

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN



INTERFAZ DE ALTO NIVEL PARA LA
ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE
DATOS TERMOGRÁFICOS

TRABAJO FIN DE GRADO

Julio - 2021

AUTOR: Daniel González Sánchez
DIRECTOR/ES: Miguel Onofre Martínez Rach
Héctor Francisco Migallón Gomis

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por aguantarme y apoyarme cuando ni yo mismo lo hacía. Por el esfuerzo, la dedicación y el cariño de toda una vida. Por educarme de la mejor manera posible desde el respeto y la humildad. Y por siempre alimentar y darme la posibilidad de satisfacer mi curiosidad.

A mis tutores, Héctor y Miguel, por la oportunidad de aprender y trabajar con ellos. Por el buen trato, la atención y paciencia que han tenido conmigo. Y sobre todo por la disposición a ayudarme en todo momento.



ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 - Introducción	4
1.1.- Resumen del proyecto.....	4
1.2.- Objetivos	5
Capítulo 2 - Preliminares	7
2.1.- Termografía infrarroja.....	7
2.2.- Técnicas de detección de imperfecciones mediante termografía infrarroja.....	10
2.2.1.- Termografía de bloqueo.....	11
2.2.2.- Termografía de pulso.....	14
2.2.3.- Comparación termografía de pulso y termografía <i>lock-in</i>	15
2.2.4.- Comparación termografía de pulso largo frente a pulso corto.....	17
2.2.5.- Algoritmos termográficos para la detección de imperfecciones para procesamiento datos termografía de pulso (algoritmos).....	19
2.3.- Herramientas de desarrollo software	22
Capítulo 3 - Sistema de adquisición de datos	25
3.1.- Cámara infrarroja.....	27
3.2.- Fuente de calor	29
3.3.- Unidad de control	31
3.4.- Estructura metálica.....	33
3.5.- Software	34
Capítulo 4 - Sistema de captura, acondicionamiento y análisis de datos	36
4.1.- Herramienta de desarrollo	37
4.2.- Plataforma software.....	39
4.2.1.- Captura	40
4.2.2.- Acondicionamiento.....	40
4.2.3.- Análisis	57
Capítulo 5 - Ejemplo práctico: detección de imperfecciones en pieles	60
5.1.- Descripción de la muestra	61
5.2.- Acondicionamiento de los datos	63
5.3.- Análisis de los datos.....	68
Capítulo 6 - Bibliografía	74

Capítulo 1 - Introducción

En este capítulo se resume brevemente el proyecto en su totalidad y se describen los objetivos de este.

1.1.- Resumen del proyecto

El proyecto descrito en este trabajo final de grado tiene como principal objetivo el desarrollo de un sistema que detecte defectos no visibles por visión computerizada en materiales de baja conductividad térmica mediante termografía infrarroja. Para lograrlo se han desarrollado diversos elementos. Estos elementos son: un escenario de pruebas que permitiese la obtención de datos termográficos y el estudio de diferentes técnicas de termografía infrarroja; una plataforma software que facilitase la conversión, el tratamiento y la manipulación de los datos termográficos; y por último caracterizar la capacidad de detección de uno o varios algoritmos de los defectos previamente mencionados. Al ser un

proyecto de investigación tanto el escenario, como la plataforma software y los algoritmos de detección se han ido adaptando y variando a lo largo del desarrollo del proyecto según los resultados obtenidos y las necesidades de este.

1.2.- Objetivos

En este apartado se describirán el objetivo del proyecto, así como los objetivos secundarios. El objetivo global del proyecto es el desarrollo de un sistema que mediante termografía infrarroja sea capaz de detectar defectos no visibles por visión computerizada en materiales de baja conductividad térmica. Para alcanzar este objetivo ha sido necesario ir desarrollando, y por tanto alcanzando, una serie de hitos u objetivos principales:

Plataforma software

El primero de los objetivos principales del trabajo es el desarrollo de una plataforma software o interfaz de alto nivel para la obtención y el tratamiento de los datos termográficos. Esta interfaz debe facilitar el diseño, desarrollo y experimentación de los diferentes métodos de detección de defectos internos que se decida investigar, así como la obtención y el tratamiento de los datos termográficos.

Sistema de adquisición de datos

El segundo de los objetivos es la creación de un escenario de experimentación para la obtención de los datos termográficos. Este sistema debe cumplir principalmente con una característica, debe ser replicable, es decir, debe ser posible repetirlo en condiciones idénticas (mismo diseño, protocolo, elementos, etc...) y obtener el mismo resultado una y otra vez. Por lo tanto, todos los datos obtenidos con este escenario deben presentar unas características similares. El desarrollo de este escenario ha requerido el diseño del sistema electrónico que ha permitido, por un lado, sincronizar todos los elementos hardware, y por otro sincronizar estos elementos con la adquisición software de los datos.

Algoritmos de detección

El tercer y último objetivo principal del trabajo es la implementación y análisis de algoritmos para la detección de defectos no visibles en materiales de baja conductividad térmica. Los dos primeros objetivos del trabajo son condición necesaria para poder desempeñar este último objetivo. El escenario permitirá obtener los datos sobre los que se aplicarán los diferentes algoritmos y la herramienta software reducirá el tiempo de desarrollo y experimentación de estos.



Capítulo 2 - Preliminares

En este capítulo se describe tanto la tecnología en la que se basa este proyecto, es decir, la termografía infrarroja como las técnicas de detección de imperfecciones en materiales haciendo uso de esta. Además, se hablará de las distintas herramientas software utilizadas en su desarrollo.

2.1.- Termografía infrarroja

La termografía infrarroja (TIR) es una tecnología que permite adquirir y procesar información térmica [1]. Esta tecnología se basa en la radiación infrarroja, una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que las de la luz visible (entre 0,74 y 1000 μm) [2]. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto (es decir, $T > 0 \text{ K}$) emite radiación infrarroja [3]. El ojo humano es incapaz de apreciar este tipo de radiación por lo que se requiere de dispositivos especiales para adquirir y procesar esta información [4].

La termografía infrarroja posee numerosas ventajas sobre otras tecnologías [5]. Sus principales ventajas son las siguientes [6]:

- Es una tecnología que no requiere contacto. Los dispositivos utilizados no entran en contacto en ningún momento con el objeto de análisis o la fuente de calor. De esta manera es posible medir la temperatura de objetos extremadamente calientes o productos peligrosos como ácidos manteniendo al usuario fuera de peligro.
- Proporciona imágenes térmicas bidimensionales, haciendo posible una comparación de las diferentes áreas del objetivo.
- La termografía infrarroja se aplica en tiempo real, lo que permite el escaneo de alta velocidad de objetivos estacionarios, así como la medición de objetivos en movimiento y la detección de patrones térmicos que cambian con rapidez.
- A diferencia de otras tecnologías como las imágenes de rayos X la termografía infrarroja no produce ningún tipo de efecto de radiación dañino. Es adecuado para un uso prolongado y repetido.
- Es una técnica de ensayo no destructivo (END), es decir, un método de análisis que no afecta ni perjudica la futura utilidad del objetivo.

Gracias a todas estas ventajas la termografía infrarroja se ha establecido como una herramienta muy útil en diferentes campos y aplicaciones [7].

En el campo de la veterinaria y la medicina la TIR ha proporcionado la posibilidad de realizar diagnósticos precisos sin tener que utilizar procedimientos invasivos. Además de para medir la temperatura del animal, la TIR también es muy efectiva para medir otras variables, entre ellas el estrés [8]. En el campo de la medicina la TIR se puede utilizar para detectar tumores corporales superficiales como el cáncer de mama [9], diagnósticos de neuropatía diabética o trastornos vasculares [10], detección de fiebre [11], diagnosticar enfermedades de la piel [12], en odontología y dermatología [13] y en operaciones cardíacas [14].

El mantenimiento de infraestructuras y equipamiento es otra área en la que la TIR se utiliza de manera exitosa [15]. La TIR se utiliza en el mantenimiento eléctrico y mecánico para detectar signos tempranos de mal funcionamiento, por lo que se pueden evitar costosas averías [16] [17]. En el aislamiento térmico la TIR se utiliza para detectar pérdidas ocultas

de calor que pueden reducir el rendimiento de los sistemas de acondicionamiento térmico y por tanto aumentar el consumo energético [18]. La TIR también se utiliza en otras áreas como la monitorización de procesos y la monitorización de deformaciones plásticas [19], la evaluación de daños por fatiga en materiales [20] y la inspección de soldaduras [21].

En relación con la anterior área la TIR también proporciona grandes beneficios en la inspección de edificios. Examinando la distribución de la temperatura de una fachada se pueden descubrir condiciones ocultas a simple vista como pueden ser filtraciones de energía, infiltraciones de agua y humedades [22] [23]. La detección de humedad mediante TIR no se limita a edificios, también se puede aplicar sobre papel [24], suelo [25] e incluso estructuras de aviones [26].

Sin embargo, la TIR también presenta algunos inconvenientes que han de ser mencionados. A pesar de los recientes avances en la rapidez y asequibilidad una cámara infrarroja sigue siendo un dispositivo caro. Los modelos más económicos con resoluciones suficientemente altas para la mayoría de las aplicaciones proporcionan una menor precisión, lo que los hace inutilizables para determinadas aplicaciones. Las imágenes infrarrojas obtenidas son difíciles de interpretar, requiriendo en la mayor parte de las ocasiones una formación específica. La termografía infrarroja depende en gran medida de las condiciones de trabajo como son la temperatura ambiente, el flujo de aire o la humedad por lo que es recomendable utilizarla en ambientes controlados [6].

2.2.- Técnicas de detección de imperfecciones mediante termografía infrarroja

Como ya se ha comentado en el apartado anterior la TIR es una tecnología con numerosos usos y aplicaciones. Dependiendo de la aplicación que se le de esta tecnología puede ser empleada de dos maneras: activa y pasiva (figura 2.1) [27].

Por un lado, en TIR pasiva la radiación emitida por la muestra objetivo se mide sin haberle aplicado ningún estímulo de calor externo, esta se encuentra de manera natural a una temperatura mayor o menor que el resto del entorno. Este tipo de termografía infrarroja es utilizada en aplicaciones de monitorización de procesos y controles de calidad. La medición y el control de la temperatura durante y después de procesos industriales como el laminado o sintetización del acero es fundamental para lograr buenos resultados [6].

Por otro lado, en TIR activa se somete a la muestra objetivo a una fuente de energía externa para producir un contraste de temperatura con el entorno. En este caso, la radiación medida depende de la respuesta térmica de la muestra a la excitación a la que se le ha sometido [28] [29]. La propagación del calor depende de las propiedades térmicas del material, así como de las anomalías de este, que dan como resultado diferencias de temperatura en su superficie. La TIR activa es utilizada principalmente en ensayos no destructivos (END), como por ejemplo la detección de defectos internos en materiales de distinta naturaleza o también para la detección de áreas con diferentes propiedades [30]. Algunos de los defectos internos pueden ser muy sutiles por lo que los niveles de señal asociados pueden perderse en el ruido de los datos termográficos [31]. Para evitarlo se utilizan diferentes métodos de posprocesamiento para mejorar la calidad de estos, este proyecto se engloba en el ámbito de estas técnicas.

Por tanto, los objetivos de este trabajo se centran en la investigación, análisis y desarrollo de técnicas TIR activas para la detección de imperfecciones no visibles en materiales con baja conductividad térmica. Se pueden utilizar una gran variedad de fuentes de energía para inducir un contraste térmico entre las zonas defectuosas y no defectuosas de un material. Estas fuentes pueden dividirse en externas, si la energía se emite a la superficie y luego se propaga a través del material; o interna, si la energía se introduce en la muestra con el fin de

estimular únicamente los defectos. Normalmente la excitación externa se realiza con dispositivos ópticos como flashes fotográficos o lámparas halógenas, mientras que la excitación interna se puede lograr mediante oscilaciones mecánicas con un transductor sónico o ultrasónico.

Como se puede observar en la figura 2.1 existen tres técnicas clásicas de termografía activa basadas en estos modos de excitación: termografía de bloqueo (o *lock-in thermography*) y termografía pulsada (o *pulsed thermography*), que son técnicas ópticas; y vibrotermografía que utiliza ondas ultrasónicas para excitar las características internas [2]. A continuación, se presentarán con mayor detalle las técnicas ópticas, en las que se centra este trabajo, en primer lugar se hablará sobre la termografía de bloqueo y posteriormente sobre la termografía pulsada (o de pulso) y los motivos por los que ha sido la técnica elegida para el desarrollo del proyecto.

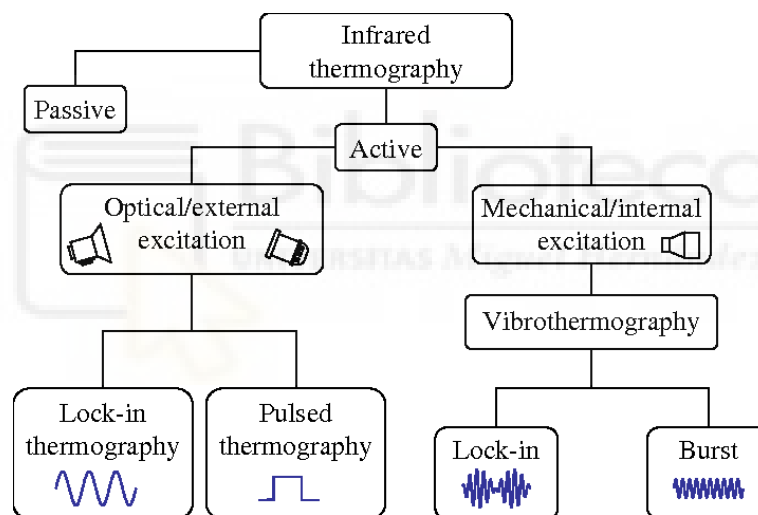


Figura 2.1: Técnicas de termografía infrarroja.

2.2.1.- Termografía de bloqueo

La termografía de bloqueo, también conocida como termografía modulada [32], es una técnica derivada de la radiometría fototérmica [33], en la cual un pequeño punto de la superficie se ilumina de manera periódica mediante un rayo láser de intensidad modulada para transmitir ondas térmicas a la muestra. La respuesta térmica producida se registra al mismo tiempo usando un detector de infrarrojos y es descompuesta por un dispositivo denominado *lock-in amplifier* para extraer la amplitud y fase de la modulación [34]. La radiometría fototérmica es una técnica ráster punto por punto que requiere de extensos

tiempos de adquisición (especialmente en el caso de defectos profundos que implican bajas frecuencias de modulación). Además, pueden requerir sistemas hardware adicionales a los sistemas de adquisición, por ejemplo, el amplificador *lock-in* mencionado que se utiliza para recuperar la amplitud y la fase de la respuesta.

Afortunadamente, es posible simplificar y acelerar de manera significativa el proceso de adquisición de muestras para aplicaciones END realizando varios cambios. El primero de ellos es reemplazar el rayo láser con una o varias fuentes de calor moduladas, por ejemplo, lámparas halógenas que cubren toda la superficie de la muestra en lugar de un solo punto. La segunda modificación sería cambiar el detector de infrarrojos por una cámara de infrarrojos capaz de controlar la totalidad (o gran parte) de la superficie de la muestra y por último reemplazar el hardware de *lock-in* con un software capaz de recuperar de manera matemática la amplitud y fase de la respuesta térmica. Al aplicar estos cambios a la radiometría fototérmica se consigue la técnica conocida como termografía de bloqueo [35].

En la figura 2.2 se puede ver un ejemplo de un experimento de termografía de bloqueo. En ella se aprecian dos lámparas halógenas, aunque es posible utilizar varias montadas en un marco para aumentar la uniformidad del calentamiento y/o para aumentar la cantidad de energía inducida a la superficie de la muestra. Las lámparas envían ondas periódicas (por ejemplo, ondas sinusoidales) con una determinada frecuencia de modulación, durante al menos un ciclo, idealmente hasta que la muestra alcance un estado estable. Este estado dependerá de las propiedades térmicas de la muestra y las características de los defectos que se desean detectar. En la práctica, sin embargo, solo se necesitan unos pocos ciclos para recuperar de manera adecuada los datos de la fase y la amplitud, mucho antes de alcanzar dichas condiciones estables.

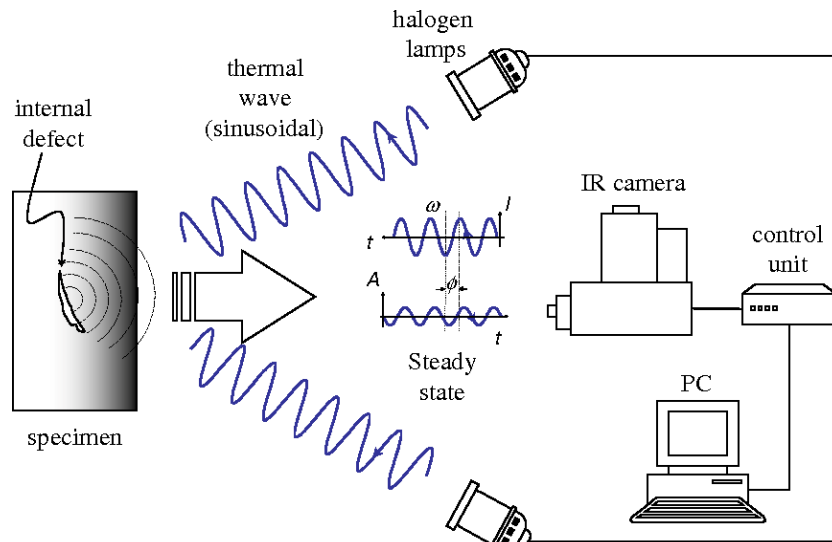


Figura 2.2: Montaje experimento termografía de bloqueo.

La figura 2.3 muestra un ejemplo de la señal de salida sin procesar que se obtiene para una onda sinusoidal en dos puntos diferentes. Como se puede ver el ruido es omnipresente y es necesario aplicar a la señal un procesamiento, no sólo para extraer la información de la amplitud y/o fase, sino también para eliminar el ruido de la señal.

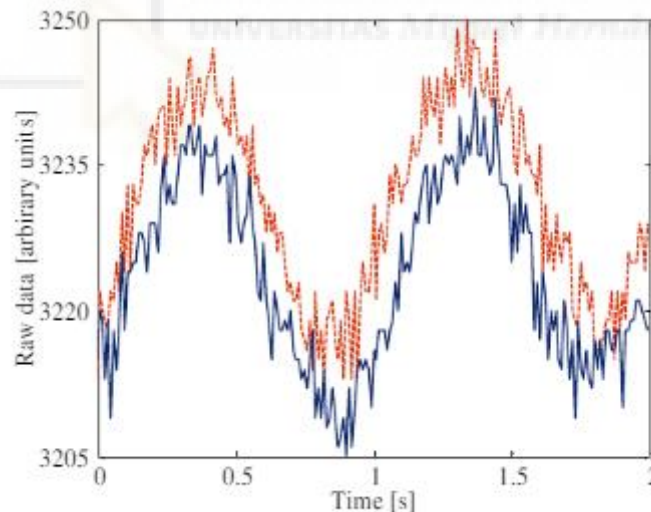


Figura 2.3: Señal de salida de datos sin procesar con $f = 1$ Hz para 2 puntos diferentes.

Esta técnica no ha sido considerada en este trabajo debido a que tanto el coste computacional del procesamiento de los datos adquiridos, como los tiempos de adquisición de dichos datos impiden cumplir los requisitos temporales impuestos inicialmente.

2.2.2.- Termografía de pulso

La termografía pulsada es una técnica en la que se utiliza una lámpara para generar un pulso (o una serie de pulsos) de excitación térmica que pueden durar desde varios milisegundos para materiales con alta conductividad térmica (por ejemplo, metales) a varios segundos para materiales con baja conductividad térmica. Una vez el pulso se detiene la muestra comienza a enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente [36]. Durante la fase de enfriamiento se somete a análisis la distribución de la temperatura en la superficie de la muestra, es decir, se recogen los datos termográficos. Esta técnica es particularmente adecuada para la detección de defectos cercanos a la superficie, tales como delaminaciones en materiales compuestos o defectos de adherencia entre revestimientos y sus sustratos. Estos defectos bloquean el flujo de calor, provocando una reducción en la velocidad de enfriamiento de la superficie por encima de los mismos, revelando un área de contraste térmico.

La forma más extendida de utilizar la termografía de pulso es utilizando un pulso corto (~2 ms), sin embargo, algunos investigadores del campo han descubierto que utilizar un pulso largo como fuente de excitación puede ser eficaz para algunas aplicaciones [37]. El uso de un pulso largo en la termografía de pulso no es algo novedoso, tiene una larga historia [38] [39] [40] y hasta es ofrecida por algunas empresas comerciales [41] [42]. Sin embargo, parece haber pocos estudios detallados sobre las capacidades de esta técnica utilizando una estimulación térmica de pulso largo.

Antes de seguir hablando de la termografía de pulso se ha de distinguir entre la termografía de pulso largo y la denominada *step heating thermography*. En la termografía de pulso largo se aplica calor durante un período de tiempo seleccionado, por ejemplo 5 segundos, y luego se recogen las imágenes térmicas a medida que la muestra se enfría. En la *step heating thermography* las imágenes térmicas son recogidas mientras se aplica la excitación térmica a la muestra [37]. En este proyecto se planteó la posibilidad de utilizar juntas ambas tecnologías para detectar defectos que no son discernibles a través de visión computerizada. En ambos casos, los principios físicos que gobiernan los comportamientos que se desea detectar se basan en las variaciones existentes en la conductividad térmica.

