el detector de la cámara no es capaz de detectar las radiaciones procedentes de dicha zona. Esto queda justificado por la Ley de Wien con la expresión (17) que guardan la temperatura y la longitud de onda de las máximas emisiones (Figura 41). Luego, la cámara termométrica FLIR A325 G[®] solo sirve para medir temperaturas por debajo de los $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$, y se requiere de instrumentos radiométricos que trabajen en rangos espectrales de menor longitud de onda para medir temperaturas superiores como los que se producen en el baño fundido.

Por ende, se distinguen dos **zonas de medición** dependiendo de la temperatura y el estado en la que se encuentren: la parte sólida por debajo de $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la parte por encima de dicha temperatura que puede estar tanto en estado sólido como líquido. Siendo esto así, la metodología desarrollada para la estimación de temperaturas únicamente es válida para la primera de las zonas.

En la Figura 138 se muestra un fotograma (*frame*) para uno de los ensayos que se han realizado en la 3. Tarea (Tabla 28), donde se pone de manifiesto la **influencia de la longitud de onda en la emisividad**. Midiendo temperaturas del cuerpo negro ($\varepsilon = 1$) en el rango espectral de $7,5 \div 13\ \mu\text{m}$ (LWIR) de la cámara FLIR A325 G®, las temperaturas en el baño fundido son inferiores al resto de la pared (Figura 138). Haciendo lo propio con la cámara OPTRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5), se observa un comportamiento completamente distinto para el rango espectral $0,5 \div 0,54\ \mu\text{m}$ (VIS) en la que se opera (Ver 4.1.4). Esto pone en evidencia la reducción de emisividad que se produce en dicha zona debido a cambios de fase del material para el rango espectral LWIR, pero no para VIS. El comportamiento que se ha observado de este parámetro intrínseco del material ante los cambios de estado para distintos rangos espectrales es coherente con los resultados de Altenburg et al. [45].

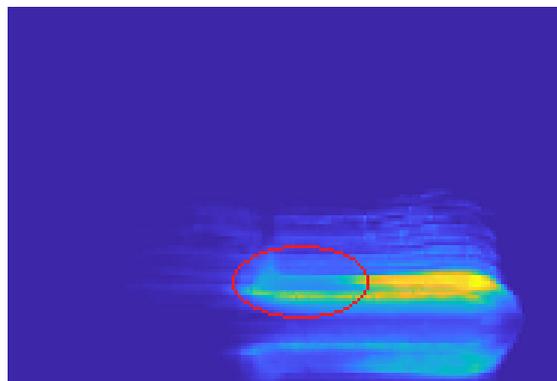


Figura 138: Imagen IR midiendo temperaturas del cuerpo negro ($\varepsilon = 1$) en el rango espectral $7,5 \div 13\ \mu\text{m}$.

Siguiendo el procedimiento descrito en la 5. Tarea se podría conocer el valor de la emisividad en el baño fundido. Sin embargo, esto queda fuera del alcance de este proyecto y se plantea como línea futura (Ver 5).

Por otra parte, se observa un **aumento significativo de la emisividad** (ε) según avanza el proceso de aporte de las paredes delgadas que se han realizado (Ver 3. Tarea). Esto puede ser debido a diversos factores (Ver subapartado D.1 de 2.3.2), pero como el aumento de la rugosidad por la oxidación que se produce en ausencia de la atmósfera protectora es evidente (Figura 103), se toma este como principal causa. Esto puede ser observado en los dos métodos de ajuste que se han llevado a cabo para la estimación de temperaturas (Ver 3.4.2).

En el caso del **método de ajuste $T_c - \varepsilon$** (Ver subapartado A de 3.4.2), se distinguen claramente las cuatro capas que constituyen las paredes delgadas que se han fabricado en una de las pruebas llevadas a cabo (Tabla 28). La Figura 139 muestra la evolución de la emisividad para un único registro de temperaturas.

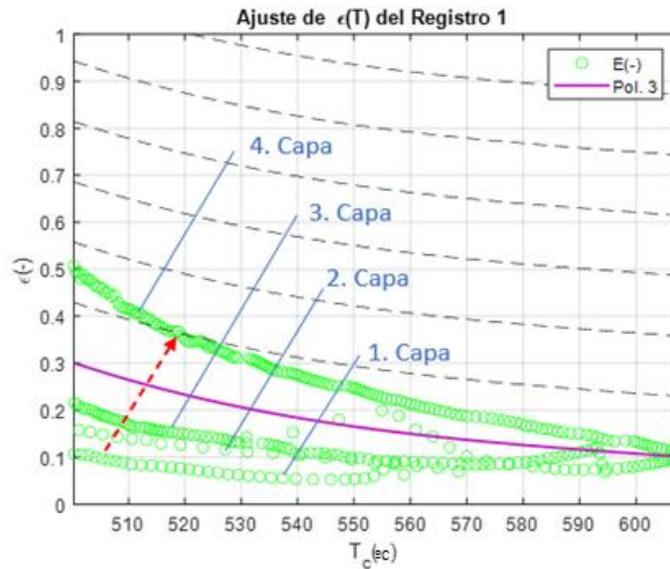


Figura 139: Evolución de la emisividad durante el proceso de aporte de paredes delgadas en ausencia de atmósfera protectora según el método de ajuste $T_c - \varepsilon$.

Los resultados de dicho método de ajuste expulsan las desviaciones que se muestran en la siguiente tabla. Como solo se ha considerado un único registro de temperaturas, las desviaciones corregidas con $\varepsilon_{Regs}(T)$ considerando múltiples grabaciones de las pruebas es igual a la corregida con $\varepsilon(T)$ para el registro considerado.

Tabla 40: Desviaciones del método de ajuste $T_c - \varepsilon$.

	$\Delta T_{max}(^{\circ}C)$	$\Delta T_{med}(^{\circ}C)$
Original	750,6818	184,3112
Corregida con $\varepsilon_{cte(LS)}$	406,6653	286,2371
Corregida con $\varepsilon(T)$	730,7425	184,4303
Corregida con $\varepsilon_{Regs}(T)$	730,7425	184,4303

En la Figura 140 se ilustran los resultados obtenidos, donde en la gráfica superior se muestran las emisividades, en la central las temperaturas estimadas y en la de abajo las correspondientes desviaciones. Aquí, se han considerado la emisividad temporal sin ajustar $\varepsilon(t)$, junto a las constantes calculadas por mínimos cuadrados $\varepsilon_{cte(LS)}$ y la media $\varepsilon_{cte(Med)}$, así como la ajustada de forma variable según la temperatura de la cámara $\varepsilon(T)$. Tal y como se ha comentado anteriormente, cabe la posibilidad de considerar más de un registro de temperaturas con el fin de mejorar el ajuste realizado. En el caso del presente ejemplo solo se ha analizado una prueba, por lo que las gráficas de la Figura 140 correspondientes al registro considerado son solapadas con la de los múltiples registros por no presentar datos adicionales que pudieran mejorar el ajuste.

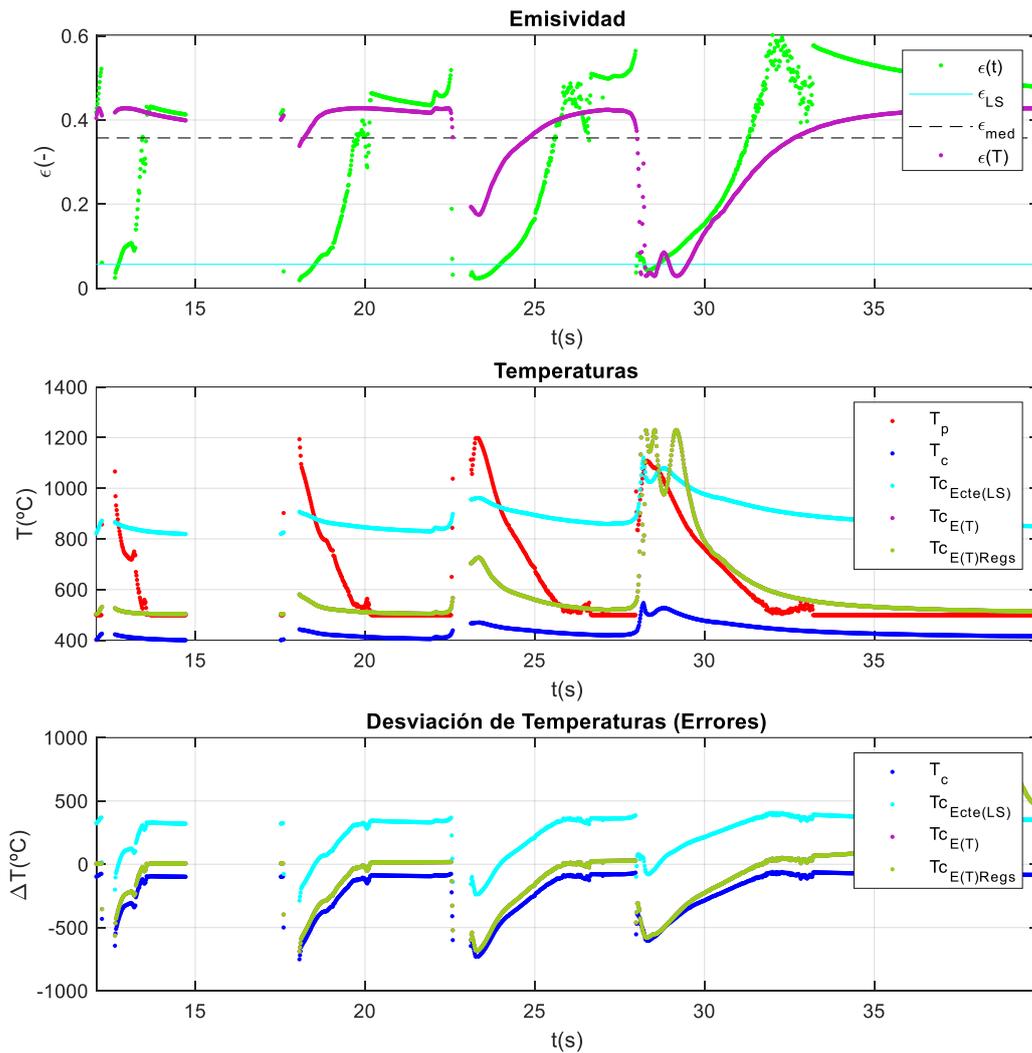


Figura 140: Resultados del método de ajuste $T_c - \varepsilon$.

Por lo tanto, se puede decir que la $\varepsilon(T)$ es la que proporciona los mejores resultados, ya que sus variaciones de temperatura presentan menores oscilaciones con ΔT_{max} inferiores al resto (Tabla 40). Analizando las gráficas de la Figura 140, se puede observar buena correlación entre las temperaturas estimadas con dicha emisividad y las de referencia que proporciona el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5) cuando las temperaturas son inferiores a 600 °C. Cuando las temperaturas son superiores en cambio, la discrepancia aumenta poniendo en entredicho la precisión del método desarrollado. Sin embargo, muchas de las desviaciones que se dan son debidas a reflexiones y fallos en la adquisición de datos a la hora de seleccionar los píxeles de la cámara. Por consiguiente, resulta normal que haya zonas donde haya mayor y menor coherencia de datos. Por consiguiente, las temperaturas estimadas con la emisividad ajustada de forma variable según la temperatura $\varepsilon(T)$ son utilizadas en los algoritmos de cálculo implementados para la ampliación del rango de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza (Ver 3.4.4).

Por otra parte, está el **método de ajuste $T_c - T_p$** que sigue el procedimiento que se describe en el apartado de cálculos y algoritmos para su implementación (Ver subapartado B de 3.4.2). Tal y como se puede observar en el diagrama que se muestra en la siguiente figura, en este caso también se pueden distinguir claramente las cuatro capas que se han realizado:

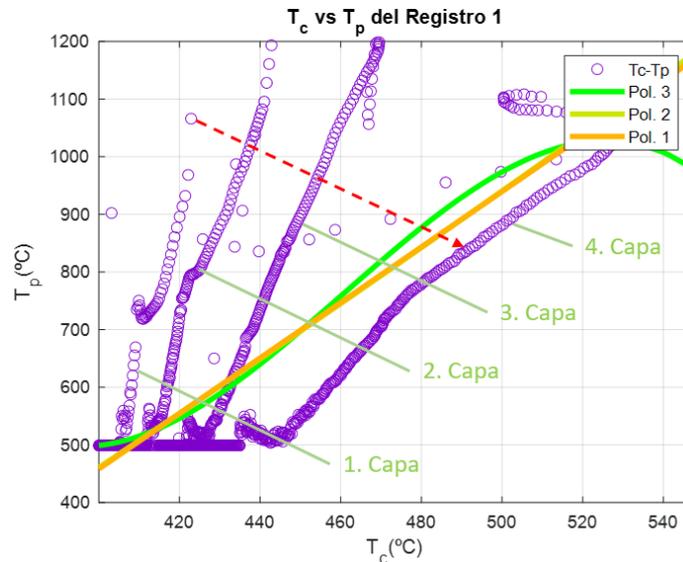


Figura 141: Método de ajuste $T_c - T_p$ con polinomios de grado 3 (Verde), 2 (Amarillo) y 1 (Naranja).

A diferencia del método anterior, el método de ajuste $T_c - T_p$ ha sido llevada a cabo a través de tres polinomios con el fin de analizar la adecuación de las tendencias que proporciona cada grado polinómico. En la Tabla 41 se exponen las desviaciones que proporciona cada una de ellas:

Tabla 41: Desviaciones del método de ajuste $T_c - T_p$.

	$\Delta T_{max} (^{\circ}C)$	$\Delta T_{med} (^{\circ}C)$
Original	750,6818	184,3112
Corregida con $\epsilon_{Pol.3}$	537.5524	88.2485
Corregida con $\epsilon_{Pol.2}$	530.6377	91.4478
Corregida con $\epsilon_{Pol.1}$	529.0859	91.6985

En base a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas (Tabla 28), cabe destacar que las variaciones medias (ΔT_{med}) proporcionadas por método de ajuste $T_c - T_p$ son inferiores al método $T_c - \epsilon$ indiferentemente del grado del polinomio empleado. Esto significa una mayor estabilidad en la estimación de temperaturas realizada. Las variaciones máximas (ΔT_{max}) en cambio, son parecidas con una ligera mejoría. Por lo tanto, se trata de un método que proporciona mejores resultados.