En comparación con la técnica de bloqueo la adquisición de datos de la termografía de pulso es rápida y sencilla. En la figura 2.4 se puede ver un ejemplo de un experimento de

termografía de pulso. Se utilizan dos flashes fotográficos para calentar la superficie de la muestra y posteriormente se registran los datos térmicos con una cámara infrarroja. Se necesita una unidad de sincronización para controlar el tiempo entre el lanzamiento del pulso térmico y la grabación de la cámara infrarroja. Los datos obtenidos se almacenan en una matriz de tres dimensiones (figura 2.5) donde x e y son las coordenadas espaciales y t es el tiempo.

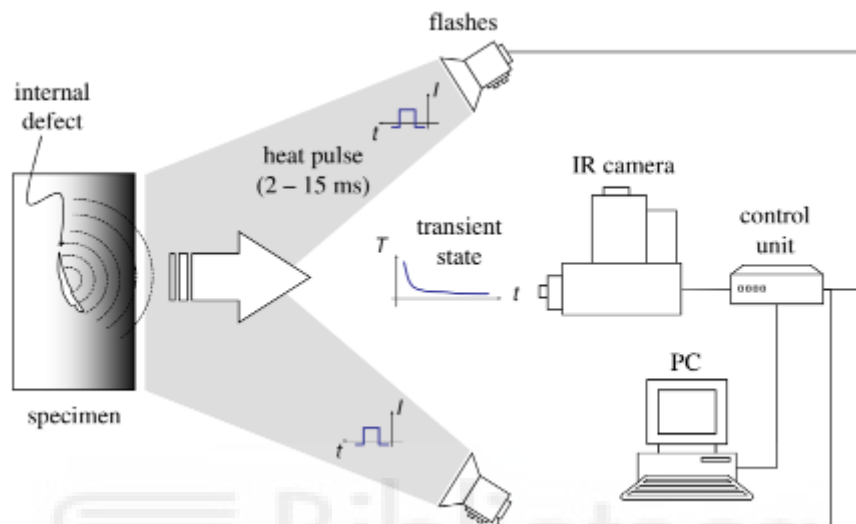


Figura 2.4: Montaje experimento termografía de pulso

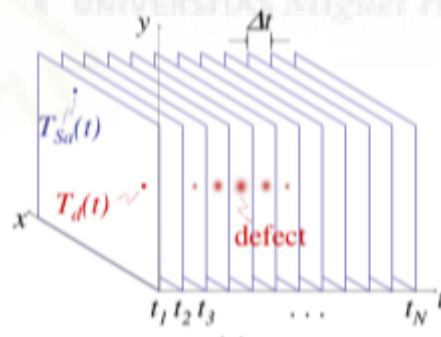


Figura 2.5: Matriz de datos de 3 dimensiones

2.2.3.- Comparación termografía de pulso y termografía *lock-in*

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores la termografía de pulso y la termografía *lock-in* son las técnicas de END más comúnmente utilizadas. Ambas técnicas presentan características claramente distinguibles, pero se utilizan para aplicaciones muy similares. Sus capacidades para detectar imperfecciones no visibles, indetectables a través de visión computerizada, son semejantes, sin embargo, no parece haber ninguna comparación objetiva de su efectividad. Uno de los motivos de la ausencia de artículos de

investigación que comparen estas dos técnicas es la diferencia de la naturaleza de las excitaciones térmicas. En la termografía de pulso la superficie de la muestra a analizar se calienta instantáneamente o de forma casi instantánea por una o más lámparas de alta energía, mientras que para la termografía *lock-in* la superficie se calienta periódicamente mediante alta modulación encendiendo las lámparas durante períodos que pueden durar hasta cientos de segundos. Por lo tanto, para poder hacer una comparación “justa” de las dos técnicas se requiere que ambas utilicen la misma energía total de excitación térmica. En [43] los autores realizan un estudio en el que se utilizó la misma energía de excitación con ambas técnicas y se demostró que la termografía de pulso producía una mejor relación señal-ruido que la termografía *lock-in* para defectos pocos profundos (figura 2.6). Además, para defectos algo más profundos las dos técnicas producían aproximadamente la misma relación señal-ruido. También se descubrió que los datos sin procesar de la técnica de pulso permiten detectar defectos más profundos que las imágenes de fase obtenidas mediante la termografía *lock-in* para los rangos de frecuencias con los que se realizó el experimento (0,01 - 0,1 Hz).

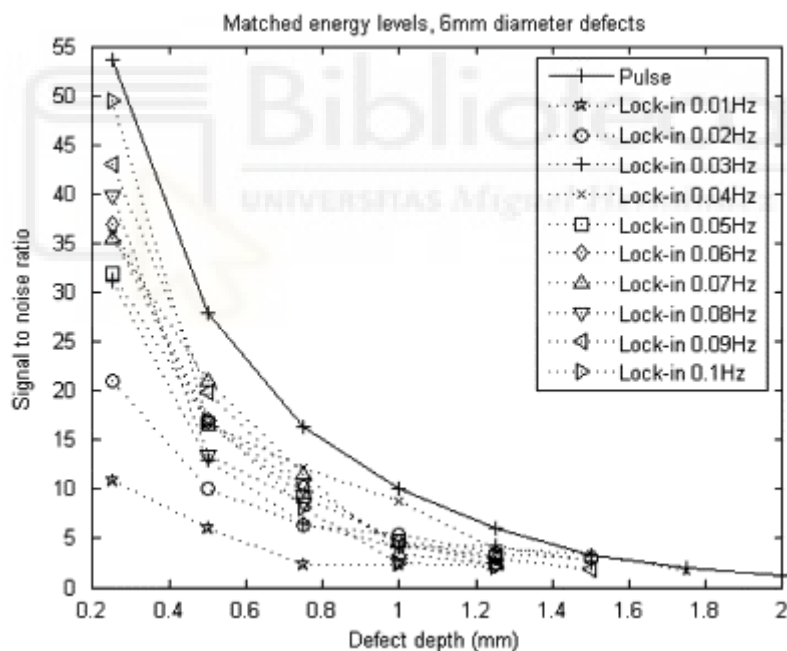


Figura 2.6: Comparación relación señal-ruido pruebas termografía de pulso y *lock-in*.

En las pruebas iniciales del proyecto se experimentó para descubrir la técnica idónea para el desarrollo del proyecto realizando numerosas pruebas con ambas técnicas. Para las pruebas con la técnica de *lock-in* se utilizaron distintos patrones de frecuencia, número de ciclos y distintas distancias. El hardware y el software utilizado durante las pruebas era propietario de una empresa comercial y no había posibilidad de adaptarlo a las necesidades de la investigación al carecer de las herramientas informáticas (API: Application Programming

Interface) necesarias, es decir, en el caso de que las pruebas hubiesen sido satisfactorias habría que haber realizado el desarrollo de dichas APIs. Además de este inconveniente las pruebas determinaron que se tardaría entre 3 y 4 minutos en tener el ciclo de capturas necesario para obtener resultados aceptables, este intervalo de tiempo no permite cumplir los requisitos temporales del proyecto.

Una vez descartada la técnica de *lock-in* se hicieron pruebas con la técnica de pulso siguiendo las recomendaciones para trabajar con materiales de baja conductividad térmica de los artículos científicos más recientes, por ejemplo [37] [43]. Los primeros resultados obtenidos que utilizaron pulsos largos determinaron que se podía conseguir la misma calidad en la detección que con *lock-in*, y con un tiempo mucho menor por lo que se centró la investigación en el desarrollo de la técnica de pulso.

La experimentación realizada con el sistema propuesto en este proyecto ha permitido concluir que, con la técnica de pulso, y con la potencia adecuada de calentamiento, la fase de adquisición de datos puede ser inferior a 4 segundos. A este tiempo hay que añadir el coste computacional de la transmisión y análisis de los datos adquiridos.

2.2.4.- Comparación termografía de pulso largo frente a pulso corto

Según estudios recientes [37], de manera generalizada la excitación de pulso largo es muy eficaz para la detección de defectos no visibles en materiales de baja conductividad térmica como pueden ser compuestos plásticos y resinas. Así mismo, también se ha descubierto que la termografía de pulso largo también consigue buenos resultados en la detección de defectos en materiales de conductividad térmica media como el acero inoxidable (figura 2.7). Además, presenta ciertas ventajas prácticas y económicas frente al modelo tradicional. Las fuentes de calor que se pueden utilizar para la termografía de pulso largo se pueden conseguir más fácilmente y son mucho menos caras que las lámparas de flash de alta energía necesarias para la termografía de pulso corto. Por estas razones se sugiere que la técnica tradicional de pulso corto únicamente debe emplearse cuando sea esencial, es decir, para analizar materiales de alta conductividad térmica, para los cuales se ha demostrado que la técnica de pulso largo es ineficaz. Para otros materiales es probable que la técnica de excitación de

pulso largo supere con creces a la de pulso corto debido a la facilidad de producir un pulso largo de calor que alcance magnitudes que excedan las conseguidas de manera habitual por pulsos cortos. En relación a las razones que se acaban de mencionar y a que el objetivo del proyecto es la detección de imperfecciones no visibles en materiales de baja conductividad térmica se ha elegido la termografía de pulso largo como técnica de estudio.

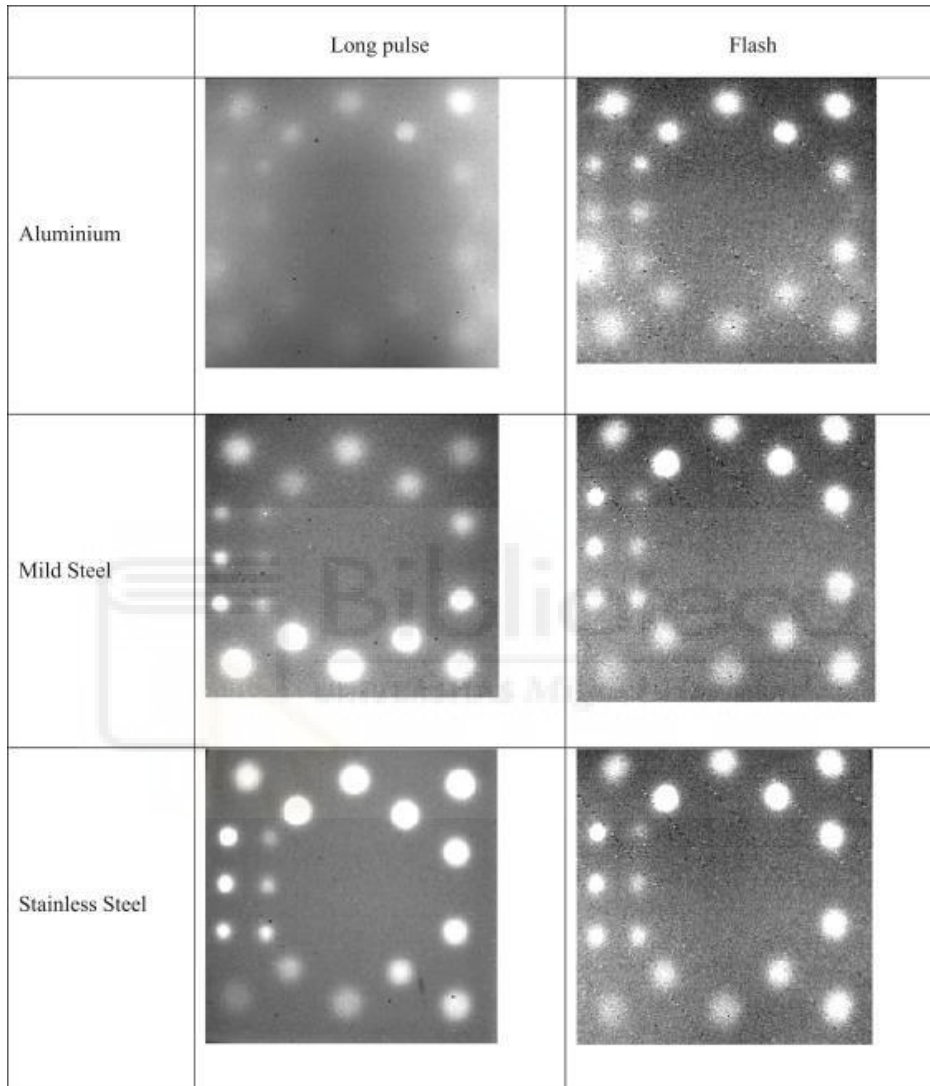


Figura 2.7 - Imágenes de muestras de prueba comparación pulso largo - pulso corto

2.2.5.- Algoritmos termográficos para la detección de imperfecciones para procesamiento datos termografía de pulso (algoritmos)

Como ya se ha comentado previamente los datos obtenidos mediante la termografía de pulso permiten la detección de defectos internos no visibles. Sin embargo, para poder procesar dicha información es necesario someter a los datos a un preprocesamiento. Debido a la escasez de investigación acerca de esta cuestión, en este trabajo se implementaron algunos de los algoritmos más utilizados para procesar datos de termografía pulsada para realizar un estudio inicial de efectividad. A continuación, se describirán estos algoritmos:

- Thermal Contrast (TC)

El primero de los algoritmos que se va a explicar es el *Thermal Contrast*. Como ya se ha explicado anteriormente la termografía de pulso consiste en un breve calentamiento de la muestra, seguido de la captura de la curva de caída de la temperatura [44]. Inmediatamente después de que se detenga el pulso de calor es posible estimar que el enfriamiento de la muestra será el mismo que el de una muestra homogénea semi-infinita caracterizada por una efusividad e_z en la dirección z . Por lo tanto la evolución de la temperatura de la superficie en el tiempo sigue la ley expuesta en la ecuación (1).

$$\Delta T_{xy}(t) = \frac{Q_{xy}}{e_z \sqrt{\pi t}} \quad (1)$$

donde ΔT_{xy} es el incremento de la temperatura (en los ejes x e y), Q_{xy} es la energía absorbida por la superficie y t es el tiempo. La presencia de un defecto reducirá la difusividad del material influyendo en la evolución de la temperatura en la superficie, de tal modo que la temperatura será mayor en la zona defectuosa que en la zona sonora. Se ha de tener en cuenta que los defectos más profundos se observan después de un tiempo más largo y con un contraste térmico reducido. La evolución del contraste térmico sobre el defecto y las ecuaciones resultantes de la teoría de ondas térmicas permiten caracterizar el defecto en términos de profundidad y diámetro. La definición de contraste térmico es la siguiente:

$$C = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_{sound}(t) - T_{sound}(t_0)}^{(2)}$$

donde T es la señal de temperatura, t es el tiempo, mientras que los subíndices *def* y *sound* se refieren al defecto y al área sonora de referencia, respectivamente; el tiempo t_0 es el momento en el que comienza el enfriamiento [45].

Este algoritmo, *Thermal Contrast*, ha sido utilizado como punto de partida en este proyecto.

- Thermal Signal Reconstruction (TSR)

Este algoritmo asume que el comportamiento térmico de los píxeles no defectuosos debe seguir la curva de caída dada por la solución unidimensional de la ecuación de Dirac (ecuación (1)). La cual puede reescribirse como el siguiente polinomio logarítmico (ecuación 3):

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \times \ln(t) + a_2 \times [\ln(t)]^2 + a_3 \times [\ln(t)]^3 + \dots + a_n [\ln(t)]^n \quad (3)$$

dónde ΔT es el aumento de la temperatura y t es el tiempo. Normalmente, n se establece en 4 o 5 para asegurar una buena correlación entre los datos adquiridos y los valores ajustados mientras se reduce el ruido de la señal. La secuencia de termogramas sin procesar se reduce a $n + 1$ imágenes de coeficiente (una por coeficiente polinomial) a partir de las cuales es posible reconstruir los termogramas. Además, las derivadas del polinomio se corresponden con la primera y segunda derivada logarítmica del termograma, limitando así el incremento del ruido temporal. La primera derivada del tiempo indica la tasa de enfriamiento, mientras que la segunda derivada se refiere a la tasa de cambio durante el enfriamiento. Por lo tanto, las derivadas del tiempo son más sensibles a los cambios de temperatura que las imágenes térmicas sin procesar. No existe ningún motivo para utilizar derivadas de orden superior ya que además de la inexistencia de una interpretación física, no proporciona ninguna mejora en el contraste de los defectos [46] [47] [48].

Se hicieron varias pruebas con el TSR pero no se obtuvieron resultados satisfactorios debido a la baja conductividad térmica del material con el que se pretendía trabajar inicialmente.

- **Slope and Square Correlation Coefficient R^2**

El siguiente algoritmo con el que se experimentó fue el *Slope and Square Correlation Coefficient R^2* . Según lo expuesto en diversos artículos científicos este algoritmo es conveniente aplicarlo cuando la variación de temperatura de la superficie a lo largo del tiempo muestra una tendencia logarítmica doble. Según este supuesto la ecuación (1) se convertiría en:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\Pi t)_{(4)}$$

En la figura 2.8 se puede observar la tendencia mencionada, es posible apreciar que en un área libre de defectos, representada por la línea (1), la caída de la temperatura tendría una pendiente de $(-1/2)$ en la parte central. Si existiese un defecto interno, representado por la línea (2), la caída de la temperatura de esa zona de la superficie no cumpliría con esta condición y, en general, la pendiente sería diferente a $(-1/2)$. En las zonas con defectos se puede detectar una desviación en la curva de temperaturas en la fase de enfriamiento respecto a la linealidad existente en la curva doble logarítmica, como el que se puede ver en la figura 2.8. Esta desviación es posible medirla con el coeficiente de correlación cuadrado R^2 [49].

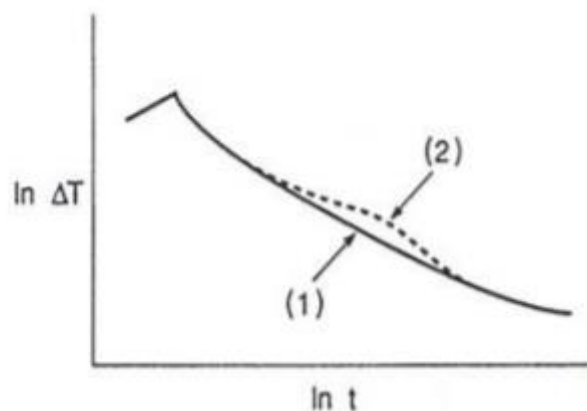


Figura 2.8: Tendencia de enfriamiento en una escala logarítmica doble.

Desde un primer momento este algoritmo presenta la problemática de tener que determinar un área libre de defectos, ya que es algo que se desconoce. A pesar de ello se realizaron varias pruebas con diferentes áreas y se obtuvieron resultados muy distintos. Como el material inicialmente a estudiar no es homogéneo, distintas áreas presumiblemente sin defectos tenían caídas diferentes, esto complicaba enormemente la detección de los defectos provocando que zonas aparentemente sin defectos se comportaran como defectuosas.

2.3.- Herramientas de desarrollo software

Una vez explicada la técnica de obtención de los datos termográficos y los métodos de preprocesamiento utilizados durante el proyecto a continuación se describirá la herramienta software diseñada y los motivos que han condicionado dicho diseño.

Uno de los factores decisivos fue que para la fase de prototipado en la que se encontraba el proyecto se necesitaría un lenguaje de alto nivel que permitiese un rápido desarrollo, por lo que se concluyó que los lenguajes de bajo o medio nivel no eran aptos.

La herramienta elegida para el desarrollo de la plataforma software ha sido MATLAB. MATLAB (abreviatura de *MATrix LABORatory*), que es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, creación de modelos y visualización de datos. Matlab ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Las principales características de MATLAB son las siguientes:

- Es un lenguaje de alto nivel utilizado principalmente para cálculo numérico, visualización y desarrollo de aplicaciones.
- También proporciona un entorno interactivo para la exploración, el diseño y la resolución de problemas iterativos.
- Proporciona una amplia biblioteca de funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización, integración numérica y resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Proporciona gráficos integrados para visualizar datos y herramientas para crear gráficos personalizados.

- La interfaz de programación de MATLAB proporciona herramientas de desarrollo para mejorar el mantenimiento de la calidad del código y maximizar el rendimiento.
- Proporciona herramientas para crear aplicaciones con interfaces gráficas personalizadas.
- Proporciona funciones para integrar algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones y lenguajes externos como C, Java, .NET y Microsoft Excel.

Otra de las principales razones por las que se ha elegido MATLAB como software de desarrollo ha sido las herramientas mencionadas que facilitan todas las etapas de la experimentación. En la etapa de la recogida de datos MATLAB ofrece la facilidad de poder trabajar con más de cuarenta tipos de archivos diferentes. Desde archivos de texto plano como *.txt* hasta archivos de vídeo *.mp4* incluyendo hojas de cálculo, imágenes y archivos de audio. Algunos ejemplos de funciones matemáticas para el procesado de datos podrían ser las funciones *histogram* y *filter* las cuales nos permiten calcular un histograma y aplicar un filtro digital respectivamente. Por último, MATLAB ofrece diversas funciones para la visualización de datos como pueden ser gráficos de curvas, áreas, mapas de calor, etc... (ver figuras 2.9 y 2.10)

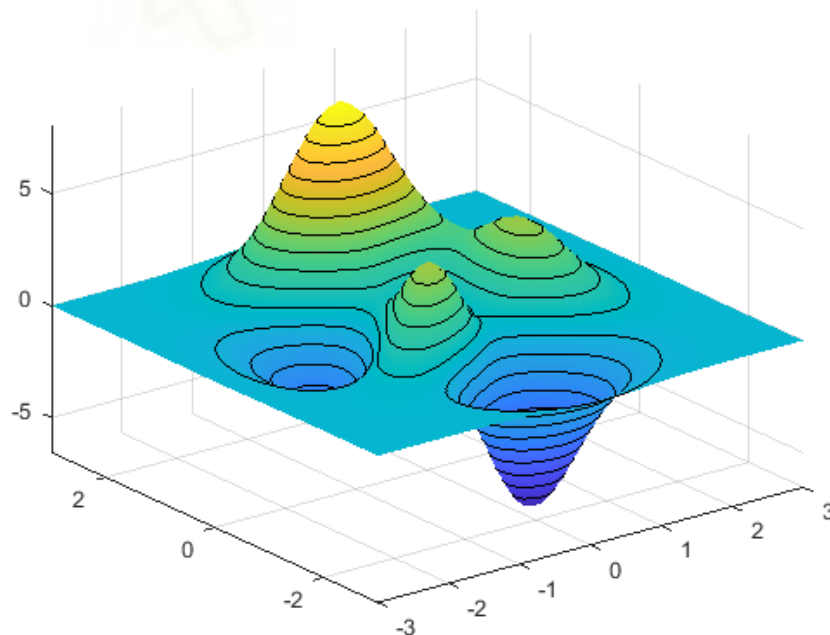


Figura 2.9: Representación de datos en tres dimensiones.