Entre los distintos polinomios de ajuste que se han empleado para el método $T_c - T_p$, destaca el de grado 3 por adaptarse mejor a cambios bruscos en las propiedades como la emisividad del material. Además, proporciona mayor estabilidad que el resto al proporcionar menores ΔT_{med} en todas las pruebas que se recogen en Tabla 28. Por consiguiente, al igual que las temperaturas corregidas con $\epsilon(T)$ para el método anterior, las corregidas con $\epsilon_{Pol.3}$ son las que se han empleado para la implementación de cálculos y algoritmos para conseguir un rango superior (Ver 3.4.4).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A lo que respecta a los resultados de emisividad, temperaturas y desviaciones, son ilustradas en las gráficas de la Figura 142. En este caso, la gráfica superior de la emisividad muestra una clara tendencia del descenso de dicho parámetro intrínseco del material, donde las primeras dos capas del inicio están caramente afectadas por el ruido procedente de las reflexiones. Las dos finales en cambio, son más estables siendo prácticamente paralelas entre ellas. Cabe destacar que dicha grafica no corresponde a la emisividad temporal; y consecuentemente, no se puede decir que la emisividad sigue una evolución decreciente, ya que depende de la temperatura de cada momento al realizar en ajuste pertinente.

Las temperaturas y las correspondientes variaciones por su parte, presenta una tendencia cada vez mejor por la razón expuesta anteriormente. Esto hace que las temperaturas estimadas en la cuarta y última capa se ajuste relativamente bien a los de la referencia que proporciona el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Figura 142, Rojo). Por consiguiente, las desviaciones de las temperaturas estimadas son prácticamente nulas al final del proceso de aporte de las paredes delgadas que se ha realizado mediante la tecnología LMD-w.

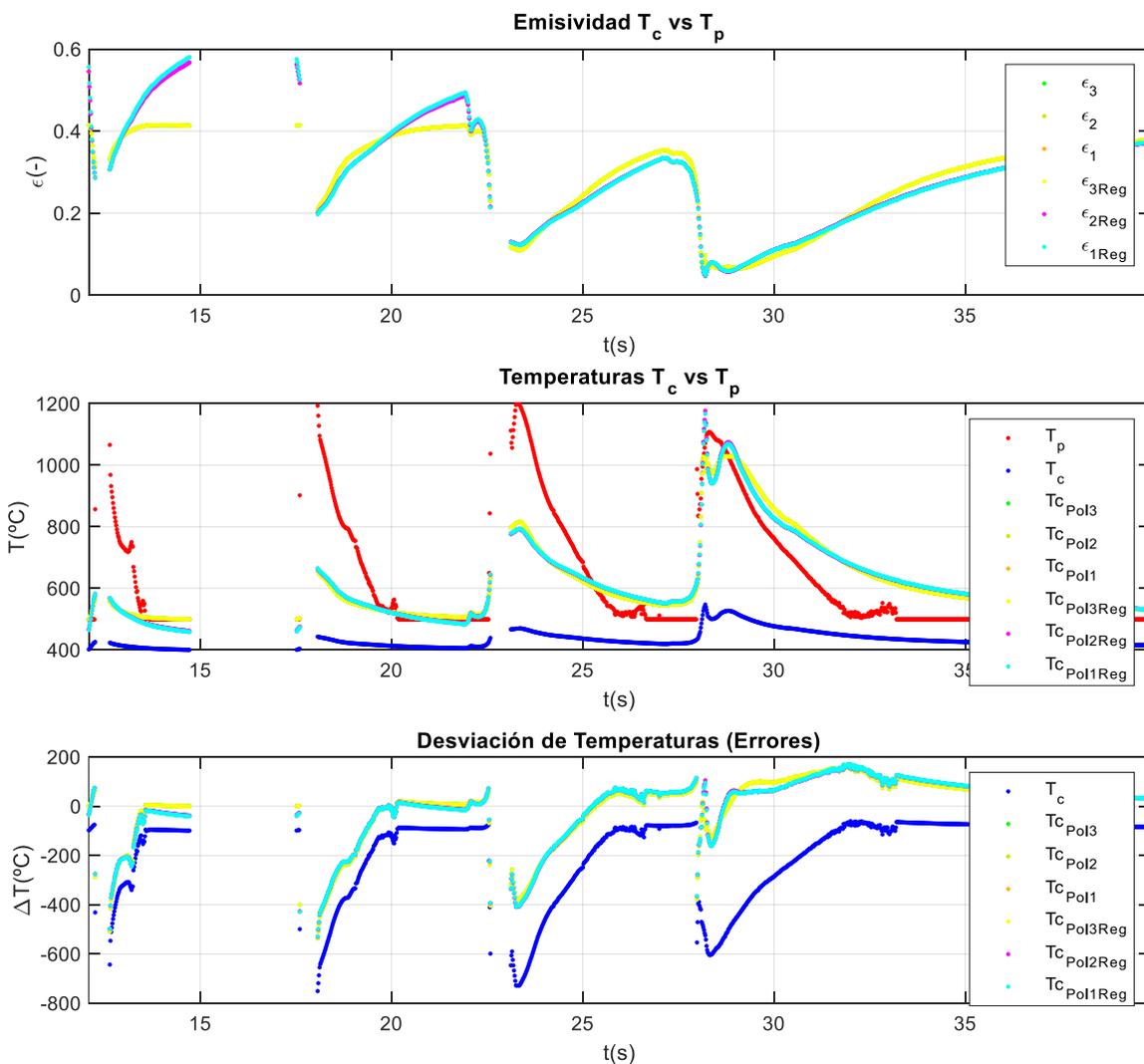


Figura 142: Resultados del método de ajuste $T_c - T_p$.

4.1.4. Resultados de los Ciclos de Calentamiento y Enfriamiento de la Pieza

Por último, tenemos los resultados finales de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza donde se han combinado distintos instrumentos como el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® (Ver subapartado B.1 de 3.3.5), la cámara FLIR A325 G® (Ver subapartado B.2 de 3.3.5) y la cámara OPTRIS PI 05 M® (Ver subapartado B.3 de 3.3.5).

En el caso de la cámara FLIR A325 G®, las imágenes IR que se consiguen son en la dirección perpendicular a la superficie a analizar (Figura 120, Izq.); mientras que los de OPTRIS PI 05 M®, son en una perspectiva angular (Figura 120, Drcha.). Tal y como se ha mencionado anteriormente, esto hace que el procesado de los videos IR procedente de la segunda de las cámaras sea computacionalmente más costoso y se tenga que implementar los algoritmos de cálculo que se describen en 3.4.3.

Tal y como se expone en dicho subapartado, cabe la posibilidad de implementar distintos tipos de interpolación con el fin de obtener la **distribución 2D del campo térmico**. Aquí, se exponen las diferencias que proporciona cada una de ellas con el fin de aclarar la razón del procedimiento que finalmente se ha implementado.

Siendo esto así, las gráficas tridimensionales de la parte izquierda de la Figura 143 corresponden a la **interpolación cartesiana**, mientras que los de la derecha son de la **interpolación polar**. Además, se distinguen los resultados que se obtienen mediante distintos puntos de análisis, donde los diagramas de la parte superior de la Figura 143 corresponden a las distribuciones que se consiguen mediante los puntos de adquisición de los perfiles de temperatura del software PIX Connect® (Figura 121), y los de abajo a los correspondientes a la discretización de la pared que se obtiene mediante el mallado virtual preestablecido (Figura 124).

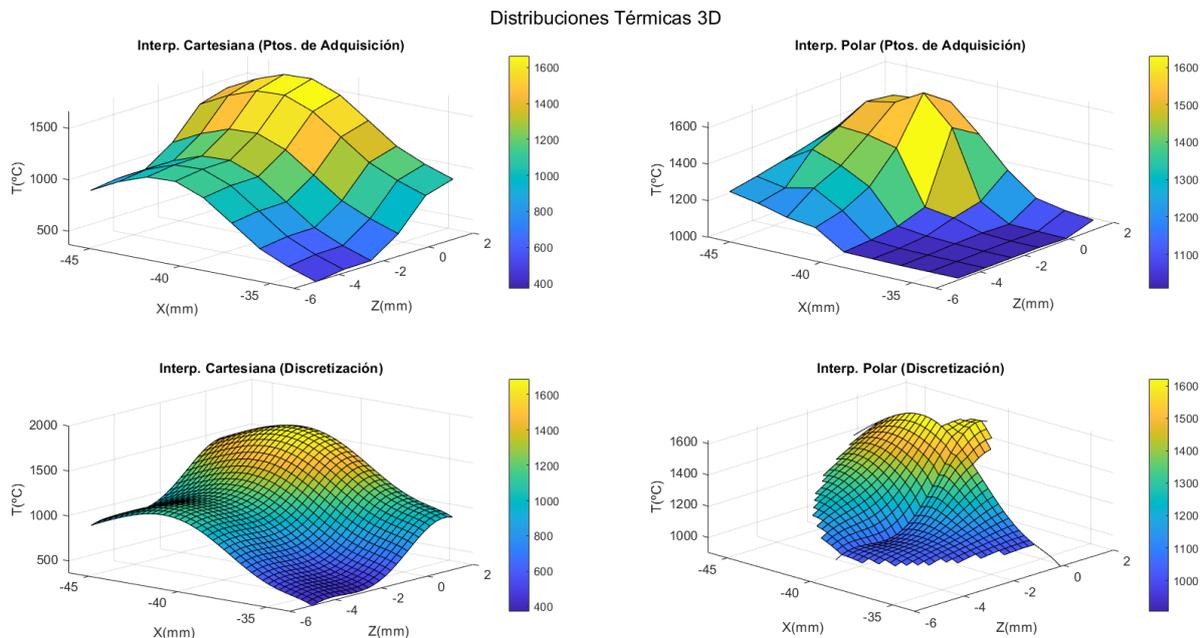


Figura 143: [Izq.] Interpolación 2D cartesiana según los puntos de adquisición (Arriba) y discretización (Abajo); [Drcha.] Interpolación 2D polar según los puntos de adquisición (Arriba) y discretización (Abajo).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base a los resultados obtenidos, se puede decir que la interpolación cartesiana no proporciona una representación realista de la distribución térmica debido a la generación del campo térmico por barridos en las direcciones horizontales y verticales. Consecuentemente, las temperaturas en las diagonales a estas direcciones son inferiores, cuando en realidad las temperaturas se mantienen prácticamente constante a una determinada distancia de la zona de aporte (TCP) indiferentemente de la dirección. Por consiguiente, la interpolación polar que genera el campo de temperaturas por revolución es una representación más fidedigna de la realidad, y es por ello que ha sido implementado en los algoritmos de cálculo para el procesado de videos IR de la cámara OPRIS PI 05 M® (Ver 3.4.3).

Siguiendo este procedimiento de cálculo y la correspondiente a la ampliación del rango (Ver 3.4.4), llegamos a las siguientes conclusiones en base a los resultados de la metodología desarrolladas para la estimación de temperaturas considerando variaciones de ε (Ver 4.1.3). En el ajuste $T_c - \varepsilon$, la emisividad variable (ε_{var}) es la que proporciona mejores resultados, mientras que la emisividad polinómica de grado 3 ($\varepsilon_{Pol.3}$) es para el ajuste $T_c - T_p$. Siendo esto así, la Figura 144 muestra la combinación de temperaturas que se obtiene de las cámaras FLIR A325G® y OPRIS PI 05 M® sin correcciones en verde, así como las correcciones mencionadas. En color naranja se indica la corrección con ε_{var} del ajuste $T_c - \varepsilon$, mientras que en color morado es indicado la del ajuste $T_c - T_p$ con $\varepsilon_{Pol.3}$.

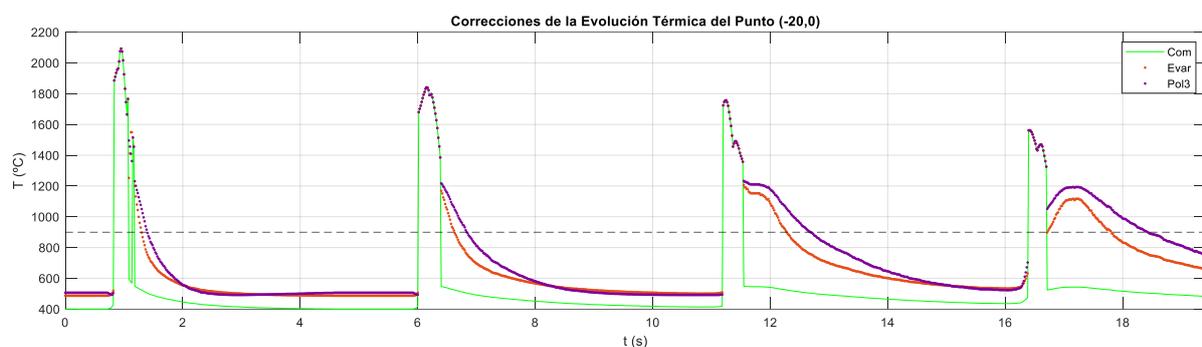


Figura 144: Evolución térmica del punto (-20,0) sin corregir (Verde), y corregidas con ε_{var} (Naranja) y $\varepsilon_{Pol.3}$ (Morado).

Tal y como se detalla en la Tabla 42 donde se indican las discrepancias máximas de cada capa en los solapes de rangos, la mejora de resultados es sustancial siendo superiores al 60%. Como excepción, la cuarta y última capa presenta peores resultados por el desfase entre los registros de las cámaras (Figura 144), y es por ello que se han considerado las desviaciones mínimas en lugar de las del solape.

Tabla 42: Resultados finales para el punto (-20,0).