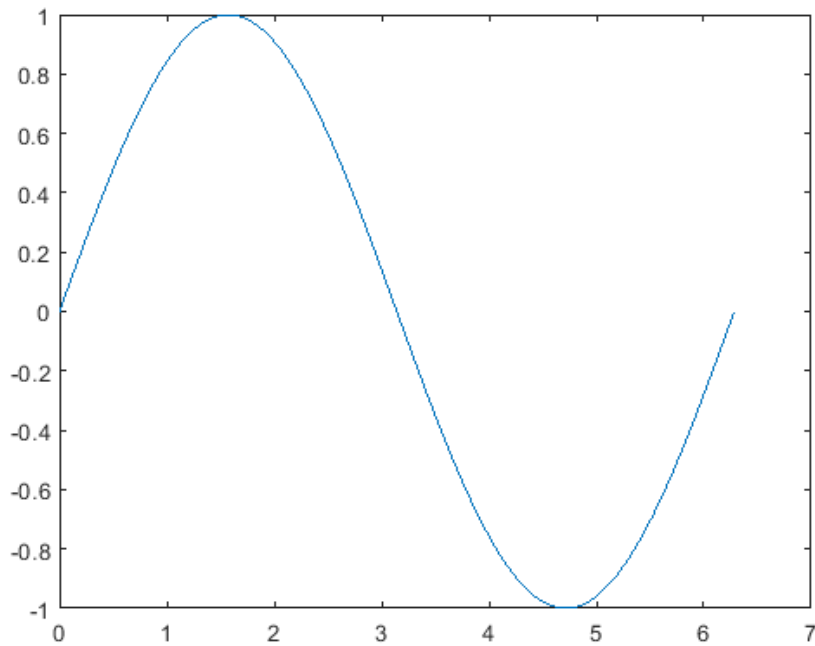


Figura 2.10: Representación de datos en dos dimensiones.

A pesar de todos los beneficios y facilidades que MATLAB aporta para la fase de prototipado no es computacionalmente viable para la fase de producción y explotación. Al ser un lenguaje interpretado es mucho más lento que si se desarrollara en un lenguaje compilado de medio nivel como podría ser C o C++. Como se ha comentado, la herramienta que se ha desarrollado en este proyecto pretende ser de aplicación en la fase de ingeniería, acelerando por tanto el diseño de nuevos prototipos, una vez validado un prototipo que pase a fase de producción, probablemente deberá ser implementado en un lenguaje de mayor rendimiento computacional, pero esta fase no entra en el ámbito de este proyecto. Similares características pueden encontrarse en otros lenguajes como por ejemplo Python.

Capítulo 3 - Sistema de adquisición de datos

En este capítulo se describe en profundidad el sistema de adquisición de los datos termográficos, las partes de las que consta y todos los aspectos clave que han condicionado el desarrollo y creación de este. Como se ha explicado en el capítulo anterior un montaje experimental para aplicar la técnica de la termografía pulsada requiere fundamentalmente de los siguientes elementos:

- Cámara infrarroja.
- Fuente de calor (flashes o focos de luz halógena).
- Unidad de control.

- Ordenador (software).
- Muestra o espécimen a analizar.

Además de estos elementos, se ha necesitado de una estructura metálica que actúe como esqueleto del sistema, para mantener y posicionar de manera adecuada los diferentes componentes.

En la imagen 3.1 se puede ver una imagen del sistema de adquisición de datos al completo. A continuación, se hablará de cada uno de los elementos que lo forman, sus funciones y características.



Imagen 3.1: Sistema de adquisición datos termográficos.

3.1.- Cámara infrarroja

El primero de los componentes de los que se va a hablar es la cámara infrarroja. Este es uno de los elementos fundamentales del sistema ya que captura las imágenes termográficas de la muestra a analizar. Los datos que proporciona la cámara termográfica son matrices tridimensionales de temperaturas, no imágenes de calor con diferentes colores. Las imágenes de calor que se conocen comúnmente las genera el software que viene con la cámara a partir de estos datos de temperatura ya que son más fáciles de interpretar con la vista. Sin embargo, estos colores no corresponden con la radiación infrarroja captada, sino con la que el software asigna arbitrariamente, de acuerdo al rango de temperaturas percibidos.

La cámara infrarroja elegida para la investigación es una Optris PI 450i con una lente de 29° x 22° y una apertura de $f = 13\text{mm}$ (imagen 3.2). Este modelo pertenece a la serie PI de Optris (*Precision Line*) y es el más pequeño de su clase. Los parámetros a destacar del mismo son los siguientes: es capaz de grabar y capturar imágenes térmicas a alta velocidad en tiempo real con una frecuencia de 80 Hz (conmutable a 27 Hz) y una resolución de 382 x 288 píxeles; ofrece una sensibilidad de 40 mK (miliKelvins), apropiada para detectar pequeñas diferencias de temperatura. La sensibilidad representa la diferencia de temperatura más pequeña que puede distinguir el sensor infrarrojo. Cuanto menor sea este número mayor será la sensibilidad de la cámara y podrá detectar un mayor número de diferentes temperaturas; en el caso del proyecto las temperaturas a medir no tienen un amplio margen, partiendo de la temperatura ambiente (que depende de las condiciones estacionales y del acondicionamiento de la estancia donde se encuentra el sistema de medida) se incrementa en un máximo de 10° ; aunque la cámara es capaz de detectar temperaturas en un amplio rango, desde -20°C hasta 900°C ; presenta un tamaño muy compacto (46 x 56 x 68 mm), facilitando el montaje y manejo de la misma; por último cabe destacar que el sensor capta las radiaciones emitidas en el rango espectral de 8 hasta 14 μm .



Imagen 3.2: Cámara infrarroja Optris PI 450i.

La cámara infrarroja incluía un paquete de software llamado *PIX Connect* y una API propietaria a través de la cual se puede utilizar la cámara en tiempo real para grabar imágenes y videos térmicos a través de código. La interfaz de conexión con el PC es USB 2.0. Haciendo uso de esta API se ha desarrollado el software necesario para controlar la cámara y el resto de dispositivos y adquirir y almacenar los datos termográficos, el desarrollo de este software se ha realizado en lenguaje C.

Como se puede apreciar en la imagen 3.1 la cámara infrarroja se encuentra encima de la plancha metálica, donde se sitúa el espécimen o muestra a analizar. Uno de los factores decisivos para el proyecto durante el montaje y desarrollo del sistema de adquisición fue la distancia o altura a la que se debía colocar la cámara termográfica. Dependiendo del modelo, la lente, del tamaño de la muestra a analizar y el tamaño más pequeño de la muestra que se quiere discriminar la cámara debe situarse a una distancia determinada de la muestra. La propia empresa de la cámara termográfica pone a disposición de todo el mundo una herramienta online para realizar este cálculo. Tras varias pruebas y ensayos se decidió colocar la cámara a una distancia de 49 cm para tener un compromiso entre el tamaño de la muestra y la resolución mínima. Como se puede ver en la imagen 3.3, de esta manera el *FOV* (*Field of View*) o campo de visión de la cámara a la superficie del objeto es de 265 mm de manera horizontal y 195 mm de manera vertical. El tamaño del píxel o *IFOV* (*Instant Field of View*) es de 0,69 mm, el *IFOV* indica el tamaño del detalle más pequeño dentro del campo

de visión que se puede detectar o ver. Esto quiere decir que si la resolución espacial no es suficientemente buena puede que no se puedan apreciar ciertos detalles y se deba reducir la distancia de la cámara a la muestra. Por último, el *MFOV* o *IFOVM* (*Instantaneous Field of View Measurement*) es de un tamaño de 2,08 mm, esto es el detalle más pequeño del que se puede obtener una medida precisa de temperatura.

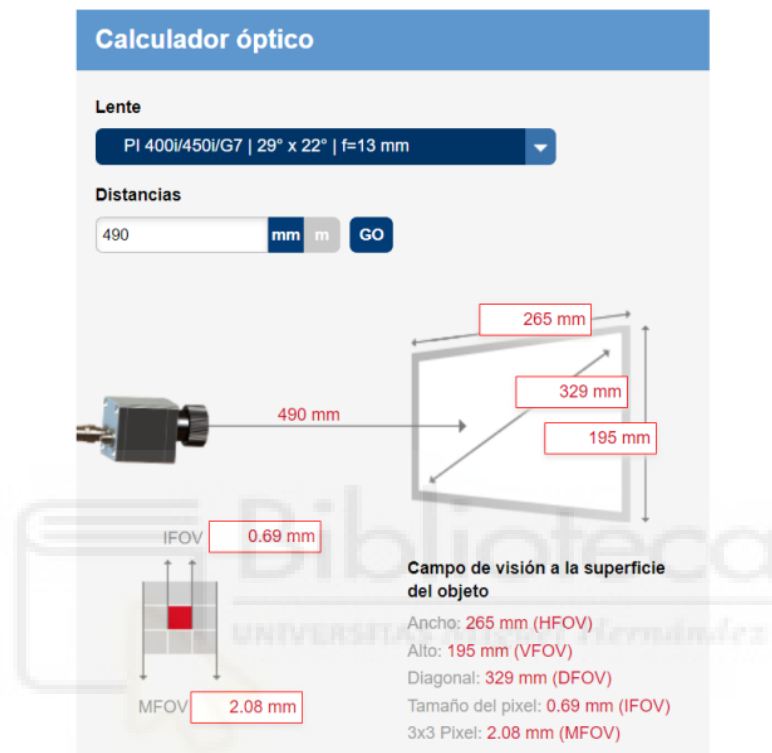


Imagen 3.3: Herramienta web calculador óptico Optris.

En el siguiente enlace se puede encontrar toda la información disponible sobre la cámara infrarroja, <https://www.optris.es/camara-infrarroja-optris-pi-400-pi-450>.

3.2.- Fuente de calor

El segundo elemento del sistema de adquisición del que se va a hablar es la fuente de calor, normalmente se utilizan bien flashes o focos de luz halógenas. Este componente se encarga de calentar la muestra durante un periodo determinado de tiempo y provocar un aumento de su temperatura. Para el propósito de este proyecto se decidió utilizar focos de luz halógena en vez de flashes debido a que para aplicar la técnica de termografía de pulso largo no es

necesario aplicar tanta potencia instantánea. Además, los focos de luz son mucho más asequibles que los flashes utilizados comúnmente en experimentos de termografía de pulso corto.

Para el experimento se buscaron bombillas de 500 W de muy bajo coste. El bajo coste de las bombillas asegura un bajo rendimiento lumínico, lo que interesa para el proyecto ya que lo que se buscaba en estos focos era la emisión de calor. Cuanto menor es la eficacia energética mayor es el calor emitido y menor la intensidad lumínica. Para aumentar aún más el calor desprendido se decidió retirar el cristal protector de los focos que hacía que una parte del mismo no se emitiese a la muestra. Tras realizar numerosas pruebas se decidió utilizar seis focos, obteniendo una potencia total de 3000 W. Las muestras analizadas han sido rectangulares por lo que, como se puede observar en la imagen 3.4 se han colocado dos emisores en cada uno de los lados más largos y uno en los lados más cortos, buscando una emisión lo más homogénea posible capaz de aumentar la temperatura de la muestra en al menos 10° en un tiempo inferior a 10 segundos. Se comprobó que esta distribución era adecuada para los materiales de baja conductividad térmica que se desea analizar de manera que todas las zonas de la muestra alcanzasen un mismo gradiente térmico sin que hubiese mucha diferencia entre las diferentes zonas.



Imagen 3.4: Focos de luz.

3.3.- Unidad de control

A continuación, se hablará sobre la unidad de control. Este componente se encarga de activar el sistema de calentamiento durante un tiempo predefinido, bien cuando recibe la orden a través de los interruptores del “shield” que incluye también el LCD, o bien cuando recibe la orden a través de la conexión USB. Esta conexión USB actúa como un emulador de puerto serie.

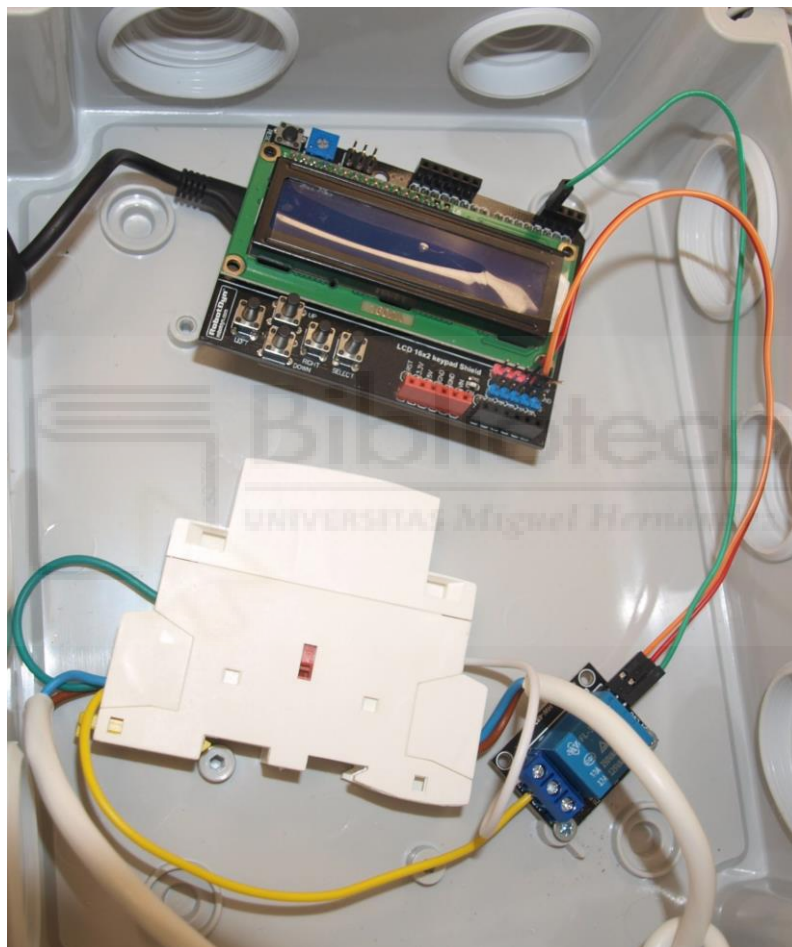


Imagen 3.5: Interior unidad de control.

Como se puede ver en la imagen 3.5 la unidad de control está formada por una placa arduino UNO unida a un display LCD alfanumérico con interruptores, un relé electromagnético libre de potencial y un contactor:

- El **Arduino UNO** es una placa de microcontrolador de código abierto. La placa está equipada con un conjunto de pines de E/S digitales y analógicos que pueden

conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos. La placa tiene 14 pines digitales y 6 pines analógicos programables con el Arduino IDE (Entorno de desarrollo integrado) a través de un cable USB o un programador JTAG.

- Un **relé** es un dispositivo electromagnético que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico.
- Un **contactor** es un elemento electromecánico que tiene la capacidad de establecer o interrumpir la corriente eléctrica de una carga. Son similares a los relés, y ambos permiten controlar toda clase de circuitos. Pero se diferencian por la misión que cumple cada uno: los relés controlan corrientes de bajo valor como las de circuitos de alarmas visuales o sonoras, alimentación de contactores, etc. y los contactores se utilizan como interruptores electromagnéticos en la conexión y desconexión de circuitos de iluminación y fuerza motriz de elevada tensión y potencia.

Por un lado, la placa arduino se encuentra conectada al ordenador que controla el sistema de adquisición por USB, por otro lado, está conectada al relé libre de potencial. El relé a su vez está conectado con el contactor y por último el contactor está conectado al sistema de calentamiento (focos de luz) y a la red de corriente eléctrica mediante enchufes. Cuando la placa Arduino recibe la orden de activar los focos durante un número determinado de segundos manda una corriente eléctrica al relé, este recibe la señal conmutando la señal de 220V que sirve de actuador para el contactor. El contactor realiza un papel similar al del relé, recibe la señal de control, en este caso de 220V, y conmuta la carga conectada a dicho dispositivo, en nuestro caso los focos de luz (3000 W).

3.4.- Estructura metálica

El componente del sistema del que se va a hablar es la estructura metálica que da soporte y permite posicionar el resto de los elementos. La estructura está formada por barras de aluminio con bisagras unidas entre sí.

Como se puede apreciar en la imagen 3.1 la estructura está formada por varias barras unidas por la base formando un prisma rectangular vacío. A media altura se puede encontrar la plancha donde se sitúa la muestra a analizar, esta plancha también está hecha de aluminio, ya que es un buen conductor del calor y se enfría rápidamente. Por encima de la plancha metálica se unieron las dos esquinas de cada lado con dos barras en cada uno de ellos. Estas cuatro barras situadas en los laterales de la estructura sirven para poder colocar las tres barras perpendiculares que atravesarán de manera horizontal por encima de la plancha, donde se situarán los focos y la cámara termográfica. Los focos de luz se colocarán en las barras horizontales situados a menor altura y la cámara termográfica se situará en la barra horizontal superior, de esta manera se podrán colocar los focos a una distancia diferente a la de la cámara. Gracias a las bisagras de las barras es posible recolocar y posicionar a diferentes alturas todos los elementos del sistema según las necesidades del proyecto.

Tras realizar algunas pruebas se vio que en las muestras que no ocupaban el total del campo de visión de la cámara se podían apreciar reflejos térmicos de las barras metálicas de la estructura y de otros materiales que se encontraban justo encima de la plancha. Por este motivo se decidió recubrir la parte superior de la estructura de manera homogénea, justo debajo de la cámara termográfica, con un material no reflectante, dejando una apertura rectangular para que la cámara pudiese tomar las muestras.

3.5.- Software

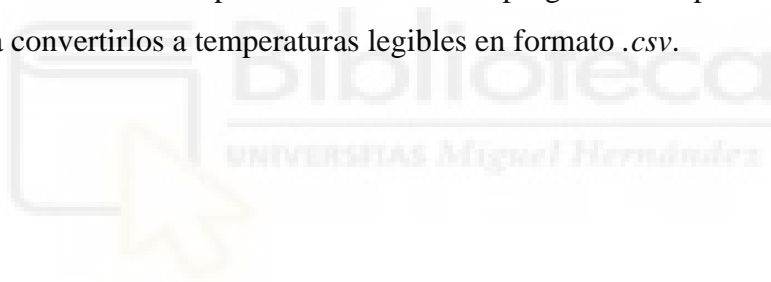
El siguiente y último elemento del sistema de adquisición es el ordenador. Lo importante realmente de este elemento es el software ejecutado en el mismo. Este software se ha desarrollado en el lenguaje de medio nivel C y es el responsable de controlar toda la lógica del sistema de adquisición.

El programa desempeña varias funciones durante el proceso de captura, estas se describirán a continuación:

- Se encarga de transmitirle a la unidad de control la orden de activar el sistema de calentamiento y durante cuánto tiempo exactamente.
- La cámara está continuamente captando y enviando datos termográficos al ordenador a través de la conexión USB. El programa es el que decide cuando empezar a almacenar estos datos.
- Al inicio de cada captura el programa activa un flag de la cámara para que se cierre un diafragma situado en la parte exterior de la lente durante un pequeño periodo de tiempo y así minimizar los errores de medición de la cámara (deriva térmica). La deriva térmica es un fenómeno que se produce tras realizar varias capturas de datos seguidas, haciendo que la cámara pierda cierta sensibilidad. Es necesario ejecutarlo antes de comenzar la captura ya que si no se hace de forma manual la propia cámara lo podría activar de manera automática durante una captura e interrumpirla, este es un proceso requerido para evitar daños en los sensores térmicos.
- Una vez se ha realizado la captura de los datos y estos se almacenan en el ordenador el programa los transforma a un formato legible de temperaturas. De manera por defecto los datos capturados por la cámara se encuentran en formato binario (extensión .bin). El software transforma estos datos a temperaturas reales (°C), al formato *Comma Separated Values* (.csv) de manera que ya se pueden abrir con Matlab o algún otro programa que lea este tipo de archivos.

La utilización del sistema de adquisición de datos termográficos a través del software no es demasiado compleja. Para realizar una captura de datos se tendrá que posicionar la muestra sobre la plancha de aluminio de la estructura metálica, lo más centrada posible. Si se diese el caso de que la muestra es demasiado grande se podría procesar en dos, tres o el número

de capturas que se necesitase, moviendo la piel tras cada captura. Una vez se ha posicionado la piel correctamente se abrirá la carpeta donde se encuentra el software de captura a través de la consola de comandos. A continuación, se ejecutará el software a través de la consola introduciendo los comandos que se necesiten. De manera obligatoria se tendrá que especificar la ruta al fichero xml de configuración de la cámara, el nombre del fichero de salida que se generará tras la captura de los datos, el puerto serie por el cual se encuentra la cámara conectada, la duración total de la captura en frames y la duración del pulso de luz en segundos (se puede especificar decimales). Una vez se ejecute el programa con los parámetros correspondientes se abrirá una pequeña ventana que mostrará en imagen lo que está captando la cámara en ese momento. Cuando se desee comenzar el pulso y la captura de los datos se deberá pulsar la tecla B del teclado, en el momento que se pulse esta tecla se activarán los focos de luz y el software comenzará a almacenar los datos termográficos enviados por la cámara. Una vez se apaguen los focos de luz el software continuará almacenando los datos hasta alcanzar el número de frames totales especificados como parámetro. Una vez se han capturado los datos el programa los procesará de manera automática para convertirlos a temperaturas legibles en formato *.csv*.