$\Delta T_{max} (^{\circ}C)$	1. Capa	2. Capa	3. Capa	4. Capa
Sin correcciones	966,9090	838,9460	808,5910	801,7460 (782,5660)
Corregida con ε_{var}	383,6100	216,9100	150,9400	427,5900 (209,4200)
Mejora (%)	60,33	74,14	81,33	46,67 (73,24)
Corregida con $\varepsilon_{Pol.3}$	284,3000	168,1100	123,9500	274,4300 (132,6200)
Mejora (%)	70,60	79,96	84,67	65,77 (83,05)

4.2. Análisis de Riesgos

En este apartado, se analizan las distintas fuentes de riesgos que pueden afectar a la consecución de los objetivos del presente trabajo (Ver 1.2). Así, se detallan las posibles soluciones con el fin de evitar, o al menos minimizar, las consecuencias que pudieran tener. Para ello, se ha desarrollado una evaluación de la probabilidad de ocurrencia e impacto de los distintos acontecimientos en una matriz de riesgos.

Los riesgos pueden ser internos o externos dependiendo de su fuente, y su identificación se realiza en base a documentación de proyectos anteriores, bases de datos comerciales o experiencias de los compañeros del proyecto. Generalmente, las fuentes de riesgos en trabajos de monitorización y control térmico provienen del uso de herramientas manuales, gestión de los datos y problemas físicos por elevadas cargas de trabajo en un mismo ambiente. En lo que respecta a este apartado, se va a centrar en el análisis de problemas logísticos para la consecución de los objetivos (Ver 1.2), dejando por tanto fuera los riesgos físicos de ejecución.

La clasificación de los riesgos se realiza en base a su entorno, entre los cuales destacan la oficina (*O*) y el taller (*T*). Aquellos riesgos que no se producen en ninguno de los anteriores, también son considerados entre los riesgos restantes (*R*). Aquí, se incluyen sucesos como cortes de luz o la carga de trabajo. A modo de resumen, en la Tabla 43 se muestra el listado de riesgos sobre los que es necesario actuar en realización a este proyecto:

Tabla 43: Lista de riesgos y su clasificación.

RIESGOS DE OFICINA	
Ref.	Concepto
O.1.	Problemas con el formato de los datos adquiridos
O.2.	Problemas de conectividad y pérdida de datos
O.3.	Errores y disponibilidad de licencias
O.4.	Problemas de programación y uso de softwares
O.5.	Falta de conocimiento sobre el funcionamiento de los instrumentos
O.6.	Baja fiabilidad de las fuentes de información
RIESGOS DE TALLER	
Ref.	Concepto
T.1.	Problemas logísticos del taller
T.2.	Disponibilidad del láser y la celda LMD-w
T.3.	Disponibilidad del material e instrumentos
T.4.	Problemas de conectividad de instrumentos al ordenador
RIESGOS RESTANTES	
Ref.	Concepto
R.1.	Necesidad de soporte técnico
R.2.	Necesidad de colaboración interdepartamental

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

R.3.	Cortes de electricidad
R.4.	Carga de trabajo
R.5.	Problemas psicosociales

Una vez que se han identificado las distintas fuentes de riesgos (Tabla 43), se procede a la evaluación de la probabilidad de ocurrencia e impacto de cada uno de ellos. Para ello, se ha elaborado la siguiente matriz, donde se establece un criterio cuantitativo para la puntuación de la probabilidad (P) y el impacto (I):

Tabla 44: Matriz de probabilidad e impacto de los riesgos.

		IMPACTO (I)		
		Bajo (0, 10)	Medio (0, 50)	Alto (0, 90)
PROBABILIDAD (P)	Baja (0, 20)	R.3 (0,02)	O.6, R.4 (0,10)	O.2, O.3 (0,18)
	Media (0, 50)	O.1 (0,05)	T.1, R.1 (0,25)	O.5, T.3, R.5 (0,45)
	Alta (0, 80)	R.2 (0,08)	O.4 (0,40)	T.2, T.4 (0,72)

De esta forma, se determina el nivel de gravedad (G) de cada uno de los riesgos detectados (Tabla 44). Cuanto mayor sea este, mayor será el peligro que supone y, por consiguiente, las medidas a tomar deberán ser más exhaustivas e inmediatas. Se trata por tanto de un cuantificador de la gestión y la respuesta a tomar en cada caso.

Siendo esto así, se distinguen cinco niveles de gravedad que se detallan en la Tabla 45. Cada uno de ellos, requiere de medidas específicas que definen un plan de prevención, junto a un plan de acción en caso de producirse los acontecimientos considerados, es decir, con una perspectiva a posteriori.

Tabla 45: Medidas a tomar de cada riesgo según el nivel de gravedad (G).

Gravedad Elevada		$G \geq 0,50$
Ref.	Plan de Prevención	Plan de Acción
T.2	Acordar un calendario flexible y acorde con las necesidades de cada grupo de trabajo.	Replanteamiento cronológico y aplazamiento de hitos del proyecto.
T.4	Consultar los manuales de usuario y prever de conectores correspondientes.	Búsqueda de alternativas para los protocolos de conexión.
Gravedad Semi-elevada		$0,35 \leq G < 0,50$
Ref.	Plan de Prevención	Plan de Acción
O.4	Planificación del esquema de programación y previsión de funciones.	Corrección de errores y depuración del código para su optimización.
O.5	Formación sobre el empleo de instrumentos.	Consulta de manuales sobre el empleo de instrumentos.
T.3	Planificación y gestión del empleo del material e instrumentos.	Compartir material e instrumentos con otros compañeros fuera del grupo de trabajo.
R.3	Impulsar políticas de igualdad e integración trabajando la empatía y el asertividad.	Seguir el protocolo de actuación en situación de acoso o discriminación.
Gravedad Moderada		$0,25 \leq G < 0,35$
Ref.	Plan de Prevención	Plan de Acción
O.2	Protección de datos periódicamente y en diferentes localizaciones.	Restauración de copias de seguridad y revisión de los protocolos de autoguardado.
O.3	Planificación y gestión de pago de cuotas.	Posesión de herramientas alternativas.
T.1	Planificación y gestión del proyecto.	Aceptación de alternativas de ejecución.
R.1	Fijación de plan de seguimiento sobre uso y mantenimiento de los instrumentos.	Contacto con el soporte técnico para fijar una reunión presencia o telemática.
Gravedad Reducida		$0,10 \leq G < 0,25$
Ref.	Plan de Prevención	Plan de Acción
O.6	Estudio bibliográfico en profundidad contrastando distintas fuentes.	Corrección de las medidas adoptadas en base a los resultados obtenidos.
R.4	Planificación y gestión cronológica del trabajo personal.	Solicitud de asistencia a compañeros y acuerdo con el jefe y/o cliente.
Gravedad Despreciable		$G < 0,10$
Ref.	Plan de Prevención	Plan de Acción
O.1	Consulta de formatos de exportación de datos de los instrumentos previa compra.	Adaptación de código de programación.
R.2	Acuerdo de un plan de colaboración interdepartamental.	Comunicación con el responsable del departamento correspondiente.
R.3	Revisión de instalaciones eléctricas y la potencia contratada.	Disposición de sistemas de seguridad y alimentadores alternativos.

A pesar de que se haya definido un plan de prevención y acción, resulta necesario un seguimiento de los riesgos verificando que se cumplen las medidas acordadas. Asimismo, se trata de detectar nuevos riesgos que puedan poner en peligro el correcto desarrollo de futuros proyectos.

4.3. Análisis Económico

El análisis económico de un proyecto consiste en el estudio de su estructura y la evolución de sus resultados, donde se incluye la rentabilidad que supone la realización del mismo. En este sentido, el balance de las pérdidas y ganancias es de vital importancia, para lo cual, lo primero que hay que calcular es el **descargo de gastos** (Ver 4.3.1).

Una vez se hayan estimado las pérdidas, se procede al cálculo de los ingresos deseados con el fin de rentabilizar el trabajo realizado. Aquí entra en juego el **presupuesto del proyecto** (Ver 4.3.2), que sería el valor que le damos al mismo para transmitir todos los conocimientos adquiridos a un tercero, y poder así implementarlo en la industria. Por lo tanto, se trata de una perspectiva de cara a un cliente externo en base a un plan de implementación que se ha definido para el proyecto (Ver 1.3.2), donde se valora la rentabilidad final a través de la cuenta de pérdidas y ganancias resultante.

4.3.1. Descargo de Gastos

A continuación, se presenta el descargo de gastos de este Trabajo Fin de Máster (TFM) con el fin de realizar un análisis de su rentabilidad. Para ello, calculan los gastos directos e indirectos, así como los costes financieros que supone la realización del presente proyecto.

Los **gastos directos** se desglosan en diferentes partidas como las horas internas, las amortizaciones y los gastos materiales. Asimismo, las horas internas se dividen en cuatro, dependiendo de la categoría del personal que ha realizado la tarea correspondiente. En la siguiente tabla se muestran los gastos procedentes a dicha partida:

Tabla 46: Gastos de Horas Internas.

HORAS INTERNAS				
Nº Ref.	Uds. (h)	Concepto	Coste Unitario (€/h)	Coste Total (€)
1.1	500	Ingeniería Junior	62,05	31.025,00
1.2	50	Ingeniería Senior	81,15	4.057,50
1.3	20	Director de Proyecto	100,25	2.005,00
1.4	80	Maestro de Taller	49,99	3.999,20
Subtotal				41.086,70

En cuanto a los gastos amortizables de los equipos, se considera una utilización solamente durante la jornada laboral, la cual contiene 1.500 horas anuales. Así, los gastos procedentes a las amortizaciones son los que se detallan en la Tabla 47:

Tabla 47: Gastos de Amortizaciones.

AMORTIZACIONES						
Nº Ref.	Uso (h)	Concepto	Coste (€)	Vida Útil (años)	Coste Ud. (€/h)	Coste Total (€)
2.1	128	Celda de LMD-w	500.000,00	5	66,67	8.533,33
2.2	128	Robot ABB	30.000,00	5	4,00	512,00
2.3	128	Láser de Estado Sólido	80.000,00	5	10,67	1.365,33
2.4	128	Cabezal COAXwire® de Fraunhofer IWS	20.000,00	2	6,67	853,33
2.5	128	Alimentador de Hilo	10.000,00	2	3,33	426,67
2.6	24	Máquina TITAN®	1.500.000,00	5	200,00	4.800,00
2.7	32	Termopar	1.000,00	1	0,67	21,33
2.8	128	Pirómetro IMPAC IGAR 12-LO	2.000,00	1	1,33	170,67
2.9	128	Cámara FLIR A325 G®	16.000,00	1	10,67	1.365,33
2.10	96	Cámara OPTRIS PI 05 M®	3.700,00	1	2,47	236,80
2.11	64	Mesa Caliente	1.200,00	2	0,40	25,60
2.12	32	Horno Calefactable	4.000,00	2	1,33	42,67
2.13	800	Ordenador	1.500,00	5	0,20	160,00
2.14	300	Licencia MS Office	180,00	1	0,12	36,00
2.15	500	Licencia Matlab	800,00	1	0,53	266,67
Subtotal						18.815,73

Para terminar con los gastos directos, tenemos la partida de los gastos materiales. En el caso del presente trabajo, los costes de los materiales que han sido empleados son los que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 48: Gastos de materiales.

GASTOS MATERIALES				
Nº Ref.	Uds.	Concepto	Coste Unitario (€/Ud.)	Coste Total (€)
3.1	1	Bobina de 16Kg y 1.2mm de Hilo de Ti ₆ Al ₄ V	91,80	91,80
3.2	5	Sustrato de Titanio grado 2	420,00	2.100,00
3.4	8	Material de Oficina	25,00	200,00
Subtotal				2.391,80

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por otra parte, los gastos que no se incluyen en ningún concepto de los mencionados son considerados como **gastos indirectos**. Su valor es estimado como el 7% de los gastos directos. Asimismo, se incluyen los **costes financieros** que suponen el 4% del gasto resultante. En la Tabla 49 se muestra el desglose de la descarga de todos los gastos del presente TFM:

Tabla 49: Desglose del Descargo de Gastos.

CONCEPTO	COSTE TOTAL
Horas Internas	41.086,70
Amortizaciones	18.815,73
Gastos Materiales	2.391,80
Gastos Directos	62.294,23
Gastos Indirectos (7%)	4.360,60
Subtotal	66.654,83
Costes Financieros (4%)	2.666,19
Total	69.321,02

Por lo tanto, los gastos totales de este Trabajo Fin de Máster (TFM) ascienden a **sesenta y nueve mil, trescientos veintiún euros, con dos céntimos**.

4.3.2. Presupuesto

A partir del descargo de gastos que se ha realizado en el subapartado anterior (Ver 4.3.1), se estima el presupuesto para llevar el presente proyecto a producción, es decir, implementarlo en la industria vendiendo a un cliente externo. Para ello, se consideran uno **beneficios** del 10%, así como **impuestos** computables al IVA del 21%. En la tabla que se muestra a continuación, se detalla el desglose del presupuesto:

Tabla 50: Desglose del Presupuesto.

CONCEPTO	PRESUPUESTO TOTAL (€)
Gastos Totales	69.321,02
Beneficios (10%)	6.932,10
Subtotal	76.253,13
Impuestos (21%)	16.013,16
Total	92.266,28

En resumen, el presupuesto de este Trabajo Fin de Máster (TFM) asciende a **noventa y dos mil, doscientos sesenta y seis euros, con veintiocho céntimos**.