Capítulo 4 - Sistema de captura, acondicionamiento y análisis de datos

Como ya se ha comentado en el primer capítulo del trabajo uno de los hitos principales que se ha desarrollado para alcanzar el objetivo del proyecto ha sido un sistema de captura, acondicionamiento y análisis de datos que facilitase el diseño, desarrollo y experimentación de los diferentes algoritmos y métodos de detección que se decidiese investigar, así como la

obtención y el tratamiento de los datos. En el presente capítulo se va a describir este sistema y se comentarán sus diferentes funcionalidades en cada uno de los aspectos mencionados.

4.1.- Herramienta de desarrollo

Esta plataforma ha sido desarrollada utilizando una de las herramientas que MATLAB proporciona, *App Designer*. *App Designer* es un entorno de desarrollo interactivo utilizado para diseñar aplicaciones y programar su comportamiento. Proporciona una versión totalmente integrada del editor de MATLAB y un gran conjunto de componentes interactivos predefinidos para la interfaz de usuario. Además, ofrece un administrador de diseño de cuadrículas para organizar la interfaz de usuario y opciones de reordenación automáticas para hacer que la aplicación detecte y se adapte a los cambios del tamaño de la pantalla. También permite distribuir las aplicaciones que se diseñen empaquetándolas en archivos de instalación directamente desde la barra de herramientas de *App Designer*, o bien creando una aplicación web o de escritorio independiente con el *MATLAB Compiler*.

App Designer ofrece dos tipos de vistas para facilitar el trabajo con la aplicación, por un lado, ofrece la vista de diseño (imagen 4.1) la cual permite arrastrar y colocar componentes de manera visual utilizando guías de alineación para obtener diseños precisos. *App Designer* genera de manera automática código orientado a objetos que especifica la distribución y el diseño de la aplicación. Esta vista nos permite modificar tanto la posición como las propiedades de todos los elementos de la interfaz sin necesidad de código. En la parte derecha de la imagen se puede observar un árbol jerárquico en el que se muestran todos los componentes de la aplicación y justo debajo se muestran las propiedades del elemento seleccionado en ese momento.

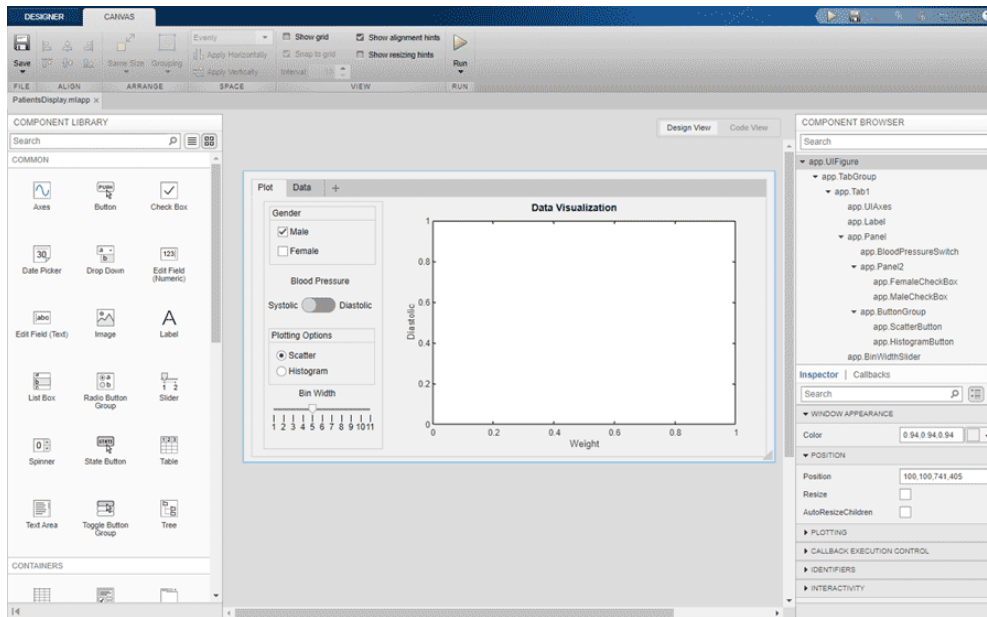


Imagen 4.1: Vista de diseño *App Designer*.

El segundo tipo de vista que ofrece *App Designer* es la vista de código (imagen 4.2), desde esta vista se podrá definir el comportamiento de la aplicación. Esta vista permite ejecutar scripts externos, declarar propiedades (variables globales para la aplicación), métodos privados y públicos así como modificar las propiedades de cualquier componente de la interfaz de usuario en tiempo de ejecución. Además *App Designer* puede comprobar automáticamente la existencia de problemas de codificación mediante Code Analyzer. Permite visualizar mensajes de advertencia y error de código a medida que se programa y modificar la aplicación conforme a los mensajes.

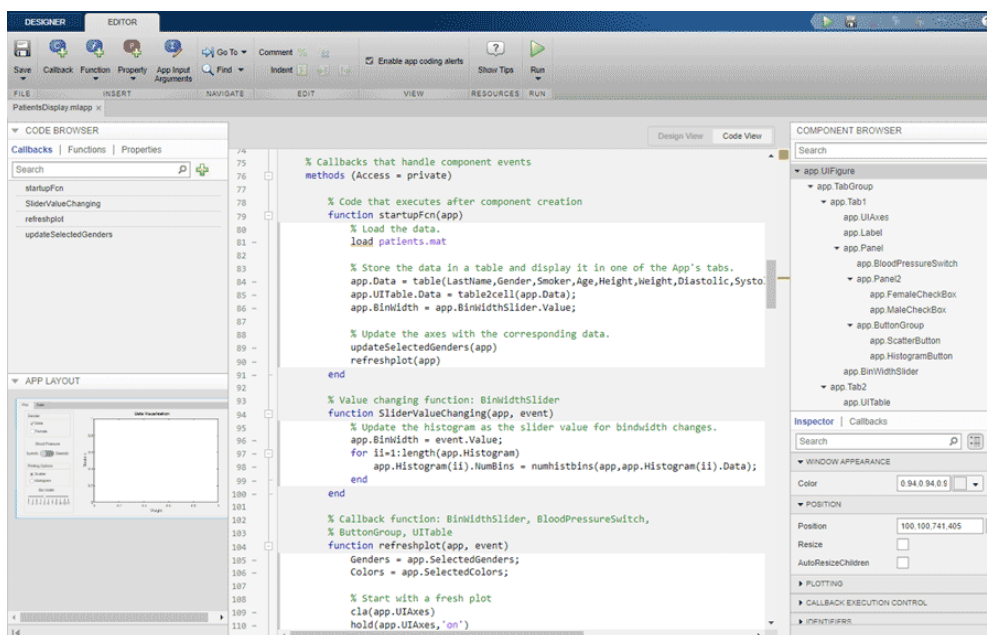


Imagen 4.2: Vista de código *App Designer*.

A pesar de todas las ventajas mencionadas acerca de Matlab y *App Designer* la documentación acerca de las mismas no es muy extensa. Además, la propia herramienta ha limitado el desarrollo de la plataforma ya que algunas funcionalidades que se pretendían no eran compatibles con la misma.

4.2.- Plataforma software

En la imagen 4.3 se puede ver la interfaz gráfica de la plataforma software, sus funcionalidades se pueden dividir principalmente en tres partes: captura, acondicionamiento y análisis de los datos.

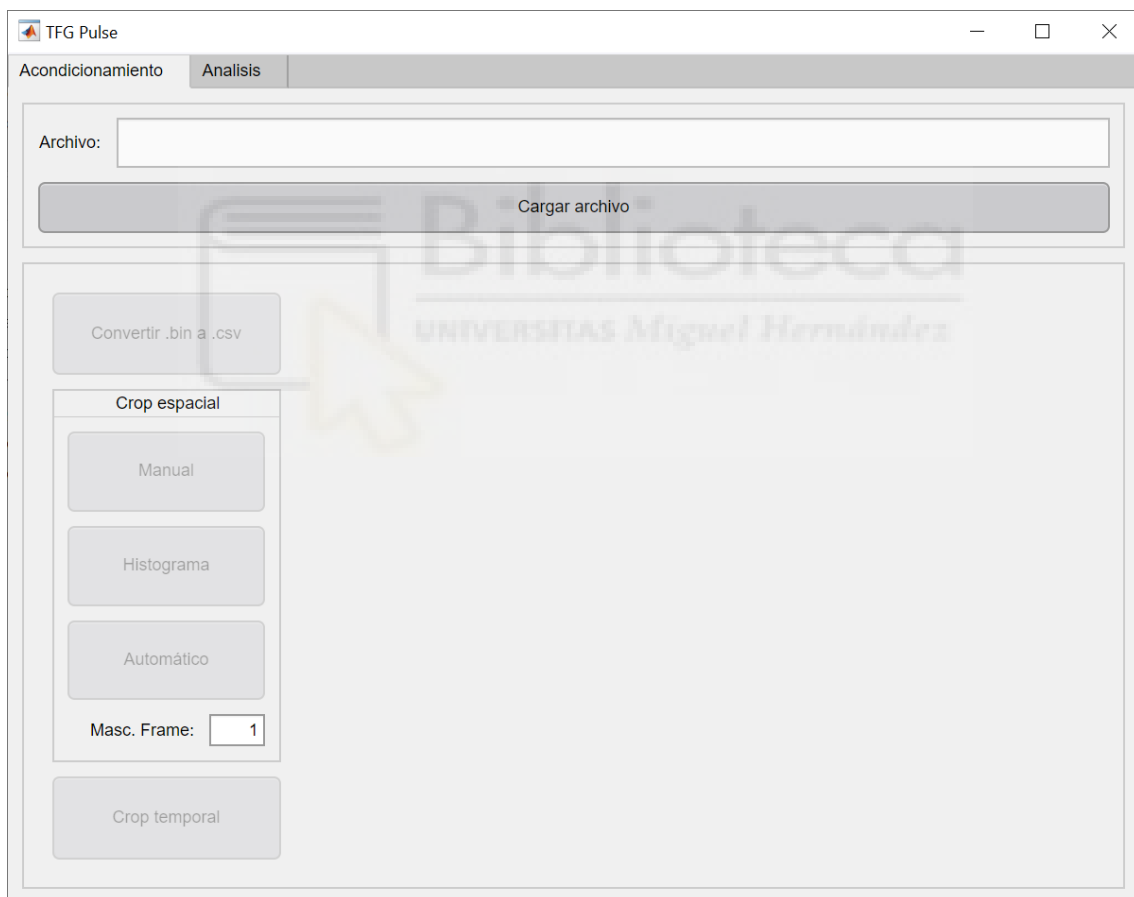


Imagen 4.3: Interfaz gráfica plataforma software.

4.2.1.- Captura

La sección de captura está formada por el proceso de transformación de los datos térmicos crudos capturados por la cámara termográfica a temperaturas legibles. Si se observa la imagen 4.3 esta función se puede encontrar en la pestaña de “Acondicionamiento” con el nombre de “Convertir .bin a .csv”.

Los datos almacenados que captura la cámara son matrices tridimensionales. Cada frame que se captura está formado por una matriz de datos en el que cada píxel representa un número y una vez se transforme representará una temperatura en grados Celsius. Para poder transformar estos datos crudos a temperaturas legibles es necesario tratar cada píxel de manera individual.

Para ello el software incluye un algoritmo que recorre todos los píxeles de todos los frames de los datos capturados y les aplica la siguiente operación:

$$T_{Pixel} = \frac{Raw\ Data}{10^{Dec}} - 100$$

donde *Raw Data* es el valor captado por la cámara y *Dec* es la precisión que se desea, es decir, el número de decimales que tendrá la temperatura calculada. En un principio esta funcionalidad únicamente iba a desarrollarse en la plataforma software, pero debido al coste computacional y de tiempo de Matlab se decidió incluir en el programa en C que maneja el sistema de adquisición de los datos. De esta manera se tratan los datos justo después de capturarlos.

4.2.2.- Acondicionamiento

En la sección de acondicionamiento es donde ha tenido lugar la mayor parte del desarrollo de la plataforma software. Cuando se habla de acondicionamiento de datos se refiere a modificar o transformar los mismos cuando se quiere que estos tengan un aspecto o unas

características diferentes a las actuales. A continuación, se explicarán algunos ejemplos del acondicionamiento de los datos que se han desarrollado:

Crop Espacial

El crop espacial o recorte espacial consiste en reducir o recortar las dimensiones x e y de una matriz de datos. En el caso de ser una matriz tridimensional, como por ejemplo los datos termográficos con los que se trabajan en el proyecto el recorte se realizaría a todas y cada una de las matrices bidimensionales que forman cada captura de datos termográficos en un instante dado. Recibe el nombre de recorte espacial ya que cada matriz de datos de temperaturas se puede representar como una imagen tras aplicarles un tratamiento (se hablará más tarde de este acondicionamiento), de tal manera que al reducir las dimensiones x e y se está recortando la imagen. Este acondicionamiento es imprescindible ya que al trabajar con muestras irregulares algunas capturas de datos incluyen información innecesaria que no pertenecen a la muestra a analizar, además se ha desarrollado de tres maneras diferentes, cada una de ellas creada con un objetivo concreto.

Una característica común para los tres modos de crop espacial es que se puede seleccionar la matriz (o en el caso de los datos termográficos, el frame) que se utilizará para el recorte. Este parámetro es muy importante a la hora de realizar el crop ya que cada matriz o frame a lo largo de los datos presentará un aspecto diferente. Como ya se ha comentado los datos que se capturan para el proyecto están formados por el calentamiento durante un número determinado de segundos de la muestra y su posterior enfriamiento. El frame o matriz número 50 de los datos, cuando la muestra ya se haya calentado durante un tiempo presentará un mayor contraste térmico que el frame número 1, cuando todavía no se han encendido los focos y la muestra y la plancha metálica se encuentran a una temperatura similar. Por esta razón se ha añadido este parámetro a la plataforma, para poder seleccionar el frame de interés para realizar el recorte espacial. En la imagen 4.3 se puede ver este parámetro con el nombre de “Masc. Frame:”.

La primera de las formas de crop espacial de las que se va a hablar es el **crop espacial manual**, como bien dice su nombre este crop espacial lo realiza el usuario de manera gráfica. Es conveniente utilizarlo cuando únicamente interesa una zona concreta de la muestra. Para ello el usuario seleccionará el archivo que quiera acondicionar y una vez seleccione la opción

de crop espacial manual se abrirá una ventana en la que aparecerán los datos de la matriz representados como una imagen en tono de grises. El usuario podrá dibujar un rectángulo con el puntero sobre la imagen y la plataforma realizará el recorte de ese rectángulo (imagen 4.4). Una vez se haya dibujado el rectángulo deseado el usuario deberá pulsar el botón de “Previsualizar” y verá una imagen del resultado que se obtendrá (imagen 4.5). Después de haber pulsado el botón de “Previsualizar” el usuario ya podrá pulsar el botón de “Realizar crop” para realizar el recorte y generar un archivo con los nuevos datos.

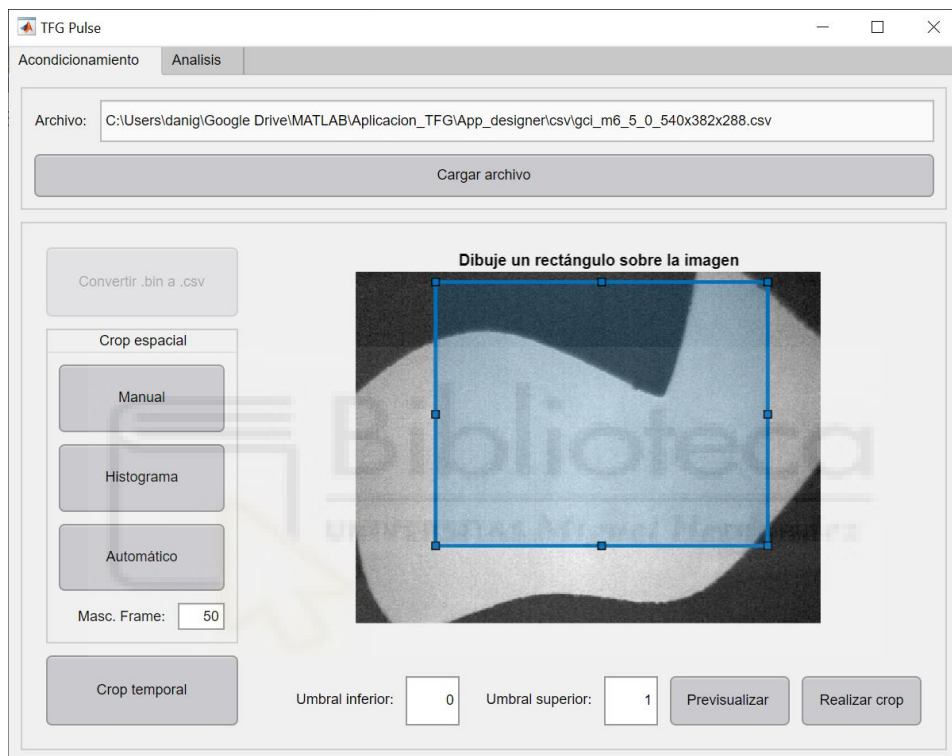


Imagen 4.4: Ejemplo crop espacial manual.

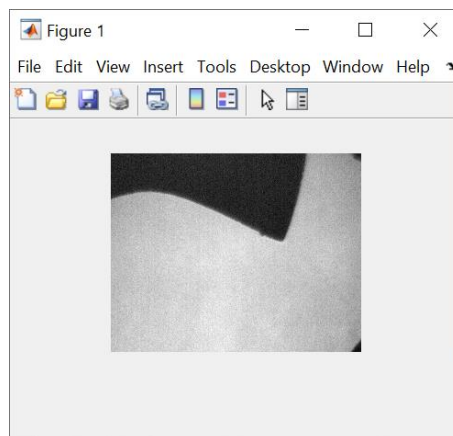


Imagen 4.5: Resultado ejemplo crop espacial manual.

El siguiente modo de crop que se va a explicar es el **crop espacial por histograma**, se podría decir que este recorte espacial es semi-manual. Este modo de recorte espacial se desarrolló cuando todavía no se conocían las características de los datos termográficos con los que se trabajaba y no se había desarrollado un método que de manera automática pudiese recortar los datos para que se ajustaran perfectamente a la muestra que se pretendía analizar. Una vez el usuario haya seleccionado el archivo que quiere recortar y seleccione la opción de crop espacial por histograma la plataforma software comenzará a calcular el histograma del frame o matriz seleccionada. Cuando termine se mostrará en la interfaz el gráfico de barras correspondiente a la frecuencia de cada temperatura normalizada (imagen 4.6). De esta manera el usuario podrá definir los umbrales superiores e inferiores a partir de los cuales quiere que se recorte la imagen.

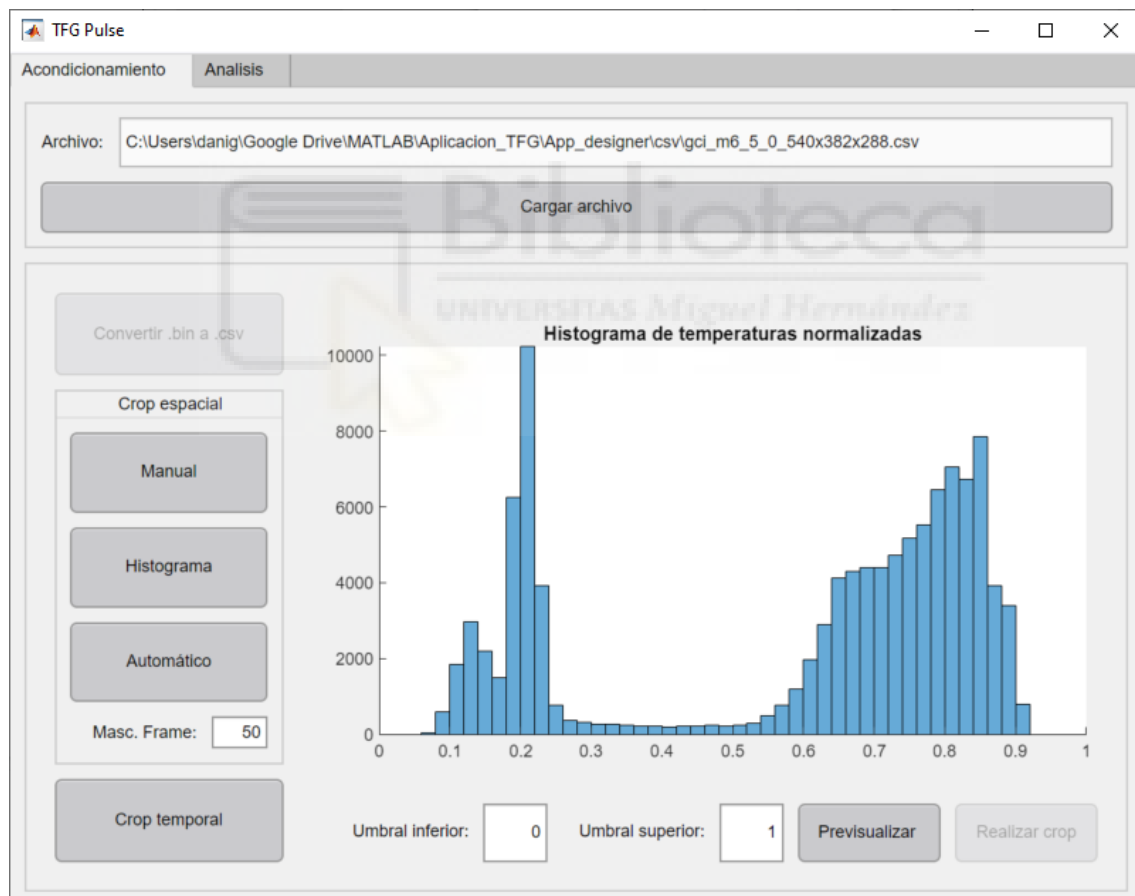


Imagen 4.6: Ejemplo crop espacial por histograma.

Una vez el usuario defina los umbrales y para asegurar que el recorte es el que se pretende el usuario debe pulsar el botón “Previsualizar”. Al pulsarlo los valores por debajo del umbral inferior y los valores por encima del umbral superior pasarán a ser 0 mientras que los valores que se encuentren dentro del rango pasarán a ser 1. Cuando se aplique esta fórmula a todos los valores de la matriz se mostrará una imagen binaria (en blanco y negro) de la muestra generada a partir de los umbrales previamente definidos (imagen 4.7).

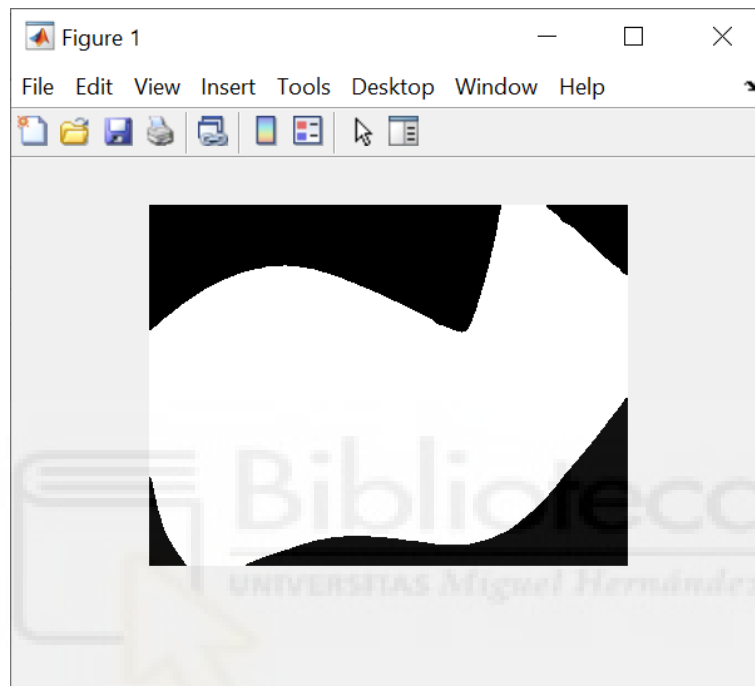


Imagen 4.7: Ejemplo máscara binaria crop espacial por histograma.

De esta manera el usuario podrá confirmar de manera visual que los umbrales que ha definido generan el recorte espacial deseado. Finalmente, para que se aplique este recorte a todos los frames de los datos el usuario deberá pulsar el botón “Realizar crop”. La plataforma multiplicará cada una de las matrices de los datos por la máscara binaria generada y posteriormente realizará un recorte rectangular dejando fuera todos los valores que sean 0. En la imagen 4.8 se puede observar un esquema resumen del acondicionamiento que se acaba de explicar.

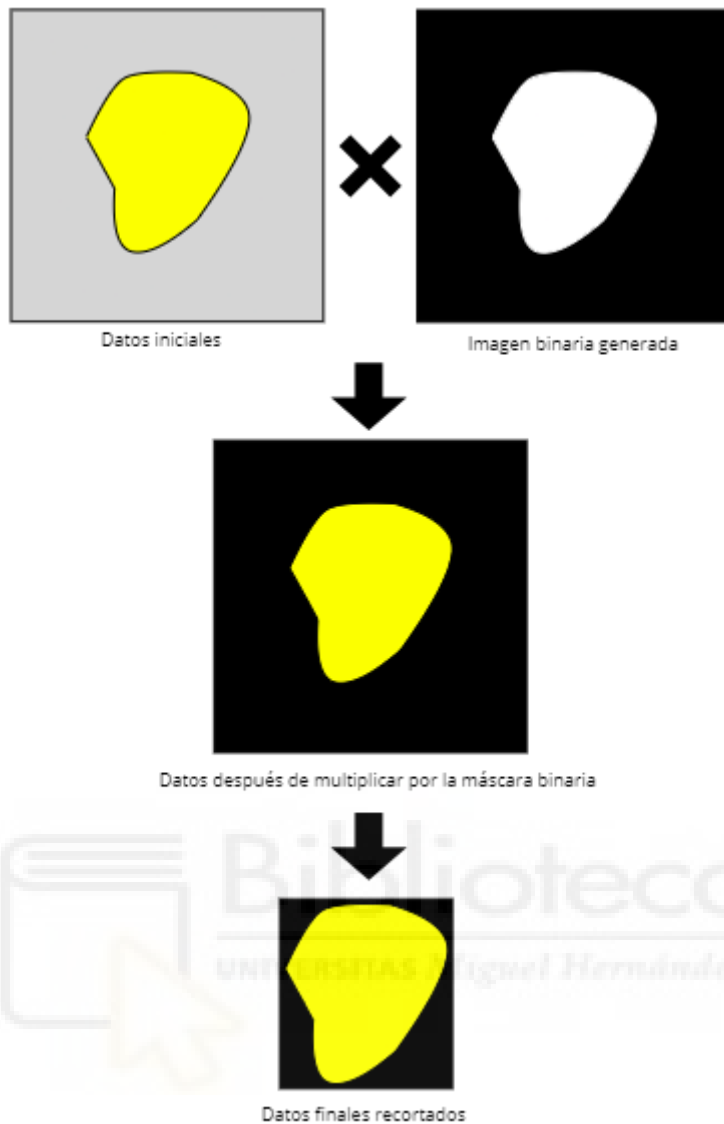


Imagen 4.8: Crop espacial por histograma.

El último modo de crop espacial desarrollado es el **crop espacial automático**. Este crop se desarrolló con la intención de automatizar el acondicionamiento de los datos para su posterior análisis. El sistema de detección final que se utilizará en la fase de explotación deberá ser totalmente automático por lo que si es necesario realizar algún recorte espacial este también lo debe ser. El proceso a seguir es muy similar al crop espacial por histograma, primero se obtiene una máscara binaria que diferencie la muestra del fondo, se multiplican todas las matrices por la máscara y por último se realiza un recorte rectangular que deja fuera todos los valores que sean 0. La complejidad de este acondicionamiento es automatizar la obtención de la máscara binaria, ya que de ella dependerá el resultado del crop. Para conseguir este objetivo el algoritmo desarrollado sigue los siguientes pasos:

1. Normaliza la matriz de temperaturas F (este proceso será explicado más adelante).
2. Comprueba la cantidad de *background* o fondo que hay en la imagen y define el tipo de máscara, así como el umbral que se utilizará posteriormente para definir qué valores pasan a ser 0 y cuales pasarán a ser 1.
3. Aplica un filtro de Gauss a la matriz F para suavizar los bordes de la muestra y evitar el pixelado.
4. En el caso de ser una imagen con un contenido de fondo muy bajo, bajo o medio se generará una matriz de pesos W a partir de la matriz de datos original. Cada valor de la matriz de pesos se calculará con la siguiente fórmula, donde *pI* es el dato de la matriz original y *rI* será una constante previamente definida.:

$$w = \frac{1}{|pI - rI|}$$

5. Obtiene una nueva matriz B a partir de la matriz de pesos W donde cada elemento de B es el logaritmo de la posición correspondiente de W.
6. Normaliza la matriz B.
7. Pone a 0 todos los valores de la matriz B que sean mayores al umbral definido en el segundo paso.
8. Pone a 1 todos los valores de la matriz B que sean mayores a 0.
9. Erosiona y dilata la imagen para quitar posibles puntos internos de la muestra que se hayan podido pasar por alto.
10. Por último, convierte la matriz B a valores lógicos. Todos los valores de B diferentes a 0 pasarán a valer 1.

En el caso de ser una imagen con un alto contenido de fondo se saltarán los pasos 4, 5 y 6.

Todos los recortes espaciales desarrollados no sobrescriben el archivo cargado sino que generan un nuevo archivo en formato .mat. El nombre del nuevo archivo será el mismo que el original salvo que se modificarán las dimensiones de este y se le añadirá el prefijo “scrop_” para saber que ese archivo ha sido sometido a un recorte espacial. El almacenamiento de estos datos intermedios es necesario al tratarse de una herramienta de desarrollo.

Crop Temporal

El segundo tipo de acondicionamiento desarrollado del que se va a hablar es el crop temporal. El crop temporal o recorte temporal consiste en reducir la dimensión z o tercera dimensión de un conjunto de datos tridimensionales. En el caso de los datos termográficos con los que se trabaja en el proyecto las dimensiones x e y representan la anchura y altura de la matriz y la dimensión z representa el número de frame (es decir, el tiempo), por ello este acondicionamiento recibe el nombre de crop temporal.

Al trabajar con volúmenes de datos tan grandes en algunas ocasiones se ha dado el caso de que no se necesitaban todos los datos que se habían capturado, por lo que reducir este volumen suponía un gran aumento de la velocidad de los análisis y diferentes tratamientos a los que eran sometidos. En etapas más tempranas del proyecto no se sabía con exactitud durante cuánto tiempo se debía grabar la caída de la temperatura para poder detectar los defectos no visibles de las muestras. Más tarde se vio que no era necesario capturar la curva de temperatura durante tanto tiempo por lo que parte de los datos capturados no tenían ninguna utilidad. El recorte temporal se desarrolló para suplir esta carencia y evitar procesar datos innecesarios, con el consecuente ahorro de tiempo de ejecución. Por otra parte, esta configuración depende del tipo de material a analizar, por lo que esta versatilidad es necesaria.

El recorte temporal desarrollado en la plataforma permite al usuario visualizar la curva media de temperatura de todos los píxeles de cada matriz de los datos termográficos y decidir qué parte quiere recortar. En la imagen 4.9 se puede ver un ejemplo del crop temporal. En el eje X del gráfico se representa el tiempo y en el eje Y la temperatura media, se puede apreciar la evolución de la curva de temperatura. Se ve como la primera parte corresponde al calentamiento de la muestra y cómo antes del frame 150 comienza a enfriarse de manera progresiva.

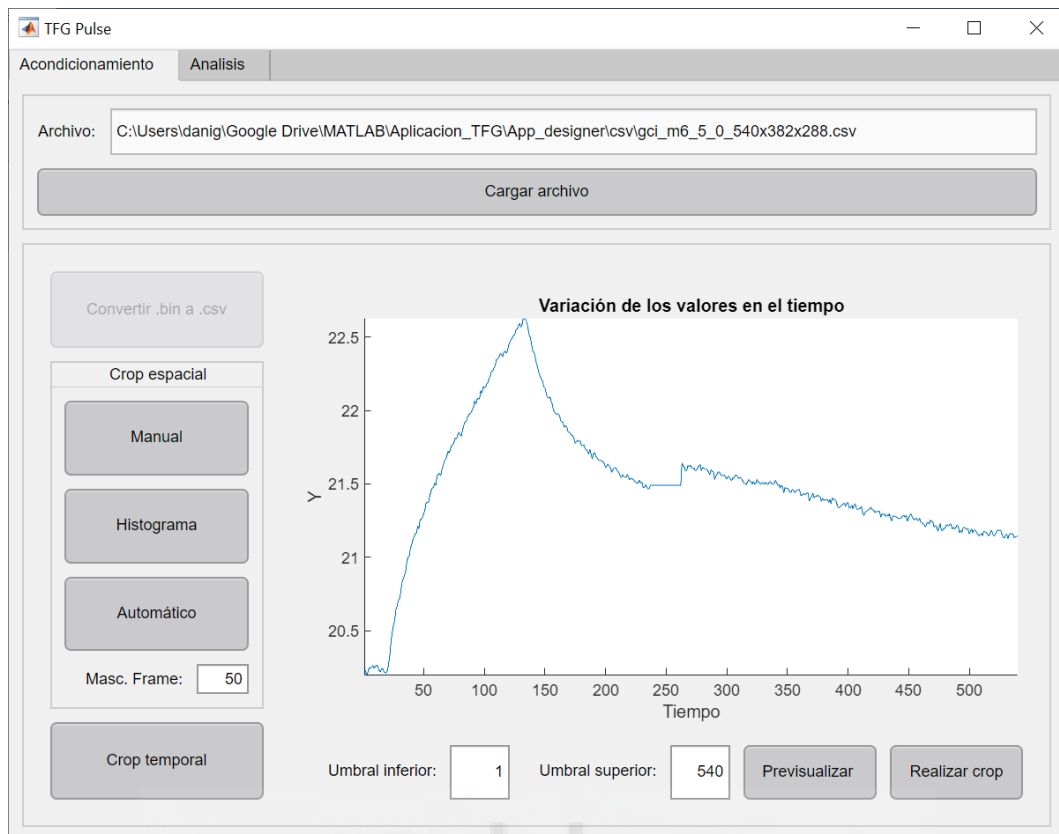


Imagen 4.9: Ejemplo crop temporal

Además, en la imagen 4.9 se puede apreciar la problemática descrita en el capítulo 3 con el flag de la cámara que cierra el diafragma de la lente para evitar la deriva térmica. Como se ha descrito este flag se puede activar de manera automática cuando no se hace de forma manual, en el valor 240 del eje X se observa la interrupción de captura de los datos y se ve como al volver a capturar temperaturas estas sufren una variación como consecuencia de la recalibración de los sensores.

Utilizando los umbrales inferiores y superiores el usuario puede decidir qué intervalo de tiempo desea recortar. Si por ejemplo el usuario quisiese eliminar el principio de los datos, la parte correspondiente al calentamiento, y una parte del final de la curva de enfriamiento debería escribir en el umbral inferior el número del frame a partir del cual empezarán los nuevos datos y en el umbral superior el número del último frame que formará parte de los mismos. En la imagen 4.10 se puede ver la curva resultante de utilizar 125 como umbral inferior y 230 como umbral superior.

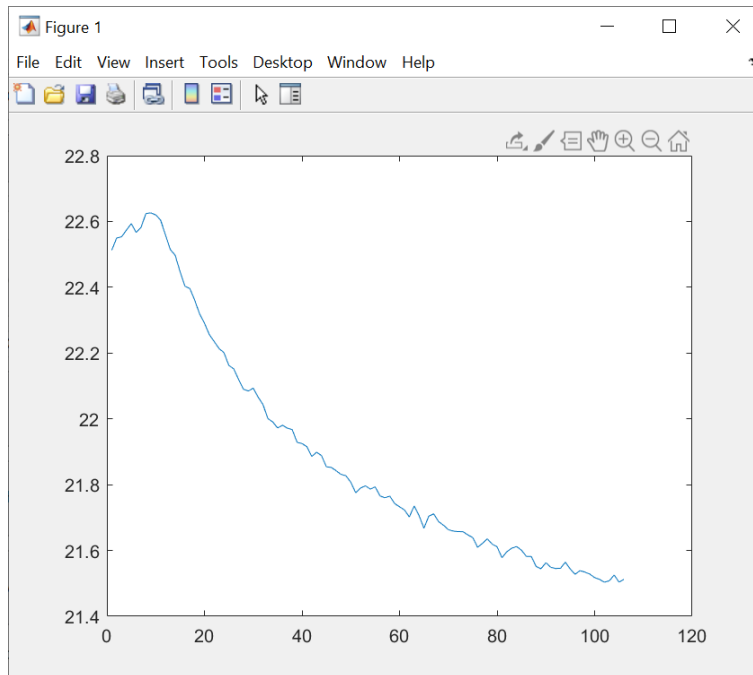


Imagen 4.10: Ejemplo resultado crop temporal

Al igual que en el crop espacial el usuario podrá utilizar el botón de “Previsualizar” para ver la nueva curva que se generará con los valores de los umbrales introducidos. Finalmente, para realizar el crop temporal y generar el nuevo archivo el usuario únicamente tendrá que pulsar el botón de “Realizar crop”. Al igual que en el crop espacial se generará un nuevo archivo con el mismo nombre que el original salvo por el tamaño de la tercera dimensión y porque se le añadirá el prefijo “tcrop_” para saber que se le ha sometido a un recorte temporal.

Curva de temperatura

Este acondicionamiento de los datos no conlleva demasiada complejidad y no modifica los mismos, pero permite visualizar la curva de temperatura de cada posición de la matriz. Si por ejemplo se quiere ver la curva de temperatura del píxel situado en la posición (100,160) de una matriz con dimensiones 209x335x540, este acondicionamiento devolverá un array que contendrá 540 valores, estos valores representan la evolución de temperatura del píxel a lo largo del tiempo (imagen 4.10).

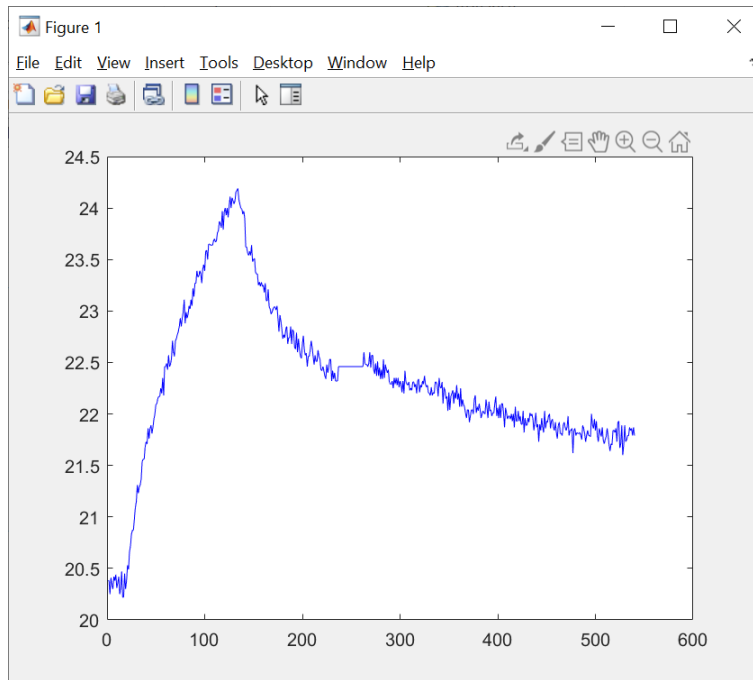


Imagen 4.10: Curva de temperatura de un sólo píxel

Filtros

Como se puede ver en las imágenes 4.5 y 4.10 las curvas e imágenes obtenidas al representar los datos termográficos contienen ruido, intrínseco a los sensores. Con el objetivo de mejorar la calidad de las imágenes y facilitar la búsqueda de información en los datos se han desarrollado algunos filtros. Se entienden por filtros operaciones que se aplican a los píxeles de una imagen digital para principalmente conseguir los siguientes objetivos:

- Suavizar la imagen. Es decir, reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- Eliminar ruido. Eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión.
- Realzar bordes. Destacar los bordes que se localizan en una imagen.
- Detectar bordes. Detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en su intensidad.

Para el desarrollo de los filtros específicos incluidos en la plataforma se han utilizado algunas herramientas predefinidas de Matlab, y se han adaptado a los tipos de datos con los que se trabajan. El primero de los filtros incluidos para el tratamiento de los datos termográficos es el **filtro de Savitzky-Golay**. El método Savitzky-Golay se basa en el cálculo de una regresión polinomial local (de grado k), con al menos $k+1$ puntos equiespaciados, para determinar el nuevo valor de cada punto. El resultado será una función similar a los datos de entrada, pero suavizada. Este filtro se aplica a cada píxel del cubo en profundidad, es decir en el eje temporal, para utilizarlo tendremos que pasarle a la función el volumen de datos a procesar, el orden polinómico y la longitud del fotograma o frame. En la imagen 4.11 se puede observar la curva de temperatura de un píxel sin filtrar (curva roja) y la curva de temperatura del mismo píxel tras haberle aplicado el filtro de Savitzky-Golay (curva azul).

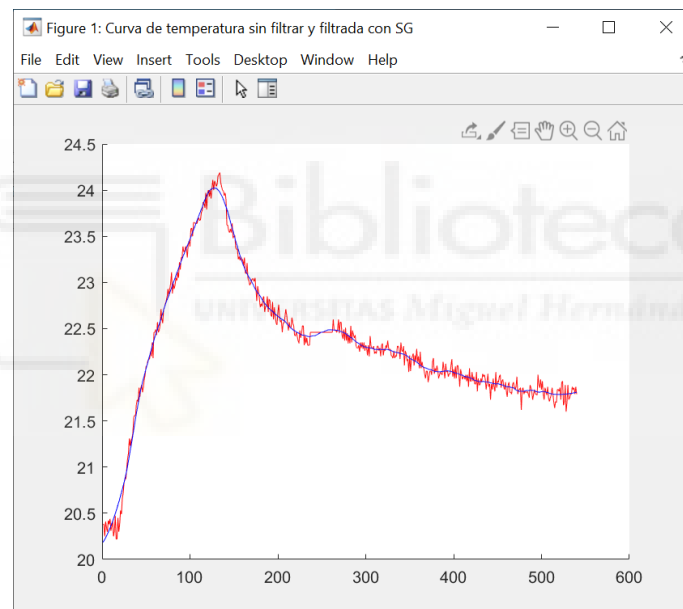


Imagen 4.11: Ejemplo filtrado Savitzky-Golay.