En Bilbao, septiembre del 2021



Xabat Orue Llona

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Las principales conclusiones que se extraen de este Trabajo Fin de Máster (TFM) son las siguientes:

- ✓ La **monitorización térmica del proceso LMD** es de vital importancia para el control de la estabilidad del proceso, así como la obtención de unos buenos resultados finales. Por lo tanto, la predicción de la calidad de las piezas resultantes depende en gran medida del comportamiento térmico. Esto es aplicable para distintos procesos, pero la importancia del control de temperaturas es mayor en el caso del LMD debido a la complejidad del proceso y el reciente desarrollo de la tecnología.
- ✓ La obtención de los **algoritmos internos de las cámaras IR** es una labor un tanto complicada, donde la información es muchas veces propiedad intelectual del fabricante. Por consiguiente, los manuales de usuario y catálogos resultan insuficientes para la comprensión del funcionamiento de estos instrumentos, y se requieren de procedimientos de estimación para el ajuste de los resultados obtenidos con distintas fuentes. En el caso de la metodología que se ha seguido, los resultados para el rango superior R2 de la cámara FLIR A325 G[®] son satisfactorios (Ver 4.1.1). Sin embargo, no sucede lo mismo con la cámara OPTRIS PI 05 M[®], donde se han tenido que procesar los videos IR directamente desde el software PIX Connect[®].
- ✓ La **calibración de la emisividad mediante el método del taladrado de agujeros** proporciona unos resultados que son coherentes con la literatura [34], lo cual pone en evidencia su validez. Así, la emisividad de las piezas de Ti₆Al₄V que se han fabricado por el proceso LMD presentan valores en torno a 0,23 para temperaturas inferiores a 300 °C. Asimismo, la emisividad estimada de las pruebas transitorias proporciona valores de 0,48 ÷ 0,59 (Ver 4.1.2), lo cual habría que comprobar con la correcta introducción de valores en los ajustes de la cámara IR.
- ✓ La **emisividad** es un parámetro intrínseco del material que depende de muchos factores, entre los cuales destaca la rugosidad que causa la oxidación durante el proceso de aporte, especialmente en ausencia de la atmósfera protectora como en los casos analizados. Asimismo, la longitud de onda en la que se realiza la medición de temperaturas a través de instrumentos radiométricos influye en el valor de la emisividad espectral, donde se ha observado una reducción de dicho parámetro en el baño fundido debido a cambios de fase del material para el rango espectral LWIR, pero no para VIS (Ver 4.1.3).

- ✓ El método desarrollado para la **estimación de temperaturas** considerando variaciones de emisividad (Ver 3. Tarea) proporciona buenos resultados, ya que la reducción de las desviaciones de temperaturas es significativa para los dos métodos de ajuste que se han implementado (Ver 4.1.3).
- ✓ El procedimiento para la **determinación de los ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza** que se ha desarrollado proporciona unos resultados satisfactorios, ya que la mejora en el salto térmico entre rangos al combinar cámaras IR para la ampliación de temperaturas es sustancial. La mejora porcentual es superior al 60% en la mayoría de los casos, lo cual pone en evidencia la coherencia de datos obtenidos con distintos instrumentos a pesar de operar en distintos rangos espectrales gracias a la corrección de temperaturas que se ha realizado. Por lo tanto, la metodología desarrollada sirve para ampliar el rango de temperaturas combinando distintos instrumentos termométricos, entre los cuales destacan el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22[®], y las cámaras FLIR A325 G[®] y OPTRIS PI 05 M[®].

Una vez realizado el presente trabajo, se han detectado los siguientes campos de interés en los que se puede ahondar de cara a futuro como parte de las líneas de investigación y trabajo:

- Obtención de **algoritmos internos de la cámara OPTRIS PI 05 M[®]**, e implementación en Matlab[®] a través del Connect SDK[®] o Direct SDK[®] (Ver 1. Tarea).
- Comprobación de la **calibración de la emisividad** para rangos de temperatura superiores, ya que el procedimiento que se ha seguido no es del todo preciso debido a la estimación realizada (Ver 4.1.2).
- Estimación de la **emisividad direccional** variando la dirección de observación de la cámara siguiendo el procedimiento desarrollado (Ver 3. Tarea).
- Obtención de la **emisividad por zonas** cambiando la posición del pirómetro y siguiendo la metodología desarrollada (Ver 3. Tarea).
- Repetición de **ensayos en atmosfera inerte con la cámara (bolsa) de atmósfera controlada** con el fin de reducir la oxidación de las piezas finales, y seguir el mismo planteamiento experimental insertando el pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22[®] y la cámara FLIR A325 G[®] en su interior (Ver 4. Tarea).
- Determinación del **tamaño y distribución de temperaturas en el baño fundido** (Ver 5. Tarea).
- Desarrollo del **control en lazo cerrado** para la implementación de la herramienta de monitorización térmica insitu del proceso LMD.
- Programación del **ejecutable de la herramienta** desarrollada tanto para la monitorización offline como online.

- **Estudios en la pieza resultante** ante diferentes condiciones térmicas:
 - Microestructura resultante.
 - Tensiones residuales.
 - Distorsiones.
 - Rugosidad superficial y defectos externos.
 - Defectos internos (poros, grietas, inclusiones...).
 - Comportamiento mecánico:
 - Resistencia estática.
 - Resistencia a fatiga.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Universidad del País Vasco (UPV/EHU), "Máster en Ingeniería Mecánica," *Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*, 2021. <https://www.ehu.es/es/web/master/master-ingenieria-mecanica> (accessed Jul. 10, 2021).
- [2] Escuela de Ingenierías de Bilbao (UPV/EHU), "Máster Próprio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta," *Escuela de Ingenierías de Bilbao (UPV/EHU)*, 2021. <https://www.ehu.es/es/web/graduondokoak/master-tecnologias-aeronauticas-maquina-herramienta> (accessed Jul. 10, 2021).
- [3] Universidad del País Vasco (UPV/EHU), "Escuela de Ingeniería de Bilbao," *Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*, 2021. <https://www.ehu.es/es/web/bilboko-ingeniaritza-eskola/beste-unibertsitateko-masterrak> (accessed Jul. 10, 2021).
- [4] Tekniker, "Tekniker Centro Tecnológico y de Investigación," *Tekniker*, 2021. <https://www.tekniker.es/es> (accessed Jul. 10, 2021).
- [5] Basque Research Technology Alliance (BRTA), "BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE," *Basque Research Technology Alliance (BRTA)*, 2021. <https://www.brta.eus/> (accessed Jul. 10, 2021).
- [6] Grupo SPRI, "El centro tecnológico vasco Leartiker se une a BRTA," *Grupo SPRI*, Jul. 08, 2021. <https://www.spri.eus/es/tecnologia-comunicacion/el-centro-tecnologico-vasco-leartiker-se-une-a-brta/> (accessed Jul. 08, 2021).
- [7] Universidad del País Vasco (UPV/EHU), "ADDI: Archivo Digital de Docencia e Investigación," *Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*, 2021. <https://addi.ehu.es/> (accessed Jul. 10, 2021).
- [8] Universidad del País Vasco (UPV/EHU), "Universidad del País Vasco," *Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*, 2021. <https://www.ehu.es/es/home> (accessed Aug. 22, 2021).
- [9] B. Redwood, "Additive manufacturing technologies: An overview," *HUBS A Protolabs Company*, 2021. <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/> (accessed Apr. 10, 2021).
- [10] R. M. Mahamood, *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*. 2018. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-64985-6>
- [11] A. Lamikiz Mentxaka, "Tema 1.1: Introducción al Láser," *Apuntes de la asignatura "Additive Manufacturing & Thermal Enhanced Processes" del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)*.

- Departamento de Fabricación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), Bilbao, p. 46, 2020.
- [12] A. Lamikiz Mentxaka, "Tema 1.2: Procesado de Materiales mediante Láser," *Apuntes de la asignatura "Additive Manufacturing & Thermal Enhanced Processes" del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)*. Departamento de Fabricación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), Bilbao, p. 40, 2020.
- [13] A. Lamikiz Mentxaka, "Tema 1.3: Tipos de Láser," *Apuntes de la asignatura "Additive Manufacturing & Thermal Enhanced Processes" del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)*. Departamento de Fabricación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), Bilbao, p. 21, 2020.
- [14] A. Lamikiz Mentxaka, "Tema 1.4: Máquinas y guiado del láser," *Apuntes de la asignatura "Additive Manufacturing & Thermal Enhanced Processes" del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)*. Departamento de Fabricación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), Bilbao, p. 27, 2020.
- [15] D. Basting, K. Pippert, and U. Stamm, "Excimer laser; 'History and future prospects of excimer laser technology,'" *Wikipedia, Semantic Scholar*, 2002.
<https://www.semanticscholar.org/paper/History-and-future-prospects-of-excimer-laser-Basting-Pippert/fd265dd9f51ce5c8d9dae74608fd64845d8588c8> (accessed May 10, 2021).
- [16] A. Lamikiz Mentxaka and J. I. Arrizubieta Arrate, "Tema 1.5: Aplicaciones del Láser," *Apuntes de la asignatura "Additive Manufacturing & Thermal Enhanced Processes" del Máster Propio en Tecnologías Aeronáuticas y Máquina Herramienta de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)*. Departamento de Fabricación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), Bilbao, p. 9, 2020.
- [17] M. S. J. Kelbassa, A. Gasser, and N. Pirch, "WIRE VS . POWDER IN LMD Fields of Application Laser Metal Deposition," *Fraunhofer ILT*. p. 20, 2018.
- [18] I. Shakhverdova, S. Nowotny, S. Thieme, F. Kubisch, E. Beyer, and C. Leyens, "Coaxial Laser Wire Deposition," *Journal of Physics: Conference Series*, p. 5, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012026.
- [19] I. Garmendia, "Desarrollo de un sistema de monitorización y control para el proceso de aporte metálico por láser basado en la digitalización tridimensional de la geometría," Eibar (Tesis Doctoral en proceso), Sep. 2021.
- [20] Fraunhofer IWS, "Coaxial laser wire cladding head COAXwire," *Fraunhofer IWS*, 2021.
https://www.iws.fraunhofer.de/en/technologyfields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXwire.html (accessed May 10, 2021).

- [21] SCIAKY Inc., “Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing,” *SCIAKY Inc.*, 2021. <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder> (accessed Jul. 10, 2021).
- [22] M. Mazzarisi, S. L. Campanelli, A. Angelastro, F. Palano, and M. Dassisti, “In situ monitoring of direct laser metal deposition of a nickel-based superalloy using infrared thermography,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 1–2, pp. 157–173, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06344-0.
- [23] M. Thiele, D. Dillkötter, J. Stoppok, M. Mönnigmann, and C. Esen, “Laser metal deposition controlling: Melt pool temperature and target / actual height difference monitoring,” *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 441–444, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.161.
- [24] S. Baraldo, A. Vandone, A. Valente, and E. Carpanzano, “Closed-Loop Control by Laser Power Modulation in Direct Energy Deposition Additive Manufacturing,” in *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, Fakhri Chaari, M. Haddar, Y. W. Kwon, F. Gherardini, and V. Ivanov, Eds. Springer, 2020, pp. 129–143. doi: 10.1007/978-3-030-46212-3.
- [25] J. Nölcke and S. Boley, “Modeling and closed-loop control of a laser deposition welding process with coaxial wire feed,” in *StuFoKon Studentische Forschungskonferenz*, 2020, pp. 114–122.
- [26] M. Motta, A. G. Demir, and B. Previtali, “High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition,” *Additive Manufacturing*, vol. 22, no. February, pp. 497–507, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.043.
- [27] J. H. Lienhard, “A Heat Transfer Textbook,” 2020. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <http://ahtt.mit.edu>
- [28] Advanced Training Center, “Curso básico de termografía: Conceptos y aplicaciones.” p. 97, 2015.
- [29] N. Connor, “Thermal Properties of Titanium – Ti,” *Periodic Table*, 2020. <https://www.periodic-table.org/titanium-thermal-properties/> (accessed Jul. 10, 2021).
- [30] M. Vollmer and K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, vol. 2. Brandenburg, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.
- [31] Edmund Optics Inc., “What is SWIR?,” *Edmund Optics Inc.*, 2021. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/> (accessed May 10, 2021).
- [32] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes, “Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 12305–12348, 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [33] Madhu, “Difference Between Black Body and Grey Body,” *Difference Between*, 2018. <https://www.differencebetween.com/difference-between-black-body-and-vs-grey-body/> (accessed Apr. 10, 2021).

- [34] Inc. LumaSense Technologies, "TABLE OF EMISSIVITY Introduction :," Santa Clara, CA 95054, USA, 2021. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: www.lumasenseinc.com
- [35] OPTRIS GmbH, "BASIC PRINCIPLES of non-contact temperature measurement," *OPTRIS GmbH*, vol. 0. p. 40. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.optris.es>
- [36] OPTRIS GmbH, "PRINCIPIOS FUNDAMENTALES de la medición de la temperatura sin contacto," *OPTRIS GmbH*, vol. 0. p. 40. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.optris.es>
- [37] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 12305–12348, 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [38] E. Barreira, E. Bauer, N. Mustelier, and V. P. Freitas, "Measurement of materials emissivity- Influence of the procedure," 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/282572438>
- [39] IMPAC Infrared GmbH, *Pyrometer- Handbook: Non-contact Thermometry*. Germany: IMPAC Infrared GmbH, 2004.
- [40] Materiales de Laboratorio, "Espectrómetro," *Materiales de Laboratorio*, 2021. <https://materialeslaboratorio.com/espectrometro/> (accessed Jun. 10, 2021).
- [41] C. Schiewe and K. Schindler, "The influence of the emissivity on the non-contact temperature measurement," *DIAS Infrared GmbH, Dresden*, vol. 1. pp. 1–3, 2014.
- [42] S. W. Holman, R. R. Lawrence, and L. Barr, "Punto de fusión; 'Melting Points of Aluminum, Silver, Gold, Copper, and Platinum,'" *Wikipedia, JSTOR*, 1896. https://www.jstor.org/stable/20020628?origin=crossref&seq=1#metadata_info_tab_contents (accessed May 10, 2021).
- [43] Z. A. Mierzejewska, R. Hudák, and J. Sidun, "Mechanical properties and microstructure of DMLS Ti6Al4V alloy dedicated to biomedical applications," *Materials*, vol. 12, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12010176.
- [44] H. Watanabe, J. Ishii, H. Wakabayashi, T. Kumano, and L. Hanssen, "Spectral Emissivity Measurements," in *Experimental Methods in the Physical Sciences*, vol. 46, Academic Press, 2014, pp. 333–366. doi: 10.1016/B978-0-12-386022-4.00009-1.
- [45] S. J. Altenburg, A. Straße, A. Gumenyuk, and C. Maierhofer, "In-situ monitoring of a laser metal deposition (LMD) process: comparison of MWIR, SWIR and high-speed NIR thermography," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 00, no. 00, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1080/17686733.2020.1829889.
- [46] C. Shi, K. J. Daun, and M. A. Wells, "Evolution of the Spectral Emissivity and Phase Transformations of the Al-Si Coating on Usibor® 1500P Steel During Austenitization," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 47, no. 6, pp. 3301–3309, 2016, doi: 10.1007/s11663-016-0791-x.