El siguiente filtro utilizado para el acondicionamiento de los datos termográficos es el **filtro de Gauss** o **filtrado gaussiano**. El operador del suavizado gaussiano es un operador de convolución bidimensional que se utiliza para “desenfocar” imágenes y reducir el ruido de estas. La convolución es una operación matemática fundamental para muchos operadores de procesamiento de imágenes. La convolución proporciona una forma de "multiplicar" dos matrices numéricas, generalmente de diferentes tamaños, pero con el mismo número de dimensiones, para producir una tercera matriz numérica con el mismo número de dimensiones. Esto se puede utilizar en el procesamiento de imágenes para implementar operadores cuyos valores de los píxeles de salida son combinaciones lineales simples de

ciertos valores de los píxeles de entrada. El filtrado gaussiano es similar al filtro de media, pero utiliza una máscara diferente que representa la forma de una campana gaussiana y se modeliza según la siguiente función:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

dónde σ es la desviación estándar de la distribución. El suavizado gaussiano se puede realizar con bastante rapidez, ya que la ecuación gaussiana mostrada un poco más arriba se puede separar en componentes x e y . Por lo tanto, la convolución se puede realizar convolucionando primero con una máscara gaussiana unidimensional en la dirección x , y luego convolucionando con otra máscara gaussiana unidimensional en la dirección y .

El grado de suavizado del filtro está determinado por la desviación estándar de la distribución (imagen 4.12). El suavizado gaussiano genera un "promedio ponderado" de los vecinos de cada píxel. Esto contrasta con el promedio ponderado uniforme del filtro medio. Debido a esto, el filtro gaussiano proporciona un suavizado más suave y conserva los bordes mejor que un filtro de media de tamaño similar.

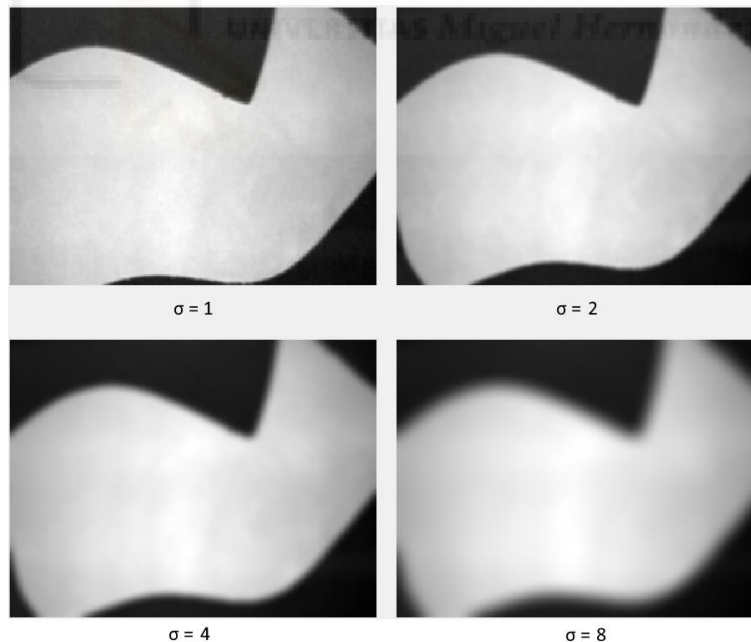


Imagen 4.12: Ejemplo filtro gaussiano con diferentes desviaciones.

Normalización

El siguiente acondicionamiento de los datos del que se hablará es la normalización. Este tratamiento es utilizado por ejemplo en el primer paso del algoritmo del recorte espacial automático que genera la máscara binaria. En estadística la normalización es la transformación de escala de la distribución de una variable con el objetivo de poder hacer comparaciones respecto a conjuntos de elementos. En otras palabras, la normalización nos permite poder comparar elementos de distintas variables y con distintas unidades de medida. Existen varios tipos de normalizaciones estadísticas, la utilizada y desarrollada para el proyecto consiste en transformar los valores de temperatura de una matriz tridimensional (cubo) al rango 0-1, donde el valor mínimo de temperatura del cubo corresponde al valor 0 y el valor máximo de temperatura del cubo corresponde al valor 1. Por necesidad de la investigación se han desarrollado dos formas de normalización, normalización por píxel y normalización por volumen. La fórmula utilizada para la normalización es la siguiente:

$$Data_{Norm} = \frac{Data - Min}{Max - Min}$$

dónde *Data* es el valor del píxel, *min* es el valor mínimo de todos los píxeles y *max* es el valor máximo. La **normalización por píxel** consiste en normalizar los valores de temperatura de cada píxel (o posición de la matriz) de manera individual, es decir, cada curva de temperatura se normalizará por separado. El mínimo y máximos utilizados en esta normalización es diferente para cada píxel o posición de la matriz, de esta manera cada píxel tendrá una temperatura mínima de 0 y una temperatura máxima de 1. En la imagen 4.13 se pueden observar las curvas de temperaturas de 10 píxeles diferentes del cubo normalizadas por píxel.

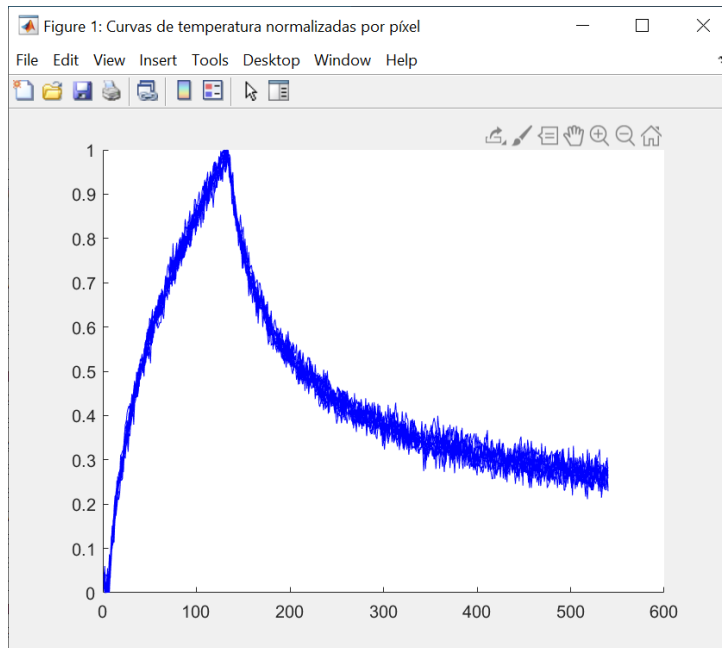


Imagen 4.13: Curvas de temperatura normalizadas por píxel.

Por otro lado, la **normalización por volumen** consiste en normalizar los valores de temperatura de cada píxel teniendo en cuenta el conjunto de todos los datos. El mínimo y máximos utilizados en esta normalización es el mismo para todos los píxeles o posiciones de la matriz, de esta manera sólo un píxel del cubo tendrá una temperatura mínima de 0 y sólo otro píxel tendrá una temperatura máxima de 1. En la imagen 4.14 se pueden observar las curvas de temperaturas de 10 píxeles diferentes del cubo normalizadas por volumen.

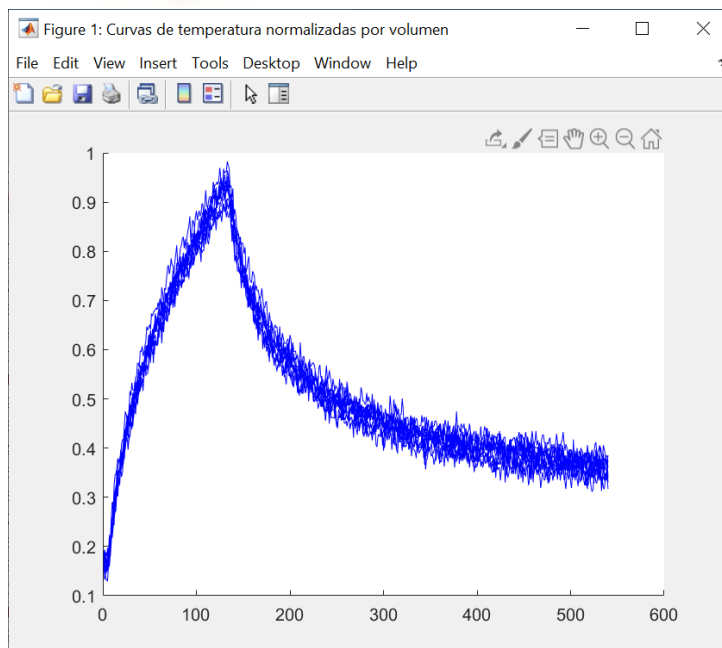


Imagen 4.14: Curvas de temperatura normalizadas por volumen.

Curva media

La curva media es un acondicionamiento de los datos que permite obtener la curva de temperatura media de un conjunto de frames para todos los puntos de la matriz. Para ello genera la curva de temperatura (vector) de cada posición de la matriz o píxel y los suma. Por último, divide el vector resultante de la suma de todos los vectores entre el número total de valores de la matriz. En la imagen 4.15 se puede ver una comparación de todas las curvas de temperatura de un cubo (curvas rojas) frente a la curva media (curva negra) del mismo.

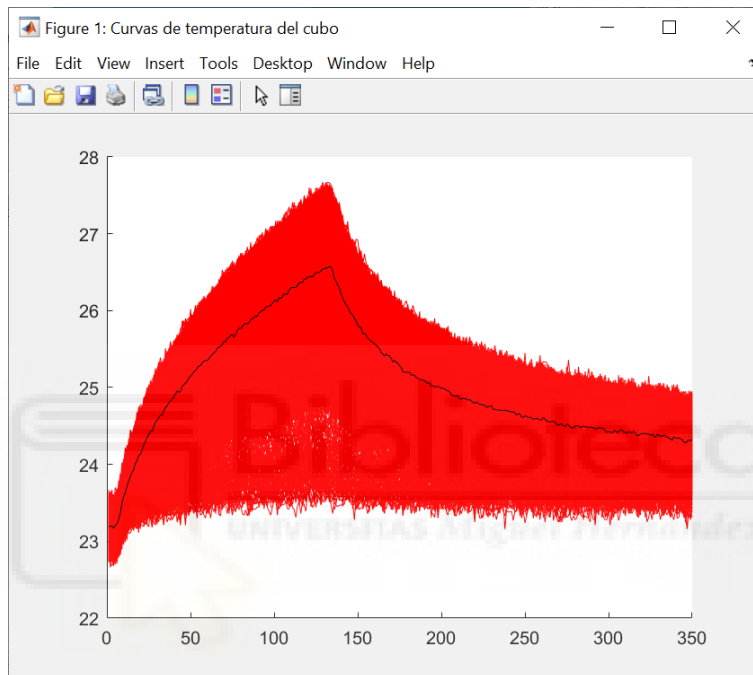


Imagen 4.15: Ejemplo curva media temperatura.

Intervalos temporales de pulso y de caída

El último acondicionamiento del que se va a hablar permite obtener los intervalos de tiempo durante los que transcurren el pulso de calor y la caída de la temperatura o enfriamiento. Como ya se ha explicado en varias ocasiones y como se puede apreciar en algunas de las imágenes expuestas en el trabajo la curva de temperatura asciende con el pulso de calor y en el momento que se apagan los focos comienza a descender lentamente. Gracias a este acondicionamiento se puede saber de manera automática en qué momento exacto comienzan y acaban estas dos fases diferenciadas de los datos.

En la imagen 4.16 se puede apreciar la curva media de temperatura de un cubo (un conjunto de datos) después de haberle aplicado una normalización por píxel y un filtrado de Savitzky–Golay. Al aplicar el acondicionamiento a este cubo se han obtenido los siguientes valores:

- Intervalo pulso de calor: [1 111]
- Intervalo enfriamiento: [126 531]

Para que sea más fácil identificar los puntos se han marcado en la captura de pantalla, se ve cómo coinciden los intervalos obtenidos con las subidas y caídas de la curva de temperatura.

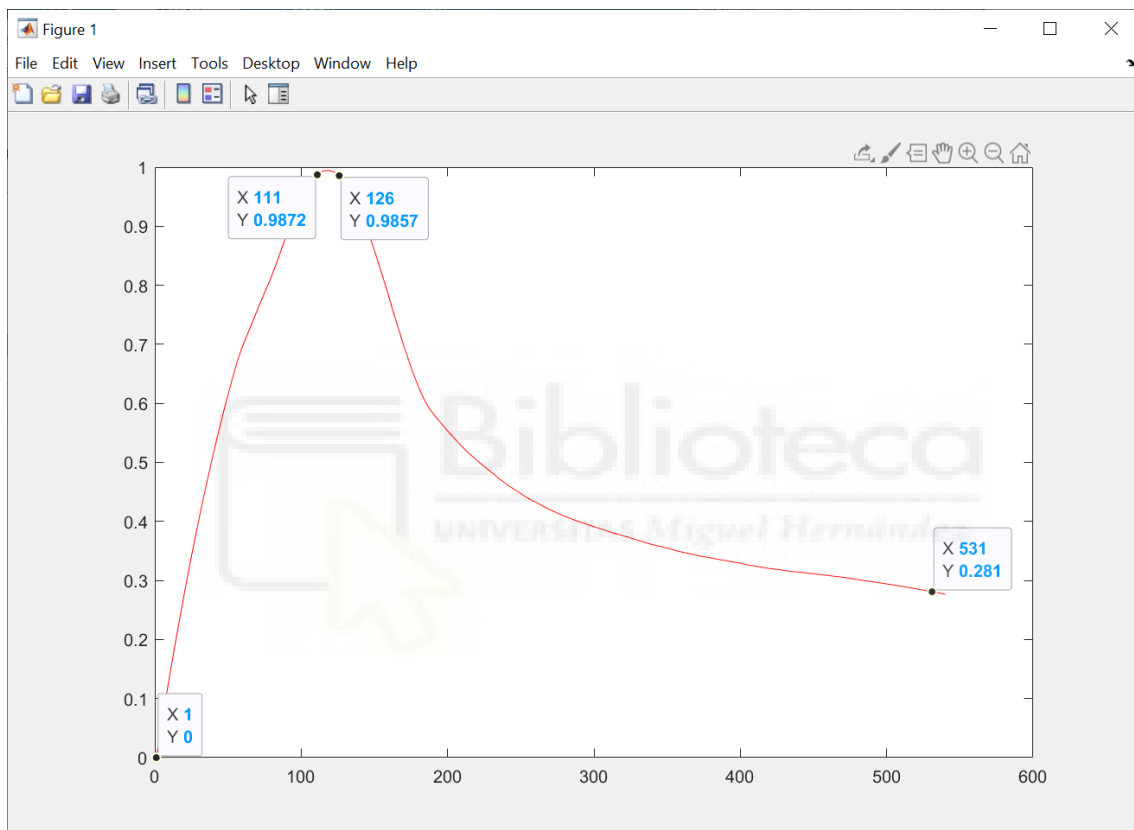


Imagen 4.16: Ejemplo intervalos temporales pulso y caída.

4.2.3.- Análisis

El último objetivo para el que se ha desarrollado la plataforma software es para facilitar la tarea del análisis de los datos. Se pretendía que la herramienta fuese útil para el proyecto en curso y para futuros proyectos por lo que no tenía sentido implementar en esta algoritmos y análisis de datos concretos por lo que se decidió llevar a cabo una aproximación genérica. La plataforma software permite al usuario seleccionar un script de Matlab (extensión .m) que contendrá el algoritmo o el procesamiento necesario para realizar el análisis de los datos, se encarga de pedirle al usuario los parámetros necesarios para su ejecución, lo ejecuta y una vez ha finalizado muestra los resultados que el proceso proporcione. Esta opción se puede encontrar en la pestaña “Análisis” de la aplicación. Una vez el usuario haya seleccionado el proceso a ejecutar e introducido los parámetros deberá pulsar el botón de ejecutar proceso y la plataforma comenzará el análisis (imagen 4.16).

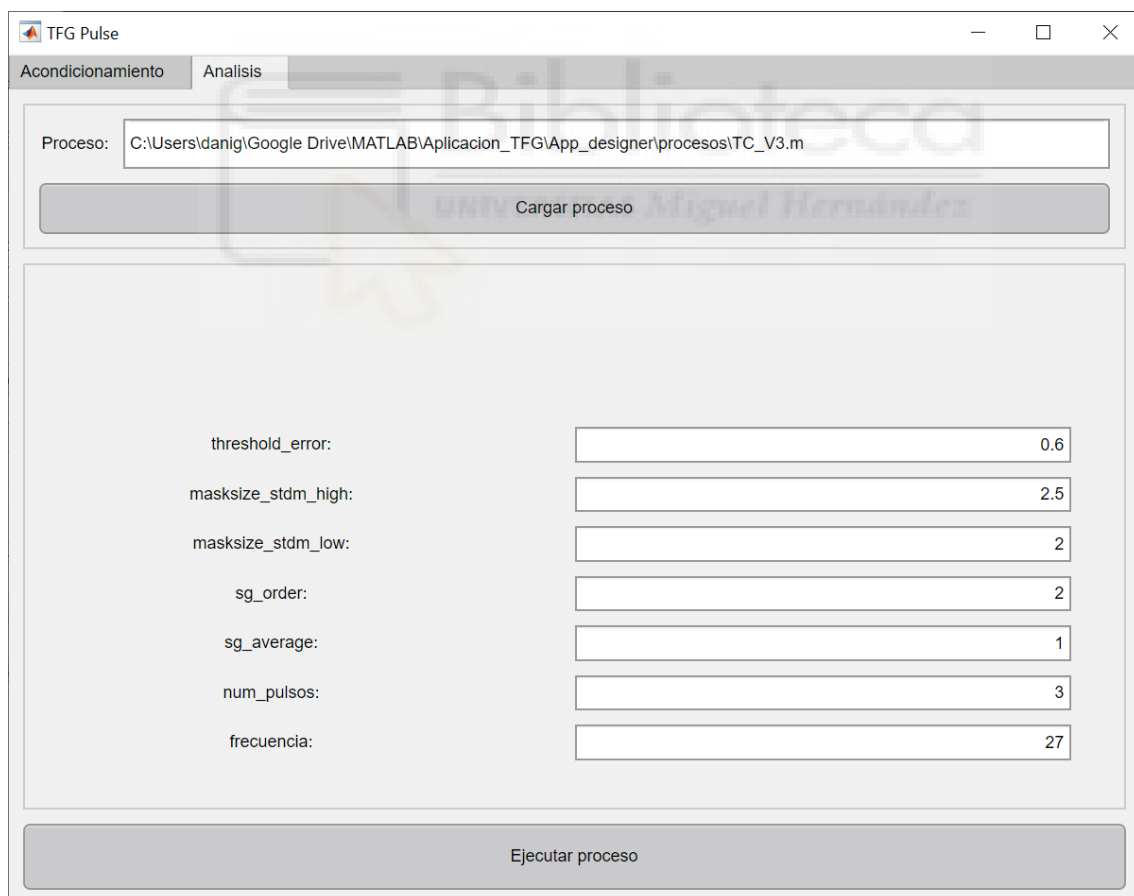


Imagen 4.16: Ejemplo uso pestaña Análisis.

Para que funcione correctamente se ha de almacenar el script en una carpeta llamada “Procesos” que se encuentre en la misma carpeta que el ejecutable de la plataforma. Además del script en esta carpeta también se deberá crear un archivo de configuración (.ini) con el nombre correspondiente a su script. De esta manera la plataforma software sabrá qué parámetros deberá pedirle al usuario, así como los valores permitidos para los mismos. La estructura que debe seguir el archivo de configuración para el correcto funcionamiento de la plataforma es la siguiente:

[nombre_parametro]
min = valor mínimo
max = valor máximo
default = valor por defecto

Se han desarrollado y hecho pruebas con varios algoritmos para analizar los datos termográficos e intentar conseguir el objetivo principal del proyecto, la detección de defectos no visibles por visión computerizada en materiales de baja conductividad térmica. Sin embargo, la mayoría de ellos no proporcionaban resultados satisfactorios y se descartaron para encontrar una mejor opción. A continuación, se explicará de manera detallada cómo se ha desarrollado e implementado el algoritmo de referencia del proyecto y con el que se han obtenido los mejores resultados hasta el momento.

Thermal Contrast

El algoritmo que se ha decidido desarrollar y caracterizar por los buenos resultados que ha proporcionado es el *Thermal Contrast*. Este algoritmo se explicó de manera teórica y general en el capítulo 2, sin embargo, en la práctica se ha adaptado y se ha combinado con otros tratamientos y acondicionamientos de los datos. Los pasos que sigue este algoritmo son los siguientes:

1. Calcula el tamaño del *Sound Area*, el cual será $\frac{1}{2}$ de la dimensión más pequeña del cubo. Si el resultado es par le suma 1 ya que el tamaño del *Sound Area* debe ser impar.
2. Obtiene los intervalos temporales del pulso y de la caída.
3. Utilizando el primer frame de la caída calcula el valor del área media correspondiente a cada pixel del frame para una ventana de convolución del tamaño del *Sound Area*.

4. Para cada frame de la caída térmica le resta en valor absoluto el frame calculado en el paso anterior.
5. Al frame resultante de la resta anterior le realiza la misma operación que en el paso 3 utilizando una ventana de convolución de tamaño 3.
6. Por último, convierte los valores obtenidos en el paso anterior a valores en el rango 0-1 para su posterior procesado.

Este algoritmo combinado con técnicas de filtrado y diferentes acondicionamientos de los datos permite obtener imágenes en las que se pueden apreciar los diferentes defectos de las muestras analizadas. En la imagen 4.17 se puede ver una de las imágenes resultado que proporciona este análisis sin aplicarle ningún filtrado o tratamiento adicional.

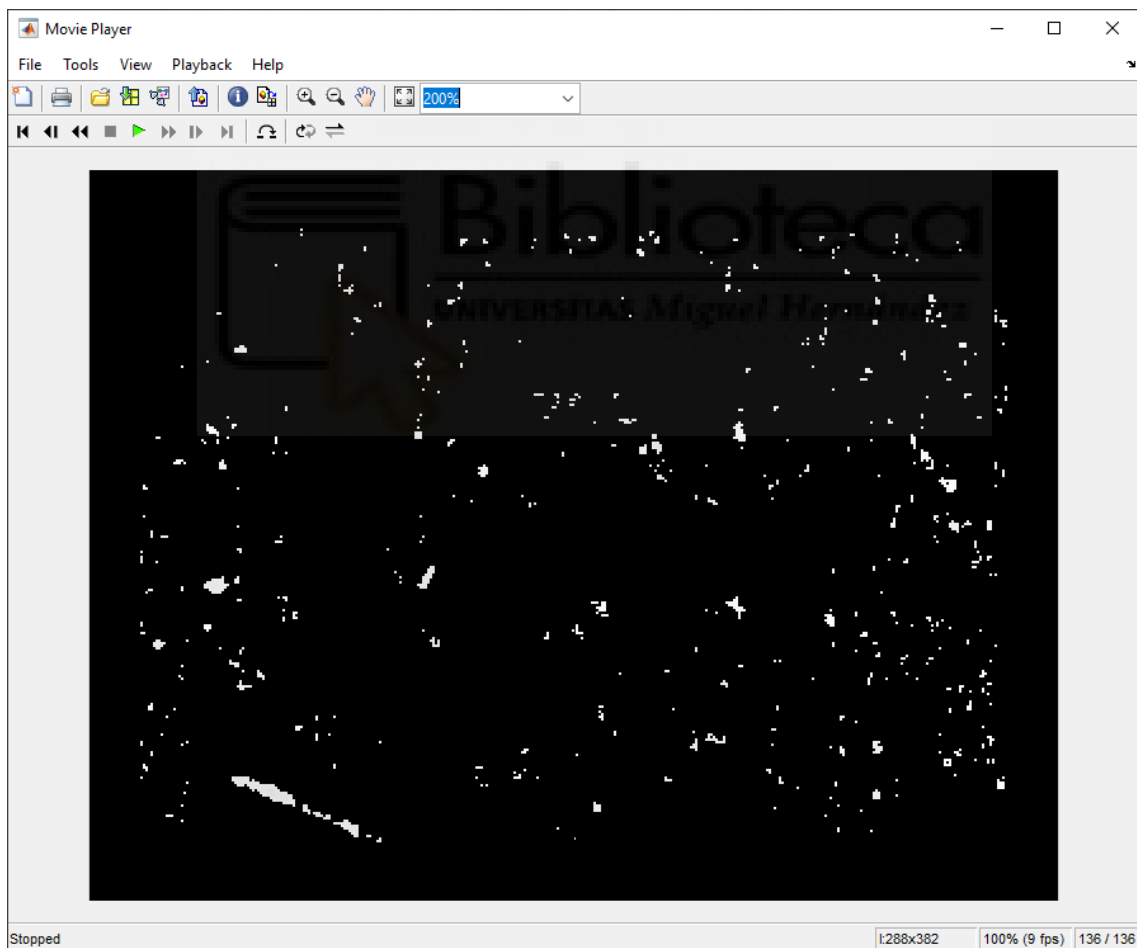


Imagen 4.17: Resultado análisis *Thermal Contrast*.

Capítulo 5 - Ejemplo práctico: detección de imperfecciones en pieles

En este capítulo se va a describir un caso práctico de la detección de imperfecciones en materiales de baja conductividad térmica, concretamente en pieles, haciendo uso de la plataforma software desarrollada. En primer lugar, se realizará una breve descripción de la piel que se va a analizar, posteriormente se explicará los acondicionamientos a los que se

han sometido los datos y por último se realizará el análisis de estos y se expondrán los resultados obtenidos.

5.1.- Descripción de la muestra

Para el desarrollo del proyecto se proporcionó al equipo de investigación una serie de muestras con las que experimentar. En este caso práctico se va a realizar el análisis de la muestra número 2. En las imágenes 5.1, 5.2 y 5.3 se pueden observar diversas imágenes de dicha muestra. En cada una de estas imágenes se ha superpuesto la muestra con una plantilla de acetato en la que se han dibujado los defectos detectados. La plantilla de defectos que aparece en la imagen 5.1 corresponde a los defectos detectados en el anverso de la piel, la que aparece en la imagen 5.2 corresponde a los defectos detectados en el reverso y por último en la imagen 5.3 aparecen las dos plantillas superpuestas una sobre la otra. Cabe mencionar que estas plantillas de defectos han sido realizadas por un trabajador experto que se dedica al análisis visual de este tipo de pieles.

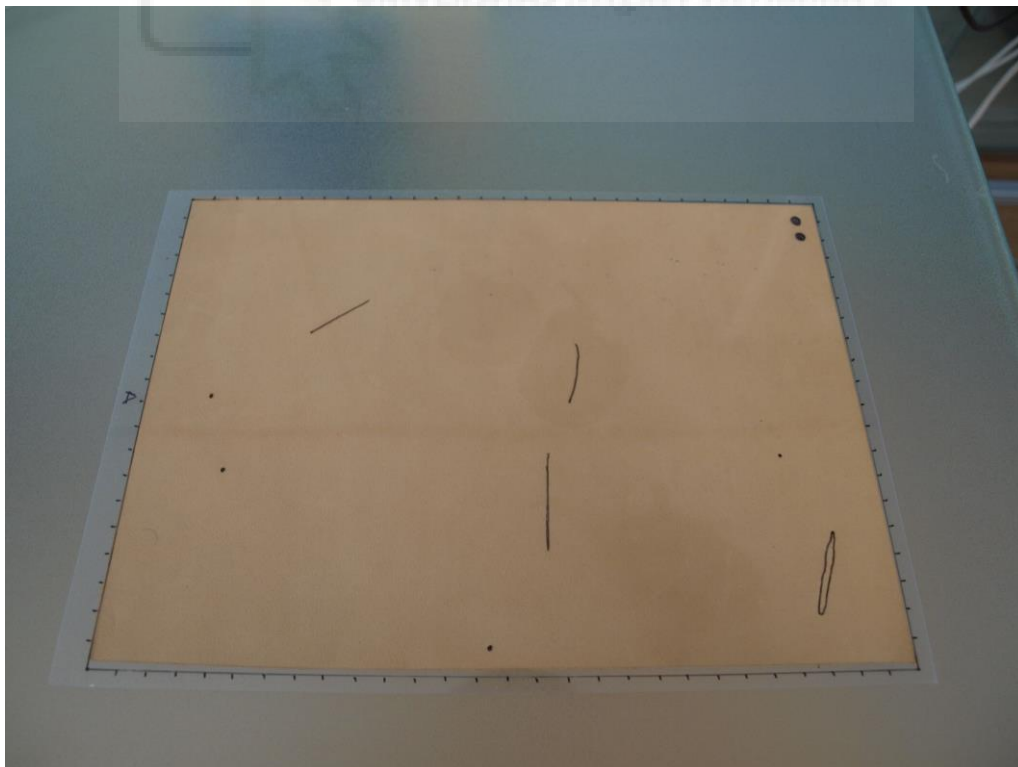


Imagen 5.1: Piel con plantilla de defectos anverso.

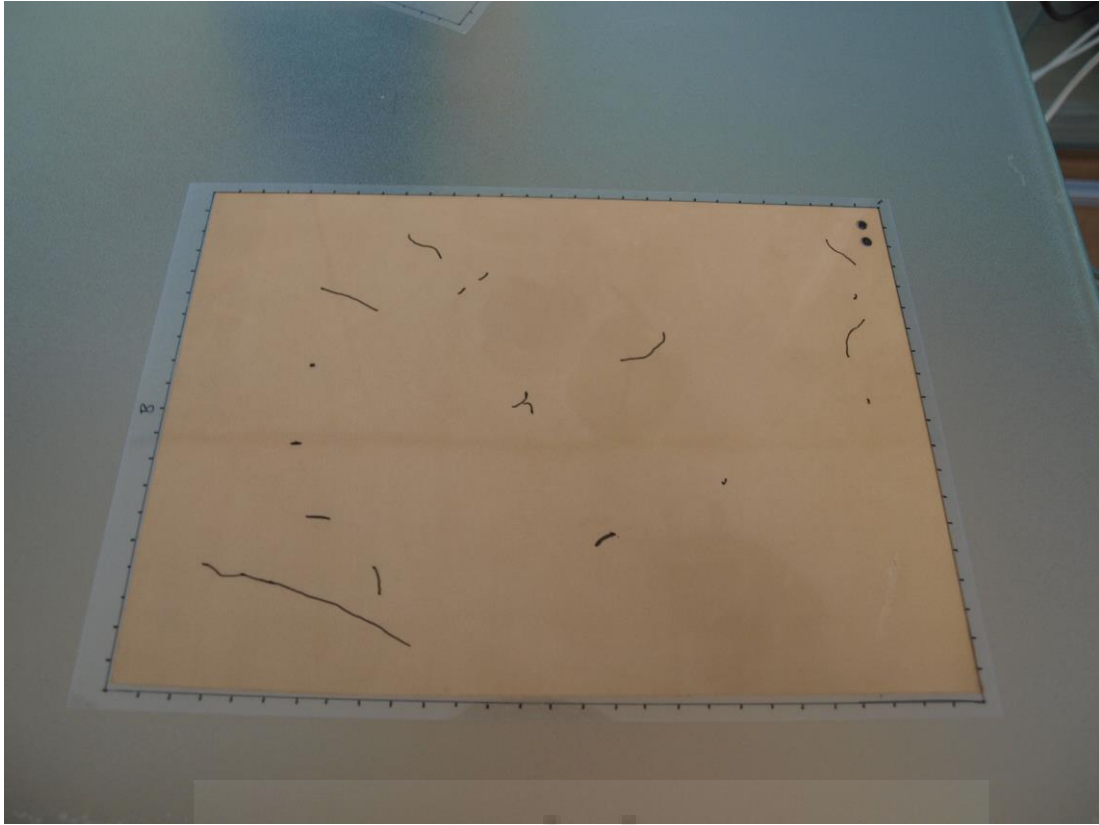


Imagen 5.2: Piel con plantilla de defectos reverso.

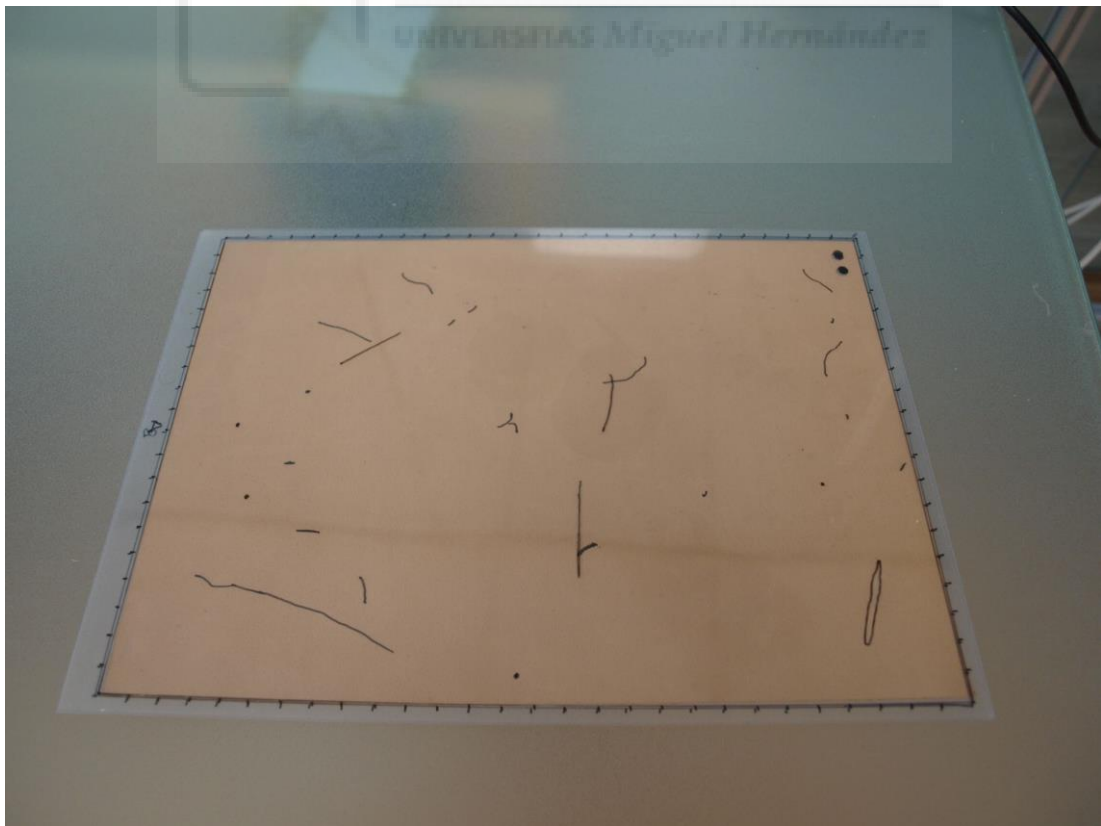


Imagen 5.3: Piel con plantilla de defectos anverso y reverso.

5.2.- Acondicionamiento de los datos

El sistema de adquisición de datos desarrollado, descrito en secciones anteriores, es utilizado para capturar la información termográfica de esta muestra. Una vez se han capturado los datos y son transformados a valores de temperatura legibles se genera, como también se ha descrito, un archivo .csv a partir del cual se va a comenzar el caso práctico. Antes de analizar los datos se someterá a estos a alguno de los acondicionamientos explicados en el capítulo anterior, en la imagen 5.4 se puede observar una imagen del frame 50 de los datos antes de procesar. Matlab permite representar matrices como imágenes en tono de grises donde la temperatura mínima de los datos es el negro y la temperatura máxima el blanco, normalizando, por tanto, los datos.

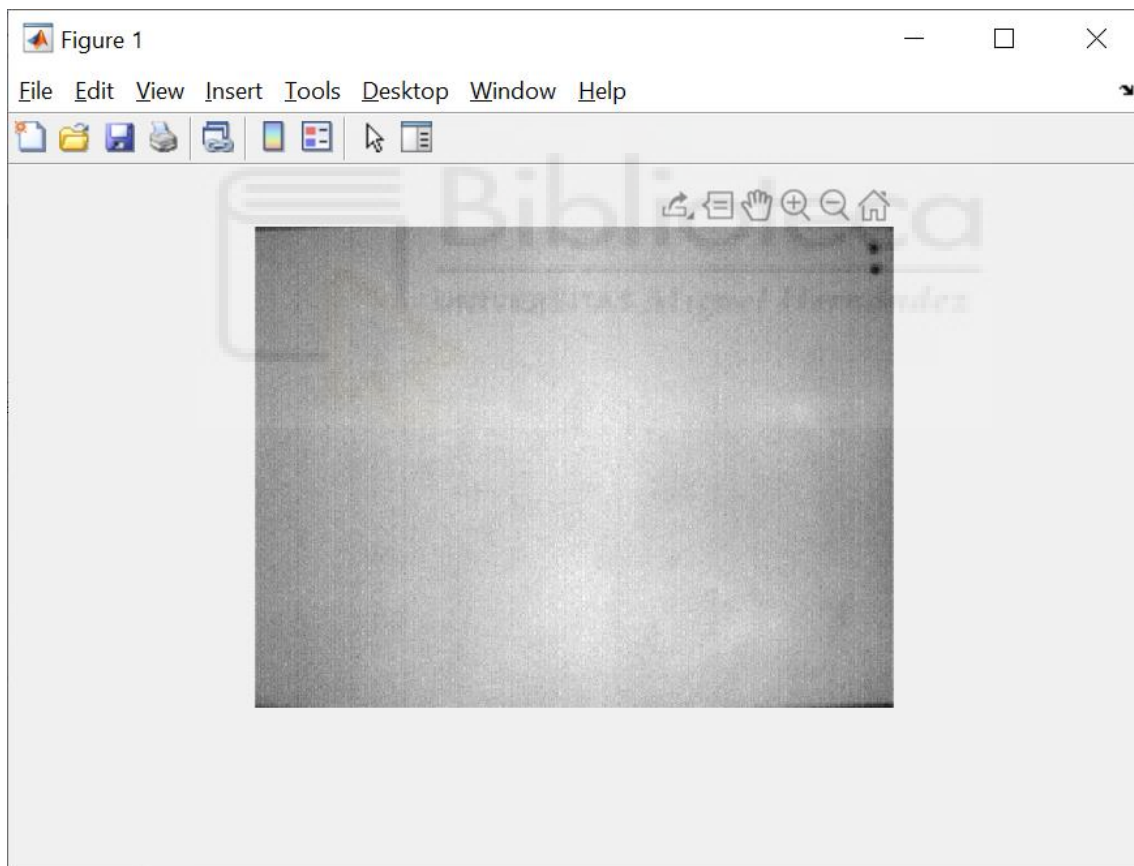


Imagen 5.4: Datos termográficos antes de acondicionar

Para comenzar se realizará un crop espacial a los datos para eliminar los valores de temperatura que no correspondan a la piel. Para ello utilizando la plataforma software se seleccionará el archivo deseado, introduciremos en el campo “Masc Frame:” el frame que se quiera utilizar para generar la máscara binaria y se pulsará el botón de crop espacial

automático. Una vez la plataforma software haya realizado el crop mostrará un mensaje de confirmación con el nuevo nombre del archivo generado (imagen 5.5).

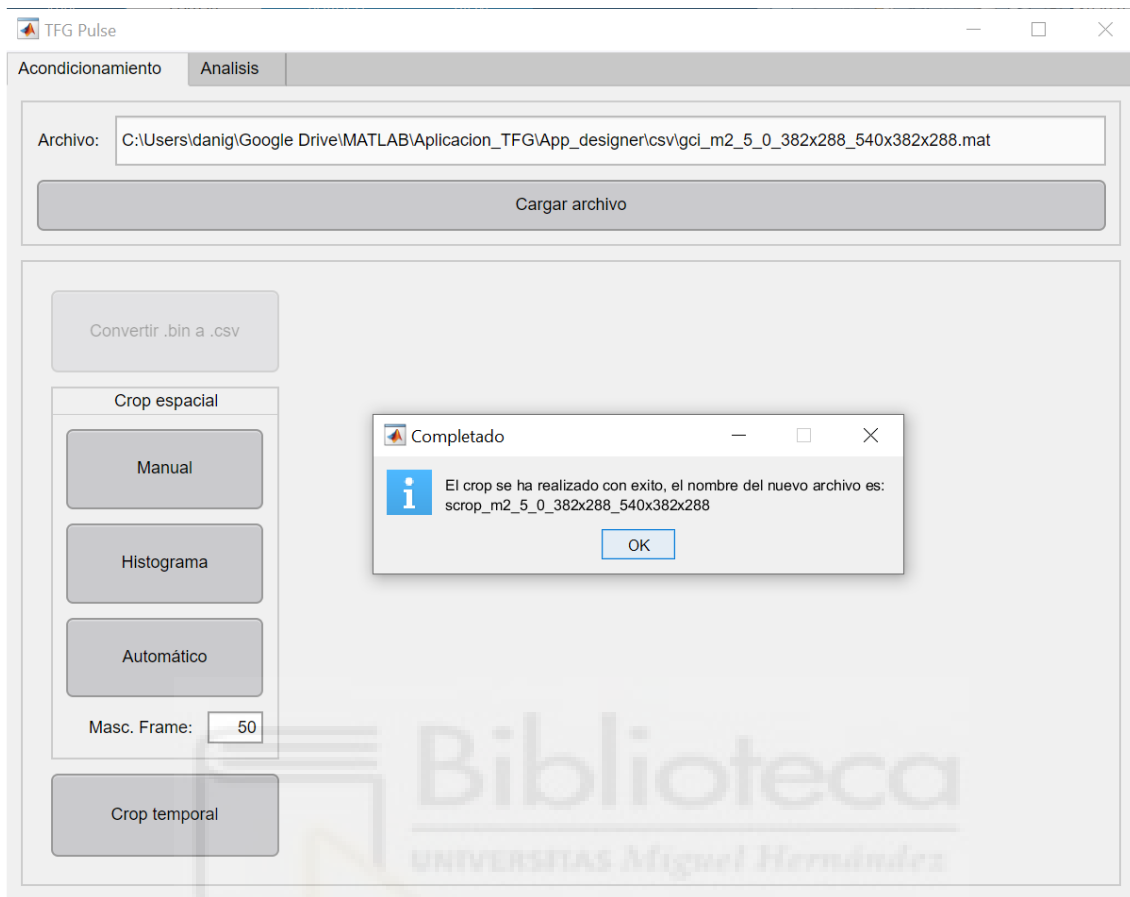


Imagen 5.5: Crop espacial automático.

Si abrimos el nuevo archivo y mostramos el mismo frame que en la imagen 5.4 se puede comprobar como el crop espacial ha eliminado los valores de temperatura que no corresponden a la piel, sustituyendolos por 0. La imagen presenta la apariencia de una imagen binaria, sin embargo, no es así. Como ya se ha comentado Matlab muestra la imagen en tono de grises siendo el máximo valor de la matriz blanco y el valor mínimo negro. Al haber tanta diferencia entre los valores sustituidos por el crop espacial (0) y los valores de temperatura de la piel (23-27) Matlab los dibuja todos en color blanco porque la diferencia entre ellos es mínima (imagen 5.6).