- [47] K. Yu, H. Zhang, Y. Liu, and Y. Liu, "Study of normal spectral emissivity of copper during thermal oxidation at different temperatures and heating times," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 1066–1074, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.116.
- [48] LibreTexts, "X-ray diffraction (XRD) basics and application," *LibreTexts*, 2021. [https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Diffraction_Techniques/X-ray_diffraction_\(XRD\)_basics_and_application#:~:text=The result of X-ray diffraction plots th](https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Diffraction_Techniques/X-ray_diffraction_(XRD)_basics_and_application#:~:text=The result of X-ray diffraction plots th) (accessed Jul. 10, 2021).
- [49] H. J. Jo, J. L. King, K. Blomstrand, and K. Sridharan, "Spectral emissivity of oxidized and roughened metal surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, pp. 1065–1071, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.103.
- [50] Sensortherm GmbH, "2-Color Pyrometers," *Sensortherm GmbH*, 2021. <https://www.sensortherm.de/en/2-color-pyrometers> (accessed Jun. 10, 2021).
- [51] Inc. Advanced Energy Industries, "Understanding two-Color (ratio) pyrometer accuracy." pp. 95–98, 2020. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.advancedenergy.com/>
- [52] H. Carrington Bolton, "Termometría; 'Evolution of The Thermometer,'" *Wikipedia, The Chemical Publishing Co.*, 1743. <https://archive.org/details/evolutionoftherm00boltrich/page/81/mode/2up?view=theater> (accessed Apr. 10, 2021).
- [53] Blog TERMOGRAFÍA, "Termografía," *Blog TERMOGRAFÍA*, 2015. <http://blogtermografia.com/que-es-la-termografia/> (accessed Apr. 10, 2021).
- [54] Innovative Health & Wellness Group, "What is Breast Thermography?," *Innovative Health & Wellness Group*, 2021. <https://www.innovativehealthdallas.com/breast-thermography/> (accessed Jul. 10, 2021).
- [55] Women's Natural Health Centre, "Thermography vs . Thermometry – Knowing the Difference Can Save Your Life," *Women's Natural Health Centre*. 2021. Accessed: Jul. 10, 2021. [Online]. Available: <https://wnhc.wordpress.com/thermography-vs-thermometry-knowing-the-difference-can-save-your-life/>
- [56] FLIR Systems, *The ultimate infrared handbook for R&D professionals*. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.flir.com>
- [57] FLIR Systems, *IR Automation Guidebook: Temperature Monitoring and Control with IR Cameras*. 2008. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.flir.com>
- [58] FLIR Systems, "GeniCam ICD FLIR Camera," vol. 1. p. 12, 2017. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.flir.com>
- [59] W. Minkina and S. Dudzik, *Infrared Thermography, Errors and Uncertainties*. Poland: Wiley, 2009.

- [60] W. Minkina and S. Dudzik, "Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 39, no. 8, pp. 758–763, 2006, doi: 10.1016/j.measurement.2006.03.001.
- [61] D. M. Aubrecht, B. R. Helliker, M. L. Goulden, D. A. Roberts, C. J. Still, and A. D. Richardson, "Continuous, long-term, high-frequency thermal imaging of vegetation: Uncertainties and recommended best practices," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 228–229, pp. 315–326, 2016, doi: 10.1016/j.agrformet.2016.07.017.
- [62] L. del Campo, R. B. Pérez-Sáez, X. Esquisabel, I. Fernández, and M. J. Tello, "Delcampo2006 - New experimental device for infrared spectral directional emissivity.pdf," *AIP*.
- [63] P. Hagqvist, F. Sikström, and A. K. Christiansson, "Emissivity estimation for high temperature radiation pyrometry on Ti-6Al-4V," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 46, no. 2, pp. 871–880, 2012, doi: 10.1016/j.measurement.2012.10.019.
- [64] P. Saunders, "General interpolation equations for the calibration of radiation thermometers," *Metrologia*, vol. 34, no. 3, pp. 201–210, 1997, doi: 10.1088/0026-1394/34/3/1.
- [65] S. Marinetti and P. G. Cesaratto, "Emissivity estimation for accurate quantitative thermography," *NDT and E International*, vol. 51, pp. 127–134, 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2012.06.001.
- [66] I. Arriola, A. Garay, A. Villar, L. M. Iriarte, and P. J. Arrazola, "Arriola2010 - Desarrollo de una metodología para la medición de parámetros in-process durante el mecanizado.pdf," in *18 Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación*, 2010, p. 33.
- [67] J. Pujana, L. Del Campo, R. B. Pérez-Sáez, M. J. Tello, I. Gallego, and P. J. Arrazola, "Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 11, pp. 3409–3416, 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/11/022.
- [68] Teledyne FLIR LLC, "What is a Non-Uniformity Correction (NUC)?," *FLIR Systems*, 2020. <https://www.flir.com/discover/professional-tools/what-is-a-non-uniformity-correction-nuc/> (accessed Jun. 10, 2021).
- [69] G. Bi, B. Schürmann, A. Gasser, K. Wissenbach, and R. Poprawe, "Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 555–561, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.010.
- [70] S. Ocylok, E. Alexeev, S. Mann, A. Weisheit, K. Wissenbach, and I. Kelbassa, "Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring," *Physics Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 228–238, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.167.
- [71] J. T. Hofman, B. Pathiraj, J. Van Dijk, D. F. De Lange, and J. Meijer, "A camera based feedback control strategy for the laser cladding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 11, pp. 2455–2462, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.027.

- [72] J. T. Hofman, "Development of an observation and control system for industrial laser cladding." p. 203, 2009. [Online]. Available: http://doc.utwente.nl/60627/%5Cnhttp://doc.utwente.nl/60627/1/thesis_J_Hofman.pdf
- [73] XILINX, "Field Programmable Gate Array (FPGA)," *XILINX*, 2021. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/what-is-an-fpga.html> (accessed Jul. 31, 2021).
- [74] P. Colodrón, J. Fariña, J. J. Rodríguez-Andina, F. Vidal, J. L. Mato, and M. Á. Montealegre, "FPGA-based measurement of melt pool size in laser cladding systems," *Proceedings - ISIE 2011: 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1503–1508, 2011, doi: 10.1109/ISIE.2011.5984383.
- [75] D. Hu, H. Mei, G. Tao, and R. Kovacevic, "Closed Loop Control of 3D Laser Cladding Based on Infrared Sensing," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, no. December, pp. 129–137, 2001.
- [76] J. Rodríguez-Araújo, A. Garcia-Diaz, V. Panadeiro, and C. Knaak, "Uncooled MWIR PbSe technology outperforms CMOS in RT closed-loop control and monitoring of laser processing," *Optics InfoBase Conference Papers*, vol. Part F45-I, 2017, doi: 10.1364/AIO.2017.ATH2A.2.
- [77] D. R. Wargulski *et al.*, "Quality management of laser cladding processes for additive manufacturing by new methods of visualisation and evaluation of thermographic data," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1080/17686733.2019.1592392.
- [78] U. Hassler, D. Gruber, O. Hentschel, F. Sukowski, T. Grulich, and L. Seifert, "In-situ monitoring and defect detection for laser metal deposition by using infrared thermography," *Physica Procedia*, vol. 83, pp. 1244–1252, 2016, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.131.
- [79] M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, and I. Smurov, "Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera," *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 244–247, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.10.044.
- [80] S. Liu, P. Farahmand, and R. Kovacevic, "Optical monitoring of high power direct diode laser cladding," *Optics and Laser Technology*, vol. 64, pp. 363–376, 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2014.06.002.
- [81] Z. Yan *et al.*, "Effect of thermal characteristics on distortion in laser cladding of AISI 316L," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 44, no. July 2018, pp. 309–318, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.06.011.
- [82] MathWorks, "MATLAB," *MathWorks*, 2021. <https://es.mathworks.com/> (accessed Aug. 10, 2021).
- [83] 3T Additive Manufacturing, "Titanium Ti-6Al-4V," 2020. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: www.3t-am.com

- [84] J. Lu, L. Chang, J. Wang, L. Sang, S. Wu, and Y. Zhang, "In-situ investigation of the anisotropic mechanical properties of laser direct metal deposition Ti6Al4V alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 712, pp. 199–205, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.msea.2017.11.106.
- [85] ABB, "IRBP A Industrial robot positioner," *ABB*. 2019. Accessed: Jul. 10, 2021. [Online]. Available: www.abb.com/robotics.
- [86] ABB, "IRB 4600 Industrial Robot," *ABB*. 2019. Accessed: Jul. 10, 2021. [Online]. Available: www.abb.com/robotics.
- [87] Tei, "Cable para termopar tipo-K," *Tei*. 2020. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://teii.mx/cable-termopar-tipo-k/>
- [88] IMPAC Infrared GmbH, "IMPAC Infratherm-Pyrometer ISR 12-LO - IGAR 13-LO: User Manual," *IMPAC Infrared GmbH*, vol. 0. p. 16. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: www.impac.com
- [89] FLIR Systems, "NEW! FLIR A325[®] INFRARED CAMERA SYSTEM," *FLIR Systems*. p. 1, 2008. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.flir.com>
- [90] OPTRIS GmbH, "OPTRIS PI 05M Technical Data," *OPTRIS GmbH*, vol. 0. p. 2. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.optris.es>
- [91] FLIR Systems, "ResearchIR 4: User 's Guide," *FLIR Systems*, vol. 3. p. 105, 2015. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.flir.com>
- [92] OPTRIS GmbH, "optris PIX Connect," *OPTRIS GmbH*, vol. 0. p. 126, 2018. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.optris.es>

ANEXO I: Código de Programación

```
%% MONITORIZACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO LASER METAL DEPOSITION (LMD)
% AUTOR:          Xabat Orue Llona
% TUTOR:          Iker Garmendia Sáez de Heredia
% FECHA:          01/03/2021 - 31/08/2021
% OBJETIVO:       % Determinar los ciclos de calentamiento y
                  % enfriamiento de las piezas fabricadas por LMD.
                  % De esta forma, se pretende garantizar una mejor
                  % fabricabilidad y predicción de la calidad de
                  % las piezas resultantes.

clc, clear all, close all;
%% Datos de Entrada %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Selección del Directorio de Importación
% 1. Tekniker      (\\ada)
% 2. PC Laptop     (C:)
% 3. USB           (E:)
Dir_Imp=1;

% Selección de Ensayos
% 1. Ensayo: Paredes Delgadas (PD)
% 2. Ensayo: Mesa Caliente (MC)
% 3. Ensayo: Impac-Flir-Optris (IFO)
% 4. Ensayo: Emisividad con Flir (EF)
Ensayo=3;

% Selección de Pruebas
Pruebas={17;...           % Pirómetro IMPAC (pI)
         17;...           % Cámara FLIR (cF)
         17};             % Cámara OPTRIS (cO)

% Tratamiento de Señales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Remuestreo *****
fs = 60;           % Frecuencia de Muestreo [Hz]

% Tipo de Ajuste de Registros *****
% 1. Ajuste por Máximos
% 2. Ajuste por Encendido del Láser
tipoAJ=2;

% Límites de saturación *****
% Cámara FLIR (cF)
% R0      R1      R2
Lim_Sup= [425 , 1500 , 1200]; % Límite superior [°C]
Lim_Inf= [-20 , 0      , 400]; % Límite inferior [°C]
```

```

% Algoritmos Internos de las Cámaras Termométricas %%%%%%%%%%

% Modo de Procesamiento de Datos
% IRFormat=0;          % Radiometric Signal Linear
% IRFormat=1;          % Temperature Linear, 0,1K resolution
% IRFormat=2;          % Temperature Linear, 0,01K resolution
IRFormat=1;

% Signal Linear Mode *****
% Parámetros de Calibración
      % R0          R1          R2
B      = [1348.80 , 1408.40 , 1478.10]; % Conversión S-T
R      = [12713.13, 15509.30, 18799.46]; % Conversión S-T
F      = [1.00    , 1.00    , 1.00];    % Conversión S-T

% Parámetros de Compensación del Valor del Píxel
      % R0          R1          R2
J0     = [5385    , 7679    , 7791];    % Global Offset
J1     = [97.4802 , 15.35   , 4.22];    % Global Gain
K1     = [0.8889  , 1.0423  , 0.9939]; % (Ajuste manual)
K2     = [0.0364  , 0.0761  , 0.0725]; % (Ajuste manual)

% Parám. de Compensación Atmosférica (Spectral response param.)
      % R0          R1          R2
alpha1 = [0.0066  , 0.0066  , 0.0066];
alpha2 = [0.0126  , 0.0126  , 0.0126];
beta1  = [-0.023  , -0.023  , -0.023];
beta2  = [-0.0067 , -0.0067 , -0.0067];
X      = [1.9     , 1.9     , 1.9];

% Temperature Linear Mode *****
% Rango de Temperaturas
      % FLIR          % OPTRIS
% Rango = 1.....R0 = -20 - 120 °C ... 900 - 2450 °C (27Hz)
% Rango = 2.....R1 = 0 - 350 °C ... 950 - 2450 °C (80Hz)
% Rango = 3.....R2 = 0 - 1200°C ... 1100 - 2450 °C (1kHz)

Rango={3;... % Cámara FLIR (cF)
1}; % Cámara OPTRIS (cO)

% Alineamiento del Rango
% IRAlignment=0; % Ajuste en 0 K
% IRAlignment=1; % Ajuste en el límite inferior del rango
IRAlignment=0;

% Offsets (Extraídos del setting QueryCase, Limits)
      % R0          R1          R2
Offset=[-20+273.15 , 0 , 120+273.15]; %[K]

```

```

% Procesado de Señales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Selección del Punto de la Pared (40x4 mm) *****
fP_mm= 0;           % Fila del Pto. en Z      [mm]
cP_mm= -20;        % Columna del Pto. en X   [mm]

% Selección de los Píxeles de Videos IR *****
% Filas
fP_px={225:227;... % Cámara FLIR (cF)          [px]
      28};         % Cámara OPTRIS (cO)       [px] (50 px.)

% Columnas
cP_px={50:58;...   % Cámara FLIR (cF)          [px]
      25};         % Cámara OPTRIS (cO)       [px] (150 px.)

% Mallado Virtual de la Pared *****
dH_Malla= 150;    % Discretización Horizontal
dV_Malla= 50;    % Discretización Vertical

% Parámetros del Proceso *****
L_p = 40;        % Longitud de las paredes [mm]
H_c = 1.00;     % Altura de capas [mm]
v_r = 25;       % Velocidad de avance del robot [mm/s]

% PIX Connect *****
Rpx=9.5;        % px=1mm
v_px= 238.1;   % Velocidad de avance por píxeles [px/s]
px_h= v_r/v_px; % Tamaño de pixel en horizontal [mm]

% Perfil de Temperaturas
% Inicios
P1= {[136,91];... % 1. Perfil horizontal
     [195,105]};  % 2. Perfil vertical

% Finales
P2= {[255,140];... % 1. Perfil horizontal
     [195,163]};  % 2. Perfil vertical

% N° de ptos.
Np= {9,...       % 1. Perfil horizontal
     6};         % 2. Perfil vertical

% Combinación de Cámaras FLIR y OPTRIS *****
Npas=4;         % Número de pasadas en común

```

```

%% Importar y Cargar Datos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Importar y guardar registro de temperaturas y videos IR *****
tic
f_Imp_Reg_Temperaturas(Dir_Imp,Ensayo,Pruebas,fP_px,cP_px);
toc

% Cargar Datos de Tiempos y Temperaturas *****
load('3. Datos_IFO.mat')

% Variables de Importación *****
%
%           Nr           [-]           Número de Registros
%
% Robot ABB
%           t_rA           [s]           Tiempo
%           P_rA           [-]           Puntos
%           Q_rA           [-]           Cuaterniones
%           L_rA           [-]           Láser on/off
%
% Pirómetro IMPAC
%           t_pI           [s]           Tiempo
%           T_pI           [°C]         Temperatura
%
% Cámara FLIR
%           t_cF           [s]           Tiempo
%           S_cF           [-]           Señal original media en (f_px,c_px)
%           videoIR_cF    [-]           Videos IR original
%
% Cámara OPTRIS
%           t_cO           [s]           Tiempo *(Falta la adquisición)
%           T_cO           [°C]         Temp. Máxima Absoluta (1 px)
%           T_mHS_cO       [°C]         Temp. Máxima de la Media Móvil (3x3 px)
%           videoIR_cO    [-]           Videos IR de Matlab
%
%           tPX_cO         [s]           Tiempo de PIX Connect
%           vPX_IR         [-]           Videos IR de PIX Connect
%
%           diagTT_cO     [s,°C]       Diagramas t-T de PIX Connect

```

```

%% Cálculos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Preprocesado de Señales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 0. Preprocesamiento de Datos *****
% Pirómetro IMPAC (pI)
% 1 pico en 1º Registro
for i=1:length(T_pI{1})
    if T_pI{1}(i)==max(T_pI{1})
%       T_pI{1}(i)= min(T_pI{1});
%       T_pI{1}(i)= T_pI{1}(i-1);
%       T_pI{1}(i)= [];
    end
end

% Cámara FLIR (cF)
% Conversión Temperature - Temperature
% Señal de pixeles seleccionados
[T_cF]=f_Conversion_TTc...
    (Nr,Rango,IRFormat,IRAlignment,Offset,S_cF);

% Video IR
[videoT_cF]=f_TempLinearMode...
    (Nr,Rango,IRFormat,IRAlignment,Offset, ...
    Lim_Sup,Lim_Inf,videoIR_cF);

% Hot Spot (HS) %
for r=1:Nr
    for i=1:length(videoT_cF{r})

        HS_cF{r}(i)=double(max(max(videoT_cF{r}{i})));

    end
end

% Cámara OPTRIS (cO)
% Hot Spot (HS) extraído en la importación...

% Borrar pico inicial
N=4; % N° de picos
for i=1:N
    T_cO{1}(i)=T_cO{1}(N+1);
end

```

```
% Tratamiento de Señales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 1. Remuestreo *****
[trA_rem,PrA_rem,LrA_rem,...           % Robot ABB
 tpI_rem,TpI_rem,tc_rem,Tc_rem,... % Pirómetro IMPAC (+ Cámara FLIR)
 tcF_rem,TcF_rem,VcF_rem,HScF_rem,... % Cámara FLIR
 tcO_rem,TcO_rem,VcO_rem,...           % Cámara OPTRIS
                                DcO_rem]=... % Diagrama de OPTRIS
f_Remuestreo_Total(Nr,fs,...
                   t_rA,P_rA,L_rA,...           % Robot ABB
                   t_pI,T_pI,...             % Pirómetro IMPAC
                   t_cF,T_cF,videoT_cF,HS_cF,...% Cámara FLIR
                   t_cO,T_cO,videoIR_cO,...    % Cámara OPTRIS
                   diagTT_cO); % Diagrama OPTRIS

% 2. Ajuste *****
[trA_AjTot,PrA_AjTot,LrA_AjTot,... Robot ABB
 tpI_AjTot,TpI_AjTot,...           Pirómetro IMPAC
 tcF_AjTot,TcF_AjTot,VcF_AjTot,... Cámara FLIR
 tcO_AjTot,TcO_AjTot,VcO_AjTot,... Cámara OPTRIS
                                DcO_AjTot]... Diagrama OPTRIS
=f_Ajuste_Total(Nr, tipoAJ,...
                trA_rem,PrA_rem,LrA_rem,... % Robot ABB
                tp_rem, Tp_rem,...          % Pirómetro IMPAC
                tcF_rem,HScF_rem,VcF_rem,...% Cámara FLIR (Según HS)
                tcO_rem,TcO_rem,VcO_rem,... % Cámara OPTRIS
                DcO_rem); % Diagrama OPTRIS

% 3. Final *****
[trA_FinTot,PrA_FinTot,LrA_FinTot,... Robot ABB
 tpI_FinTot,TpI_FinTot,...           Pirómetro IMPAC
 tcF_FinTot,TcF_FinTot,VcF_FinTot,... Cámara FLIR
 tcO_FinTot,TcO_FinTot,VcO_FinTot,... Cámara OPTRIS
                                DcO_FinTot]= ... Diagrama OPTRIS
f_Final_Total(Nr,trA_AjTot,PrA_AjTot,LrA_AjTot,...% Robot ABB
              tpI_AjTot,TpI_AjTot,...           % Pirómetro IMPAC
              tcF_AjTot,TcF_AjTot,VcF_AjTot,...% Cám. FLIR
              tcO_AjTot,TcO_AjTot,VcO_AjTot,...% Cám. OPTRIS
              DcO_AjTot); % Diag OPTRIS

% 4. Saturación *****
[trA_sat,PrA_sat,LrA_sat,... Robot ABB
 tpI_sat,TpI_sat,...           Pirómetro IMPAC
 tcF_sat,TcF_sat,VcF_sat,... Cámara FLIR
 tcO_sat,TcO_sat,VcO_sat,... Cámara OPTRIS
                                DcO_sat]=... Diagrama OPTRIS
f_Saturacion_Total(Nr,Lim_Inf,Lim_Sup,Rango,...
                   trA_FinTot,PrA_FinTot,LrA_FinTot,... % Robot ABB
                   tpI_FinTot,TpI_FinTot,...           % Piróm. IMPAC
                   tcF_FinTot,TcF_FinTot,VcF_FinTot,... % Cám. FLIR
                   tcO_FinTot,TcO_FinTot,VcO_FinTot,... % Cám. OPTRIS
                   DcO_FinTot); % Diag OPTRIS
```

```

% Procesado de Señales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 5. Procesado de Videos IR de OPTRIS *****
[MapaH,MapaV,
 DisTerm,Tptos_malla_cO,...
 Xdisc_cO,Zdisc_cO,...
 t_rA_L,Tpto_malla_cO]=...
   f_Procesado_OPTRIS(Nr,P1,P2,Np,Rpx, ...
                     fP_px,cP_px,dH_Malla,dV_Malla,...
                     trA_FinTot,PrA_FinTot,LrA_FinTot,... % Robot ABB
                     DcO_FinTot); % Diag OPTRIS

% 6. Mallado de la Pared *****
[VcF_Malla,Tp_cF,... % Cámara FLIR
 VcO_Malla,Tp_cO]=... % Cámara OPTRIS
   f_Mallado(Nr,tcF_final,TcF_final,VcF_final,...
            dH_Malla,dV_Malla,fP_mm,cP_mm,...
            t_rA_L,Tptos_malla_cO,Xdisc_cO,Zdisc_cO,...
            VcO_final,P1,P2,T_cO,tcO_final,...
            tpI_FinTot,TpI_FinTot,... % Pirómetro IMPAC
            tcF_FinTot,TcF_FinTot,VcF_FinTot,... % Cám. FLIR
            tcO_FinTot,TcO_FinTot,VcO_FinTot);...% Cám. OPTRIS

% 7. Combinación de Cámaras FLIR y OPTRIS *****
Tp_ComFO= f_Combinacion_FO(Nr,Npas,fP_mm,cP_mm,...
                          tcF_FinTot,Tp_cF,... % Cámara FLIR
                          tcO_FinTot,Tp_cO); % Cámara OPTRIS

% 8. Corrección de Temperaturas *****
[Tp_CorEvar,... % Evar del Ajuste Tc-E
 Tp_CorPol3]=... % Pol3 del Ajuste Tc-Tp
   f_Correccion_Temp(Nr,tipAJ,Rango,Lim_Inf,Lim_Sup,fP_mm,cP_mm,...
                    tp_rem,Tp_rem,... % Pirómetros IMPAC
                    tcF_FinTot,Tp_cF,... % Cámara FLIR
                    tcO_FinTot,Tp_cO,... % Cámara OPTRIS
                    Tp_ComFO); % Combinada cF-cO

```

*** Funciones internas de f_Correccion_Temp:**

```

% Reajuste de Registros *****
[tpI_FinCom, TpI_FinCom, ... Final común del Pirómetro IMPAC
tcF_FinCom, TcF_FinCom, ... Final común de la Cámara FLIR
tcO_FinCom, TcO_FinCom, ... Final común de la Cámara OPTRIS
tpI_SatCom, TpI_SatCom, ... Saturación del Pirómetro IMPAC
tcF_SatCom, TcF_SatCom] ... Saturación de la Cámara FLIR
    =f_Reajuste_IFO (Nr, tipoAJ, Rango, Lim_Inf, Lim_Sup, ...
                    tp_rem, Tp_rem, ... % Pirómetro IMPAC
                    tcF_FinTot, Tp_cF, ... % Cámara FLIR
                    tcO_FinTot, Tp_cO); % Cámara OPTRIS

% Estimación de la Emisividad *****

% Método de Ajuste Tc-E
[E_t, E_ls, E_med, t_ord, Tc_ord, E_ord, E_pol, C_pol, Ind_ord, ...
Tc_reg_ord, E_reg_ord, E_pol_reg, C_pol_reg, Ind_ord_reg, ...
    E_ls_reg, E_med_reg]= ...
    f_Emisividad_TcE (Nr, TpI_FinCom, tcF_FinCom, TcF_FinCom);

% Método de Ajuste Tc-Tp
[Tp_ord_TcTp, Tc_ord_TcTp, ... % Registro Seleccionado
Tp_pol3, E3, ...
Tp_pol2, E2, ...
Tp_poll, E1, ...
Tp_reg_ord_TcTp, Tc_reg_ord_TcTp, ... % Todos los Registros
Tp_pol3_RegS, E3_reg, ...
Tp_pol2_RegS, E2_reg, ...
Tp_poll_RegS, E1_reg] =...
    f_Emisividad_TcTp (Nr, TpI_FinCom, TcF_FinCom);

% Corrección de Temperaturas *****

% Método de Ajuste Tc-E
[Tc_Ecte, Tc_Evar, ... % Registro Seleccionado
Tc_Ecte_reg, Tc_Evar_reg]=... % Todos los Registros
    f_Temperatura_TcE (Nr, TcF_FinCom, E_ls, Tc_ord, E_pol, ...
    E_ls_reg, C_pol_reg); % Todos los Regs

% Método de Ajuste Tc-Tp
[Tc_cor3, Tc_cor2, Tc_cor1, ... % Registro Seleccionado
Tc_reg_cor3, Tc_reg_cor2, Tc_reg_cor1]=... % Todos los Registros
    f_Temperatura_TcTp (Nr, Tc_ord, E3, E2, E1, ... % Reg. Selec,
    E3_reg, E2_reg, E1_reg); % Todos los Regs

% Cálculo de Desviaciones *****
[Er_c, Er_cR, Er_cVarT, Er_cEvar_reg % Método Tc-E
Er_cor3, Er_cor2, Er_cor1, ... % Método Tc-Tp
Er_reg_cor3, Er_reg_cor2, Er_reg_cor1]= f_Desviaciones...
    (Nr, Tp_sat, Tc_sat, Tc_Ecte, Tc_Evar, Tc_Evar_reg, ... % Tc-E
    Tp_ord_TcTp, Tc_cor3, Tc_cor2, Tc_cor1, ... % Tc-Tp
    Tc_reg_cor3, Tc_reg_cor2, Tc_reg_cor1);

```

ANEXO II: Manual de Usuario

El presente anexo corresponde al manual de usuario del código de programación que se ha desarrollado en Matlab® para la herramienta de monitorización térmica del proceso LMD, mediante la cual se pretende facilitar la comprensión de su funcionamiento y poder así evitar errores en su utilización. Para ello, se exponen las partes del programa, así como la descripción de las funciones que se han implementado, donde se detallan los datos de entrada que son necesarios para el correcto funcionamiento de los mismos.

Empezando por las partes del programa, la primera de ellas corresponde a los **datos de entrada** donde se introduce la información necesaria para la importación y carga de datos, así como los cálculos posteriores. Concretamente, el primer paso que se lleva a cabo es la selección del `Ensayo` y las `Pruebas` que se desean importar en la siguiente parte del programa, así como la dirección correspondiente (`Dir_Imp`). Gracias al formato Cell por columnas que presentan estos y el resto de los parámetros, cabe la posibilidad de analizar varios registros de forma simultánea. Así, se amplían los datos para el procesamiento y se mejora la precisión de los ajustes realizados.

Posteriormente, se introducen los datos para el tratamiento de las señales donde se especifica la frecuencia de muestreo (`fs`), el tipo de ajuste (`tipoAJ`) y los límites de saturación (`Lim_Sup` y `Lim_Inf`). El primero de ellos corresponde al parámetro para el remuestreo de todos los registros con la misma frecuencia, mientras que el segundo resulta necesario para especificar el tipo de ajuste de registros que se desea realizar. Aquí, cabe la posibilidad de llevar a cabo un ajuste según máximos o el inicio de funcionamiento del láser, siendo esta última la opción recomendada. En cuanto a la saturación, se establece unos límites con el fin de aumentar la precisión de los instrumentos termométricos que se han empleado.

Para los cuales, hace falta especificar los algoritmos internos de las cámaras termométricas. Aquí, se distingue entre el modo de funcionamiento *Signal Linear Mode* y el *Temperature Linear Mode* de la cámara termométrica FLIR A325 G® a través del parámetro `IRFormat` (Tabla 18 de la Memoria). En el primero de los modos, se especifican los parámetros de calibración (`B`, `R`, `F`), compensación (`J0`, `J1`, `K1`, `K2`) y respuesta espectral del objeto (`alpha1`, `alpha2`, `beta1`, `beta2`, `X`). Para el *Temperature Linear Mode* en cambio, los parámetros que se especifican son el Rango y su alineamiento (`IRAlignment`), así como el `Offset`. El valor de este último es extraído de los ajustes de la cámara (`QueryCase`, `Limits`) al realizar la conexión por Matlab®.

Para terminar con los datos de entrada, se establecen los parámetros para el procesado de las señales. Primero, se selecciona el punto de la pieza que se desea procesar, para lo cual cabe la posibilidad de especificar las coordenadas en el plano XZ con los parámetros `fP_mm` y `cP_mm`, o los pixeles con `fP_px` y `cP_px`. En este último caso, los pixeles que se pueden seleccionar de la cámara FLIR A325 G® depende de su resolución ($320 \times 240 \text{ px}$), mientras que en la OPTRIS PI 05 M® es dependiente del

maillado virtual que se establece sobre las paredes fabricadas por LMD con la discretización que se haga. Esto es determinado por los parámetros dH_Malla y dH_Malla , que corresponden al número de punto que serán extraídos en la dirección horizontal y vertical respectivamente. Por consiguiente, se recomienda una discretización suficientemente grande como para apreciar pequeñas variaciones de temperaturas, y suficientemente pequeña como para un procesado ágil que no suponga un coste computacional elevado. A modo de ejemplo, la discretización que se propone para unas paredes de $40 \times 4 \text{ mm}$ es de $150 \times 50 \text{ px}$.

Asimismo, se introducen los parámetros del proceso LMD con el fin de establecer cierta relación entre las imágenes obtenidas de las cámaras y el registro de posición del robot ABB. A pesar de haber más parámetros, los más relevantes para la aplicación del procesado de señales son la longitud de las paredes (L_p), la altura entre capas (H_c) y la velocidad de avance del robot (v_r). Siendo esto así, los siguientes datos de entrada que se introducen son las correspondientes al software PIX Connect®. Entre estos destaca la relación de píxel (R_{px}), es decir, la relación que guarda un píxel con un milímetro real en el espacio (px/mm). Además, se tienen la velocidad de avance por píxeles (v_px) en unidades de px/s , y las variables que definen los perfiles de temperatura ($P1$, $P2$, Np). Estos últimos son extraídos directamente desde los ajustes del software mencionado, por lo que no se ha requerido de cálculos adicionales como para la estimación de R_{px} y v_px . Por último, se especifica el número de pasadas en común que se detectan visualmente ($Npas$). Se trata de un parámetro con la única intención de centrar la atención en una de las pasadas al realizar la combinación de cámaras para la ampliación del rango de temperaturas.

En resumen, los datos de entrada que se introducen en esta primera parte son los que se muestran en la siguiente tabla donde se detalla el formato y las unidades de cada una de ellas, así como una descripción de las mismas:

1. Tabla del Anexo II: Datos de entrada del código de programación de Matlab® para la monitorización térmica del proceso Laser Metal Deposition (LMD).

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
Dir_Imp	1x1 double	-	Dirección de importación de datos (Directorio: 1-3)
Ensayo	1x1 double	-	Ensayo seleccionado (1-4)
Pruebas	3x1 cell	-	Prueba del ensayo seleccionado
fs	1x1 double	Hz	Frecuencia de muestreo
tipoAJ	1x1 double	-	Tipo de ajuste por máximos (1) o el inicio del láser (2)
Lim_Sup	1x3 double	°C	Límite superior del rango para saturación
Lim_Inf	1x3 double	°C	Límite inferior del rango para saturación
IRFormat	1x1 double	-	Modo de funcionamiento de la cámara FLIR A325 G® trabajando en <i>Temperature Linear Mode</i>
B, R, F	1x3 double	-	Parámetros de calibración de la cámara FLIR A325 G® trabajando en <i>Signal Linear Mode</i>
J0, J1, K1, K2	1x3 double	-	Parámetros de compensación de la cámara FLIR A325 G® trabajando en <i>Signal Linear Mode</i>
alpha1, alpha2, beta1, beta2, x	1x3 double	-	Parámetros de respuesta espectral del objeto Para la cámara FLIR A325 G® trabajando en <i>Signal Linear Mode</i> (Spectral response parameters)

Rango	2x1 cell	-	Rango de la cámara FLIR A325 G [®] (R0, R1 y R2) trabajando en <i>Temperature Linear Mode</i>
IRAlignment	1x1 double	-	Alineamiento del rango de la cámara FLIR A325 G [®] trabajando en <i>Temperature Linear Mode</i>
Offset	1x3 double	°C	Offset del alineamiento de la cámara FLIR A325 G [®] trabajando en <i>Temperature Linear Mode</i>
fP_mm	1x1 double	mm	Fila del punto seleccionado en la pared (Dirección Z)
cP_mm	1x1 double	mm	Columna del punto seleccionado en la pared (Dirección X)
fP_px	2x1 cell	px	Fila del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
cP_px	2x1 cell	px	Columna del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
dH_Malla	1x1 double	-	Discretización horizontal del mallado virtual
dV_Malla	1x1 double	-	Discretización vertical del mallado virtual
L_p	1x1 double	mm	Longitud de las paredes en la dirección X
H_c	1x1 double	mm	Altura entre capas
v_r	1x1 double	mm/s	Velocidad de avance del robot
Rpx	1x1 double	px/mm	Relación de píxel
v_px	1x1 double	px/s	Velocidad de avance por píxeles
P1	2x1 cell	px	Puntos iniciales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect [®]
P2	2x1 cell	px	Puntos finales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect [®]
Np	2x1 cell	-	Número de puntos de adquisición de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect [®]
Npas	1x1 double	-	Número de pasadas en común detectadas visualmente para la combinación de cámaras

Una vez se introducen los datos de entrada, se establece **la importación y la carga de datos**. Primero, se importan los datos desde el directorio que se ha seleccionado anteriormente y se almacena la información en la misma carpeta donde está guardado el programa. Para ello, se hace uso de la función `f_Imp_Reg_Temperaturas`, donde se tienen los datos de entrada que se muestran en la 2. Tabla en azul. Mediante la única ejecución de la función `load` preestablecida de Matlab® para la carga de datos y la omisión de la función anterior, se pretende evitar la importación de información repetida en caso de seleccionar la misma prueba. La razón de esto viene dada por el elevado coste computacional que supone la operación de importación, especialmente al seleccionar varios registros. Siendo esto así, la selección de una prueba diferente supone la superposición de información al sobrescribir los datos en el archivo con formato MAT que se crea en la misma carpeta. Como resultado de esta operación, se tienen las siguientes variables de salida que se muestran en verde:

2. Tabla del Anexo II: Datos de entrada de la función `f_Imp_Reg_Temperaturas` (Azul) y variables de salida de la operación de importación y carga de datos (Verde).

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Dir_Imp</code>	1x1 double	-	Dirección de importación de datos (Directorio: 1-3)
<code>Ensayo</code>	1x1 double	-	Ensayo seleccionado (1-4)
<code>Pruebas</code>	3x1 cell	-	Prueba del ensayo seleccionado
<code>fP_px</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Fila del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
<code>cP_px</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Columna del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>t_rA</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempo de registro de posición del robot ABB
<code>P_rA</code>	Nrx1 cell	<i>mm</i>	Puntos del registro de posición del robot ABB
<code>Q_rA</code>	Nrx1 cell	-	Cuaterniones del registro de posición del robot ABB
<code>L_rA</code>	Nrx1 cell	-	Funcionamiento del láser del registro de posición del robot ABB
<code>t_pI</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempo del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
<code>T_pI</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
<code>t_cF</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempo de la cámara FLIR A325 G®
<code>S_cF</code>	Nrx1 cell	-	Señal radiométrica media en (<code>f_px,c_px</code>) seleccionado
<code>videoIR_cF</code>	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR de la cámara FLIR A325 G®
<code>t_cO</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempo de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>T_cO</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas máximas de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>T_mHS_cO</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas máximas de la media móvil (3x3 <i>px</i>) de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>videoIR_cO</code>	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>tPX_cO</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempo del software PIX Connect®
<code>vPX_IR</code>	Nrx1 cell (RAVI)	-	Video IR del software PIX Connect® (Problemas para procesar en Matlab®)
<code>diagTT_cO</code>	Nrx1 cell	<i>s, °C</i>	Diagrama t-T del software PIX Connect®

Una vez se tengan todos los datos de entrada y las variables de salida, se procede a ejecutar la parte correspondiente a los **cálculos**. Aquí, se tienen distintas funciones que se clasifican por su cometido. Para empezar, se trabaja en el preprocesado de las señales, donde se eliminan los posibles picos que pudieran haber al inicio de los registros procedente del ruido creado por las reflexiones. Además, se realiza la conversión de temperaturas en los registros de la cámara FLIR A325 G[®] aplicando los algoritmos internos (Ver 3.4.1). Para ello, se hace uso de la función `f_Conversion_TTc` para las temperaturas del punto seleccionado en la pared. En la 3. Tabla se muestran los datos de entrada en azul y de salida en verde de esta función, donde se detallan el formato y las unidades de cada uno de ellos:

3. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función `f_Conversion_TTc`.

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>Rango</code>	2x1 cell	-	Rango de la cámara FLIR A325 G [®] (R0, R1 y R2)
<code>IRFormat</code>	1x1 double	-	Modo de funcionamiento de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>IRAlignment</code>	1x1 double	-	Alineamiento del rango de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>Offset</code>	1x3 double	°C	Offset del alineamiento
<code>S_cF</code>	Nrx1 cell	-	Temperaturas originales de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>T_cF</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas de salida de la cámara FLIR A325 G [®]

Asimismo, se hace uso de la función `f_TempLinearMode` para todos los píxeles que forman los fotogramas de los videos IR. A diferencia de la función anterior donde la saturación se realiza posteriormente tras el ajuste, aquí se incluye dicha operación para considerar la saturación a lo largo de todo el video IR que proporciona la cámara FLIR A325 G[®]. Siendo esto así, se tienen los datos de entrada y salida que se muestran en la siguiente tabla:

4. Tabla del Anexo II Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función `f_TempLinearMode`.

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>Rango</code>	2x1 cell	-	Rango de la cámara FLIR A325 G [®] (R0, R1 y R2)
<code>IRFormat</code>	1x1 double	-	Modo de funcionamiento de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>IRAlignment</code>	1x1 double	-	Alineamiento del rango de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>Offset</code>	1x3 double	°C	Offset del alineamiento
<code>Lim_Sup</code>	1x3 double	°C	Límite superior del rango para saturación
<code>Lim_Inf</code>	1x3 double	°C	Límite inferior del rango para saturación
<code>videoIR_cF</code>	Nrx1 cell (MAT)	-	Temperaturas originales de la cámara FLIR A325 G [®]
<code>videoT_cF</code>	Nrx1 cell (MAT)	°C	Temperaturas de salida de la cámara FLIR A325 G [®]

Posteriormente, se ejecuta el tratamiento de las señales mediante las operaciones de remuestreo, ajuste del inicio y final, así como la saturación en los límites del rango. Para ello, se hace uso de las funciones `f_Remuestreo_Total`, `f_Ajuste_Total`, `f_Final_Total` y `f_Saturacion_Total` respectivamente, donde la ejecución se realiza de forma secuencial. Esto quiere decir que los datos de salida de uno son las entradas de la siguiente. Por consiguiente, los formatos y las unidades son invariables a lo largo de la secuencia de operaciones correspondiente al tratamiento de las señales.

Sin embargo, alguna de estas funciones requiere de parámetros de entrada adicionales para el correcto funcionamiento. Por consiguiente, se distingue entre los parámetros de entrada específicos para cada función (5. Tabla, Morado) y los genéricos que se introducen de forma secuencial en todas las funciones (5. Tabla, Azul). Dentro de los datos de entrada particulares destacan el número de registros (N_r), la frecuencia de muestreo (f_s), el tipo de ajuste ($tipoAJ$) y el rango seleccionado ($Rango$) junto a su límite superior (Lim_Sup) e inferior (Lim_Inf).

En cuanto a los datos de salida, se distinguen los correspondientes al ajuste con final común de la función f_Final_Total (5. Tabla, Verde) y los saturados procedentes de $f_Saturacion_Total$ (5. Tabla, Naranja). La razón de esta distinción viene determinada por la necesidad de introducir en las funciones posteriores. En el caso de las variables ajustadas con final común, son utilizadas para el procesamiento de señales, mientras que las saturadas se usan para la mera ilustración de las gráficas finales.

En la siguiente tabla se detallan cada uno de los datos de entrada y salida de la secuencia de operaciones mencionada:

5. Tabla del Anexo II: Datos de entrada particulares (Morado) y genéricos (Azul), y datos de salida de las funciones f_Final_Total (Verde) y $f_Saturacion_Total$ (Naranja).

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
Nr	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
fs	1x1 double	Hz	Frecuencia de muestreo para la función $f_Remuestreo_Total$
tipoAJ	1x1 double	-	Tipo de ajuste (1-2) para la función f_Ajuste_Total
Rango	2x1 cell	-	Rango de la cámara FLIR A325 G® (R0, R1 y R2) para la función $f_Saturacion_Total$
Lim_Sup	1x3 double	°C	Límite superior del rango para saturación para la función $f_Saturacion_Total$
Lim_Inf	1x3 double	°C	Límite inferior del rango para saturación para la función $f_Saturacion_Total$
t_rA	Nrx1 cell	s	Tiempo de registro de posición del robot ABB
P_rA	Nrx1 cell	mm	Puntos del registro de posición del robot ABB
L_rA	Nrx1 cell	-	Funcionamiento del láser del registro de posición del robot ABB
t_pI	Nrx1 cell	s	Tiempo del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
T_pI	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
t_cF	Nrx1 cell	s	Tiempo de la cámara FLIR A325 G®
T_cF	Nrx1 cell	°C	Temperaturas de salida de la cámara FLIR A325 G®
videoT_cF	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video IR de salida de la cámara FLIR A325 G®
HS_cF	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del HS de la cámara FLIR A325 G®
t_cO	Nrx1 cell	s	Tiempo de la cámara OPTRIS PI 05 M®
T_cO	Nrx1 cell	°C	Temperaturas máximas de la cámara OPTRIS PI 05 M®
videoIR_cO	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR de la cámara OPTRIS PI 05 M®
diagTT_cO	Nrx1 cell	s, °C	Diagrama $t - T$ de la cámara OPTRIS procedente del software PIX Connect®

Monitorización Térmica del Proceso Laser Metal Deposition (LMD)

trA_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común del robot ABB
PrA_FinTot	Nrx1 cell	mm	Posiciones ajustadas con final común del robot ABB
LrA_FinTot	Nrx1 cell	-	Funcionamiento del láser ajustado con final común del robot ABB
tpI_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
TpI_FinTot	Nrx1 cell	°C	Temperaturas ajustadas con final común del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
tcF_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común de la cámara FLIR A325 G®
TcF_FinTot	Nrx1 cell	°C	Temperaturas ajustadas con final común de la cámara FLIR A325 G®
VcF_FinTot	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video IR ajustadas con final común de la cámara FLIR A325 G®
HScF_FinTot	Nrx1 cell	°C	Temperaturas saturadas del HS de la cámara FLIR A325 G®
tcO_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M®
TcO_FinTot	Nrx1 cell	°C	Temperaturas ajustadas con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M®
VcO_FinTot	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR ajustado con final común de la cámara OPTRIS
DcO_FinTot	Nrx1 cell	s, °C	Diagramas $t - T$ ajustadas con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M® procedente del software PIX Connect®
trA_sat	Nrx1 cell	s	Tiempos saturados del robot ABB
PrA_sat	Nrx1 cell	mm	Posiciones saturadas del robot ABB
LrA_sat	Nrx1 cell	-	Funcionamiento del láser saturado del robot ABB
tpI_sat	Nrx1 cell	s	Tiempos saturados del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
TpI_sat	Nrx1 cell	°C	Temperaturas saturadas del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
tcF_sat	Nrx1 cell	s	Tiempos saturados de la cámara FLIR A325 G®
TcF_sat	Nrx1 cell	°C	Temperaturas saturadas de la cámara FLIR A325 G®
VcF_sat	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video IR saturado de la cámara FLIR A325 G®
HScF_sat	Nrx1 cell	°C	Temperaturas saturadas del HS de la cámara FLIR A325 G®
tcO_sat	Nrx1 cell	s	Tiempos saturados de la cámara OPTRIS PI 05 M®
TcO_sat	Nrx1 cell	°C	Temperaturas saturadas de la cámara OPTRIS PI 05 M®
VcO_sat	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR saturado de la cámara OPTRIS PI 05 M®
DcO_sat	Nrx1 cell	s, °C	Diagramas $t - T$ saturadas de la cámara OPTRIS PI 05 M® procedente del software PIX Connect®

Para terminar, se tiene la parte para el procesado de las señales donde el primer paso consiste en procesar los videos IR de la cámara OPTRIS PI M® con la función `f_Procesado_OPTRIS` (6. Tabla).

6. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función `f_Procesado_OPTRIS`.

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>Rpx</code>	1x1 double	<i>px/mm</i>	Relación de píxel
<code>P1</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Puntos iniciales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect®
<code>P2</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Puntos finales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect®
<code>Np</code>	2x1 cell	-	Número de puntos de adquisición de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect®
<code>fP_px</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Fila del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
<code>cP_px</code>	2x1 cell	<i>px</i>	Columna del punto seleccionado en cada video IR de las cámaras
<code>dH_Malla</code>	1x1 double	-	Discretización horizontal del mallado virtual
<code>dV_Malla</code>	1x1 double	-	Discretización vertical del mallado virtual
<code>trA_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos ajustados con final común del robot ABB
<code>PrA_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>mm</i>	Posiciones ajustadas con final común del robot ABB
<code>LrA_FinTot</code>	Nrx1 cell	-	Funcionamiento del láser ajustado con final común del robot ABB
<code>DcO_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>s, °C</i>	Diagramas $t - T$ ajustadas con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M® procedente del software PIX Connect®
<code>T_RegPos_H</code>	Nrx1 cell	<i>°C</i>	Temperaturas de los puntos del registro de posición según la distribución horizontal (sin interpolar)
<code>T_RegPos_V</code>	Nrx1 cell	<i>°C</i>	Temperaturas de los puntos del registro de posición según la distribución vertical (sin interpolar)
<code>T_RegPosCOM_IntCar</code>	Nrx1 cell	<i>°C</i>	Temperaturas de los puntos comunes del registro de posición en 2D según la interpolación cartesiana
<code>V_Malla_IntPol</code>	Nrx1 cell (MAT)	<i>°C</i>	Video térmico de todos los puntos de la malla en 2D según la interpolación polar
<code>T_Pto_IntPol</code>	Nrx1 cell	<i>°C</i>	Temperaturas del punto seleccionado de la malla en 2D según la interpolación polar
<code>Xdisc_cO</code>	1xdH_Malla double	<i>mm</i>	Discretización en X procedente del procesado de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>Zdisc_cO</code>	1xdV_Malla double	<i>mm</i>	Discretización en Z procedente del procesado de la cámara OPTRIS PI 05 M®
<code>t_rA_L</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos del registro de posición del robot ABB procedente del procesado de la cámara OPTRIS PI 05 M® (filtrado)

A partir del video térmico de la malla procedente de la cámara OPTRIS PI 05 M[®], se lleva a cabo el procesado de los videos IR de la cámara FLIR A325 G[®] con el fin de obtener una discretización común. Tal y como se expone más adelante, este paso es de vital importancia para la combinación de registros procedentes de estas dos fuentes y poder así ampliar el rango de temperaturas. Para ello, se hace uso de la función f_{Mallado} (7. Tabla), donde se tienen los siguientes datos de entrada y salida en azul y en verde respectivamente:

7. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función f_{Mallado} .

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
Nr	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
dH_Malla	1x1 double	-	Discretización horizontal del mallado virtual
dV_Malla	1x1 double	-	Discretización vertical del mallado virtual
fP_mm	1x1 double	mm	Fila del punto seleccionado en la pared (Dirección Z)
cP_mm	1x1 double	mm	Columna del punto seleccionado en la pared (Dirección X)
Xdisc_cO	1xdH_Malla a double	mm	Discretización en X procedente del procesado de la cámara OPTRIS PI 05 M [®]
Zdisc_cO	1xdV_Malla double	mm	Discretización en Z procedente del procesado de la cámara OPTRIS PI 05 M [®]
P1	2x1 cell	px	Puntos iniciales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect [®]
P2	2x1 cell	px	Puntos finales de los perfiles de temperatura horizontal y vertical de PIX Connect [®]
tcF_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común de la cámara FLIR A325 G [®]
VcF_FinTot	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video IR ajustadas con final común de la cámara FLIR A325 G [®]
tcO_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M [®]
VcO_FinTot	Nrx1 cell (MAT)	-	Video IR ajustado con final común de la cámara OPTRIS
V_Malla_IntPol	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video térmico de todos los puntos de la malla en 2D según la interpolación polar
Tp_cF	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G [®]
VcF_Malla	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video térmico de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G [®]
Tp_cO	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara OPTRIS PI 05 M [®]
VcO_Malla	Nrx1 cell (MAT)	°C	Video térmico de la malla procedente de la cámara OPTRIS PI 05 M [®] (Igual a V_Malla_IntPol)

Gracias a la función anterior, se tiene dos mallados independientes con el mismo número de puntos de las paredes fabricadas por LMD. Por consiguiente, resulta viable combinar los registros procedentes de cada fuente para la ampliación del rango de temperaturas a través de la superposición del rango $400 \div 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de la cámara FLIR A325 G[®] y $900 \div 2450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de OPTRIS PI 05 M[®].

Por lo tanto, el siguiente paso consiste en la combinación de temperaturas procedentes de las cámaras FLIR A325 G® y OPRIS PI 05 M®. La función encargada de ello es `f_Combinacion_FO`, donde se opera con las temperaturas del punto de la malla seleccionado en (`cP_mm`, `fP_mm`) en base a los parámetros que se muestran en la siguiente tabla:

8. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función `f_Combinacion_FO`.

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>Npas</code>	1x1 double	-	Número de pasadas en común detectadas visualmente
<code>fP_mm</code>	1x1 double	<i>mm</i>	Fila del punto seleccionado en la pared (Dirección Z)
<code>cP_mm</code>	1x1 double	<i>mm</i>	Columna del punto seleccionado en la pared (Dirección X)
<code>tcF_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos ajustados con final común de la cámara FLIR A325 G®
<code>Tp_cF</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G®
<code>tcO_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos ajustados con final común de la cámara OPRIS PI 05 M®
<code>Tp_cO</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara OPRIS PI 05 M®
<code>Tp_ComFO</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G®

Para terminar, se tiene la función `f_Correccion_Temp` encargada de aplicar los métodos de ajuste que se han desarrollado con el fin de corregir las temperaturas de la cámara FLIR A325 G® (Ver 3.4.2). En la 9. Tabla se muestran las variables de entrada (Azul) y salida (Verde) que son necesarias para su correcto funcionamiento:

9. Tabla del Anexo II: Datos de entrada (Azul) y salida (Verde) de la función `f_Correccion_Temp`.

Símbolo	Formato	Unidades	Descripción
<code>Nr</code>	1x1 double	-	Número de registros importados (Pruebas)
<code>tipoAJ</code>	1x1 double	-	Tipo de ajuste (1-2)
<code>Rango</code>	2x1 cell	-	Rango de la cámara FLIR A325 G® (R0, R1 y R2) trabajando en <i>Temperature Linear Mode</i>
<code>Lim_Sup</code>	1x3 double	°C	Límite superior del rango para saturación
<code>Lim_Inf</code>	1x3 double	°C	Límite inferior del rango para saturación
<code>fP_mm</code>	1x1 double	<i>mm</i>	Fila del punto seleccionado en la pared en Z
<code>cP_mm</code>	1x1 double	<i>mm</i>	Columna del punto seleccionado en la pared en X
<code>tpI_RemTot</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos remuestreados del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
<code>TpI_RemTot</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas remuestreadas del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22®
<code>tcF_FinTot</code>	Nrx1 cell	<i>s</i>	Tiempos ajustados con final común de la cámara FLIR A325 G®
<code>Tp_cF</code>	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G®

tcO_FinTot	Nrx1 cell	s	Tiempos ajustados con final común de la cámara OPTRIS PI 05 M®
Tp_cO	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara OPTRIS PI 05 M®
Tp_ComFO	Nrx1 cell	°C	Temperaturas del punto seleccionado de la malla procedente de la cámara FLIR A325 G®
Tp_CorEvar	Nrx1 cell	°C	Temperatura corregida con ε_{Var} (Ajuste Tc-E)
Tp_CorPol3	Nrx1 cell	°C	Temperatura corregida con $\varepsilon_{Pol.3}$ (Ajuste Tc-Tp)

Dentro de esta última función, se tienen distintos algoritmos con el fin de dividir las operaciones necesarias para la corrección de temperaturas. Como las subfunciones de su interior no están al alcance del usuario, el conocimiento de las variables de entrada y salida de cada una de ellas no resulta tan importante como la función que desempeñan. Por ello, las siguientes explicaciones omiten la introducción de los datos de funcionamiento, y se centran en su cometido.

Siendo esto así, el primer paso que se lleva a cabo dentro de la función `f_Correccion_Temp` es el del reajuste de las señales procedentes del pirómetro IMPAC IGAR 12-LO MB 22® y las cámaras termométricas FLIR A325 G® y OPTRIS PI 05 M®, ya que la posición es dependiente del punto seleccionado de la malla. Para ello, se hace uso de la subfunción `f_Reajuste_IFO` donde se adaptan `f_Ajuste_Total`, `f_Final_Total` y `f_Saturacion_Total` para que únicamente se consideren los registros mencionados.

Una vez se tengan los tres registros reajustados con inicios, finales y saturaciones en común dentro de la función `f_Correccion_Temp`, se procede a la estimación de la emisividad (ε) a través de las subfunciones `f_Emisividad_TcE` y `f_Emisividad_TcTp` que implementan los métodos de ajuste $T_c - \varepsilon$ y $T_c - T_p$ respectivamente. Así, la corrección de temperaturas es realizada con las subfunciones `f_Temperatura_TcE` y `f_Temperatura_TcTp` considerando las correspondientes emisividades que se estiman con cada método.

Finalmente, el código de programación expulsa como resultados las desviaciones máximas y medias que se producen en cada uno de los métodos de ajuste mencionados. Esto es realizado a través de la subfunción `f_Desviaciones`, que permite un análisis cuantitativo a posteriori. Asimismo, el programa proporciona gráficas ilustrativas sobre los resultados obtenidos, mediante las cuales el usuario es capaz de realizar un análisis cualitativo.