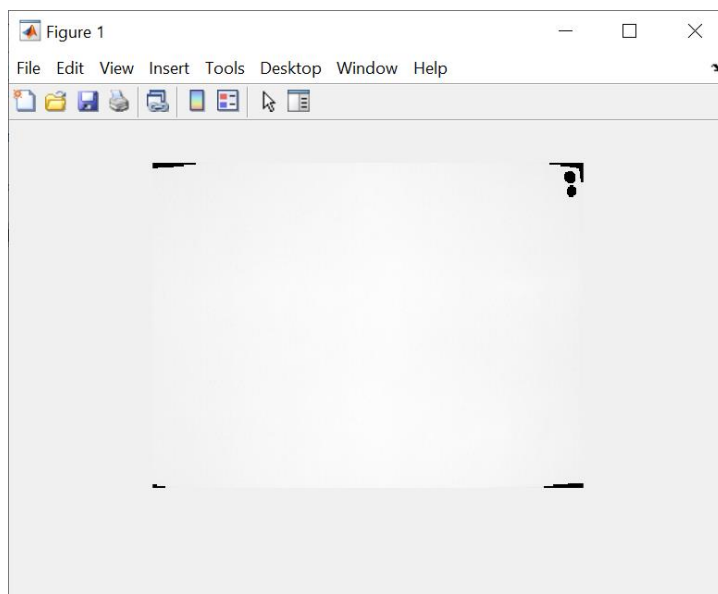


Imagen 5.6: Datos termográficos después de crop espacial.

El siguiente acondicionamiento que se va a realizar a los datos es el crop temporal. Como ya se ha comentado anteriormente en etapas tempranas del proyecto no se sabía con exactitud durante cuánto tiempo se debía grabar la caída de la temperatura para poder detectar los defectos no visibles de las muestras por lo que algunos datos capturados presentan información innecesaria que se puede desechar para acelerar el tiempo de ejecución de los acondicionamientos y análisis a los que sean sometidos. En este caso práctico se van a utilizar dos pulsos de caída térmica. Para poder utilizar el crop temporal y recortar los frames que se desean se ha de conocer la frecuencia a la que la cámara realizó la captura y la duración del pulso de calor. En el caso de los datos que se van a analizar el pulso de calor tiene una duración de 5 segundos y la frecuencia a la que se realizó la captura fue a 27 Hz. Multiplicando estos dos parámetros se sabe que el pulso de calor finalizará en el frame 135, en la imagen 5.7 se puede ver como la curva media de temperatura comienza a descender de manera abrupta cuando llega a ese valor del eje X. Para saber en qué frame se debe realizar el crop temporal únicamente se habrá de sumar 135 al a la duración del pulso multiplicado por el número de pulsos de caída térmica deseados y por la frecuencia. Si por ejemplo se quieren dos pulsos de caída térmica el crop temporal se debe realizar en el frame 405.

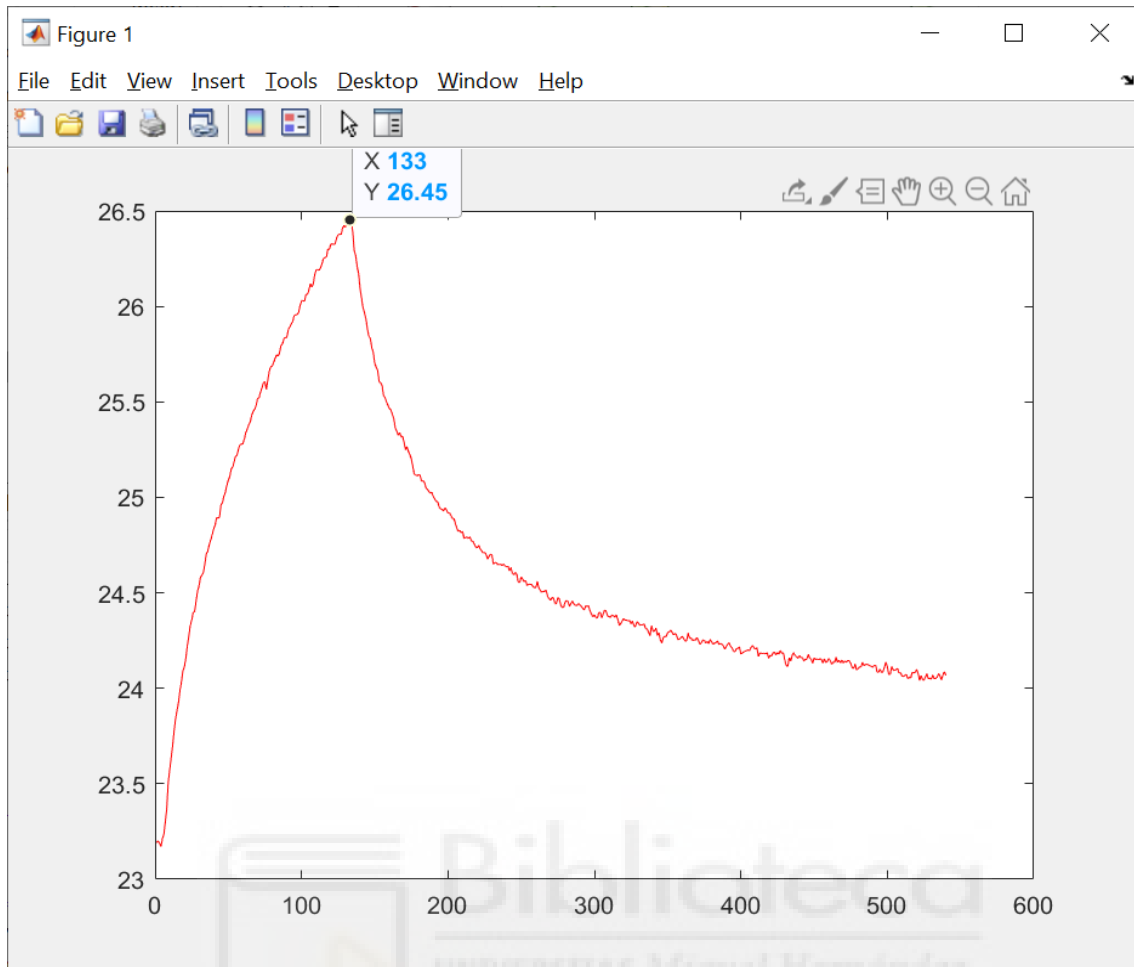


Imagen 5.7: Curva de temperatura media de los datos termográficos

Para realizar el crop se utilizará la plataforma software, después de haber seleccionado el archivo recortado especialmente se deberá pulsar el botón de “Crop Temporal”. Una vez se pulse y se muestre la curva de temperatura en la interfaz se deberá introducir el valor deseado en el umbral superior y pulsar el botón de “Realizar Crop”. Si se pulsa el botón de “Previsualizar” se mostrará la curva de temperatura si se realizara el crop temporal con los valores introducidos (imagen 5.8). Para el caso práctico se van a realizar dos crops temporales diferentes, el primero de ellos se recortará de manera que únicamente tenga un pulso de caída térmica y el segundo se recortará de manera que contenga dos pulsos de caída térmica.

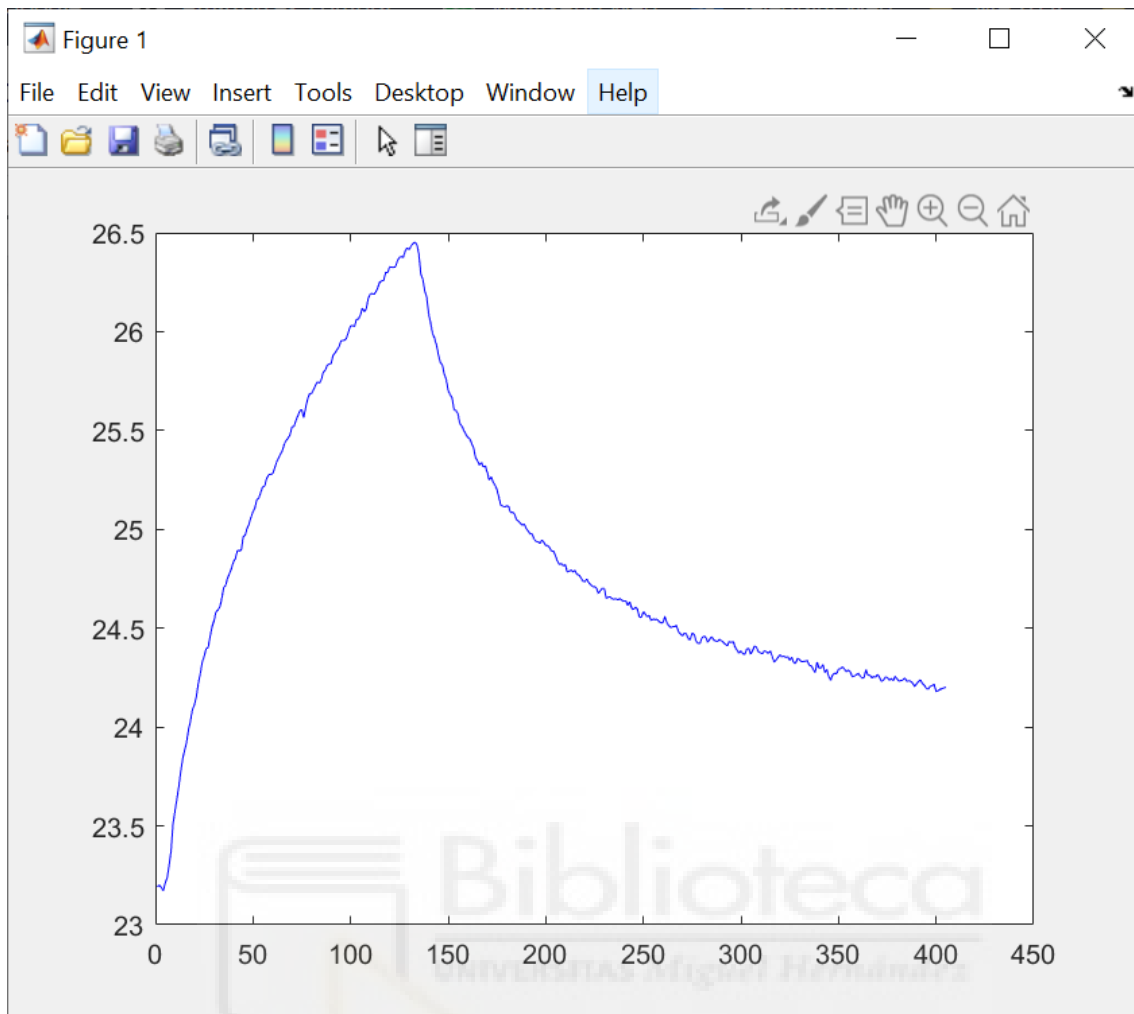


Imagen 5.8: Previsualización crop temporal curva de temperatura media

Una vez realizado el crop temporal se aplicará un filtro de Savitzky–Golay a los datos termográficos para suavizarlos. En la imagen 5.9 se puede ver la comparación de la curva de temperatura de uno de los píxeles centrales filtrado (curva de color azul) y sin filtrar (curva de color rojo). Por último, se aplicará una normalización por píxel a todos los datos del cubo.

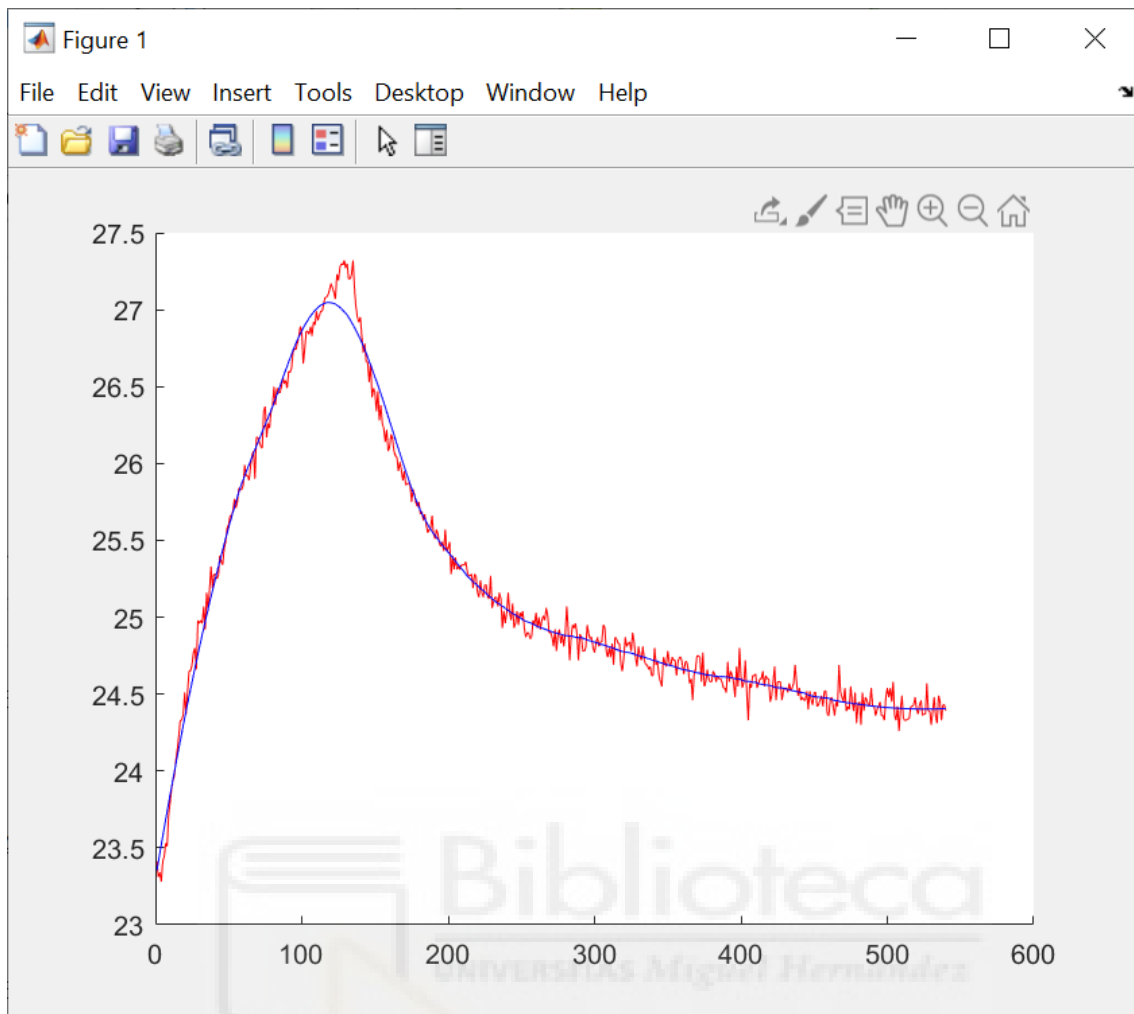


Imagen 5.9: Comparación curva temperatura píxel central filtrado-sin filtrar

5.3.- Análisis de los datos

Una vez se ha sometido a los datos a todos los acondicionamientos necesarios se procederá con el análisis de estos para la detección de los defectos. Para ello se utilizará la plataforma software desarrollada, se pulsará el botón de análisis y se seleccionará el proceso “TC_V3”. Una vez se seleccione el proceso la plataforma mostrará por pantalla los parámetros que necesita el script. Cuando se hayan introducido los parámetros que se deseen se pulsará el botón “Ejecutar proceso” y comenzará el análisis.

Una vez se ha calculado el contraste térmico de todos los frames de los datos el proceso genera un vídeo reproduciendo todos los frames como imágenes uno detrás de otro. En la imagen 5.10 se puede ver una captura de pantalla del frame número 136 de la caída térmica

tras haber calculado su contraste térmico. En esta imagen se puede llegar a apreciar algunos de los defectos marcados en las plantillas mostradas en las imágenes 5.1, 5.2 y 5.3, sin embargo, presenta mucho ruido que se puede confundir con “defectos” que en realidad no lo son. Para poder obtener unos mejores resultados es necesario filtrar y aplicar algunos tratamientos al contraste térmico calculado.

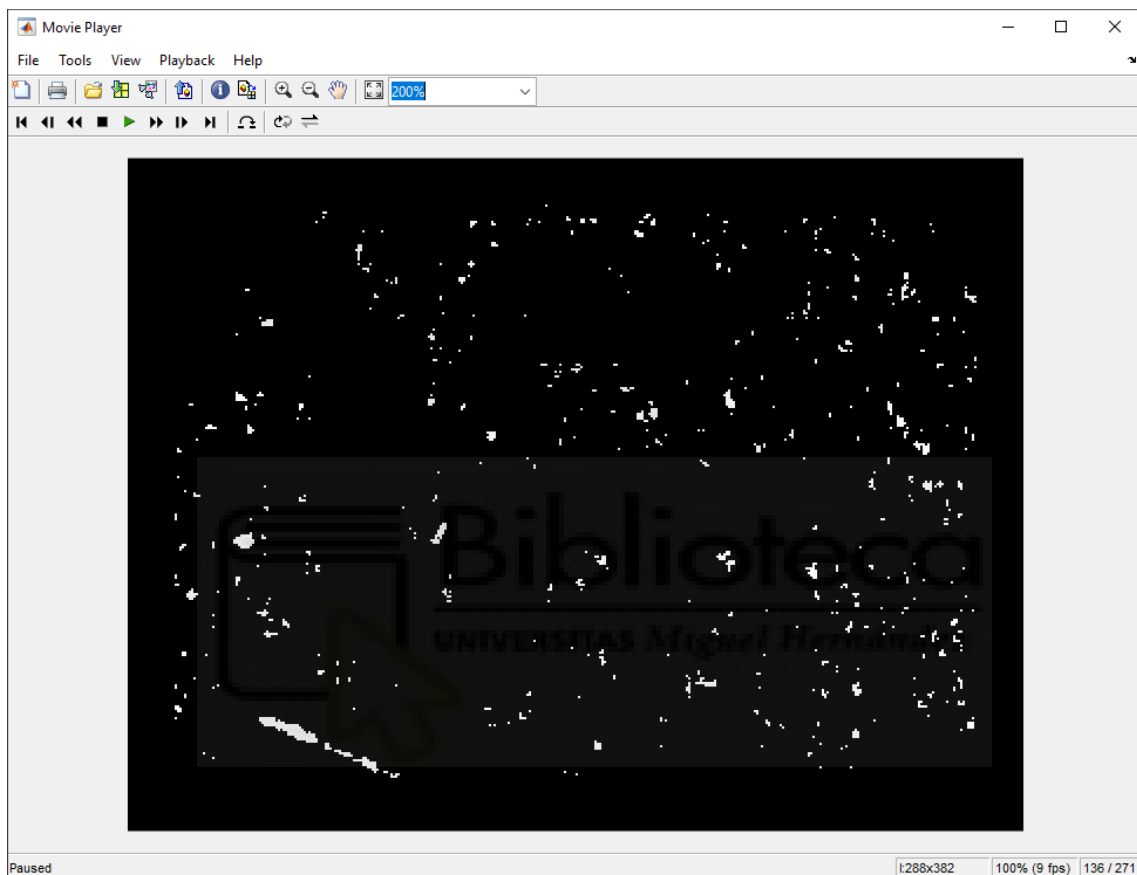


Imagen 5.11: Último frame datos tras calcular contraste térmico (2 pulsos de caída).

Según las características (forma, profundidad, tamaño) del defecto estos se podrán detectar tratando y filtrando los datos de una manera u otra. Por ello durante el cálculo del contraste térmico se generan dos cubos con las mismas dimensiones que los datos procesados y se les aplica un filtro de paso bajo y un filtro de paso alto respectivamente. En cada uno de los cubos se podrán discriminar defectos diferentes. El vídeo generado al que pertenece el frame de la imagen 5.10 es una suma de los dos cubos filtrados.

A continuación, a cada cubo (*Low Pass Filtered* y *High Pass Filtered*) se le realiza la suma ponderada por la distancia del frame al inicio de la caída y se les aplica un filtro de media con una máscara de tamaño 3x3. En las imágenes 5.12 y 5.13 se puede observar la superficie calculada a partir del cubo *Low Pass Filtered*.

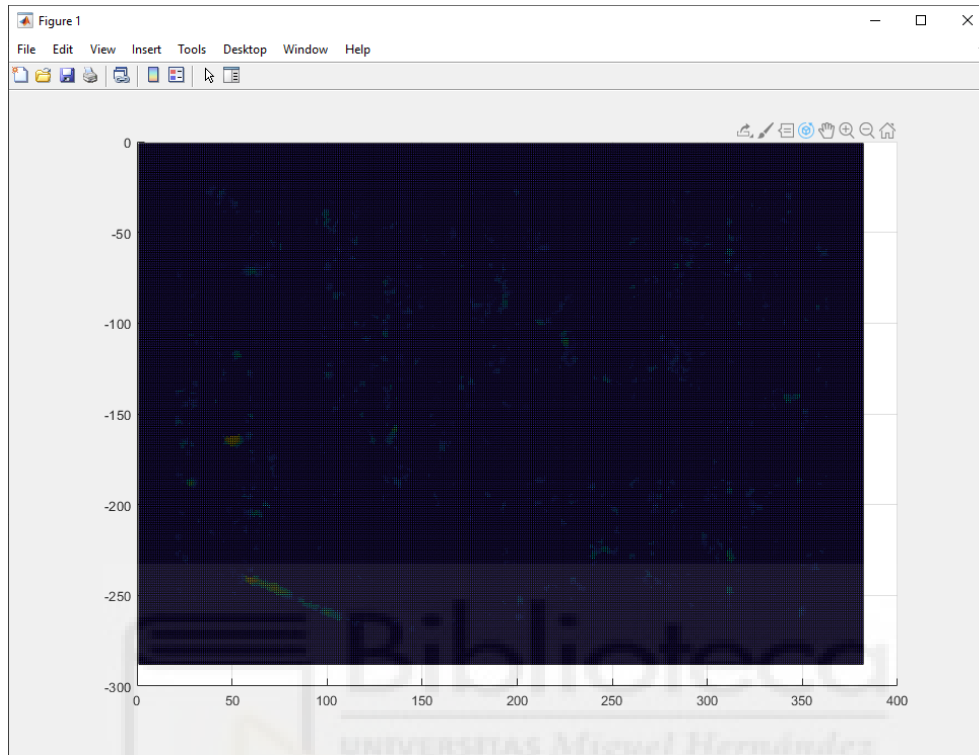


Imagen 5.12: Superficie LPF (1)

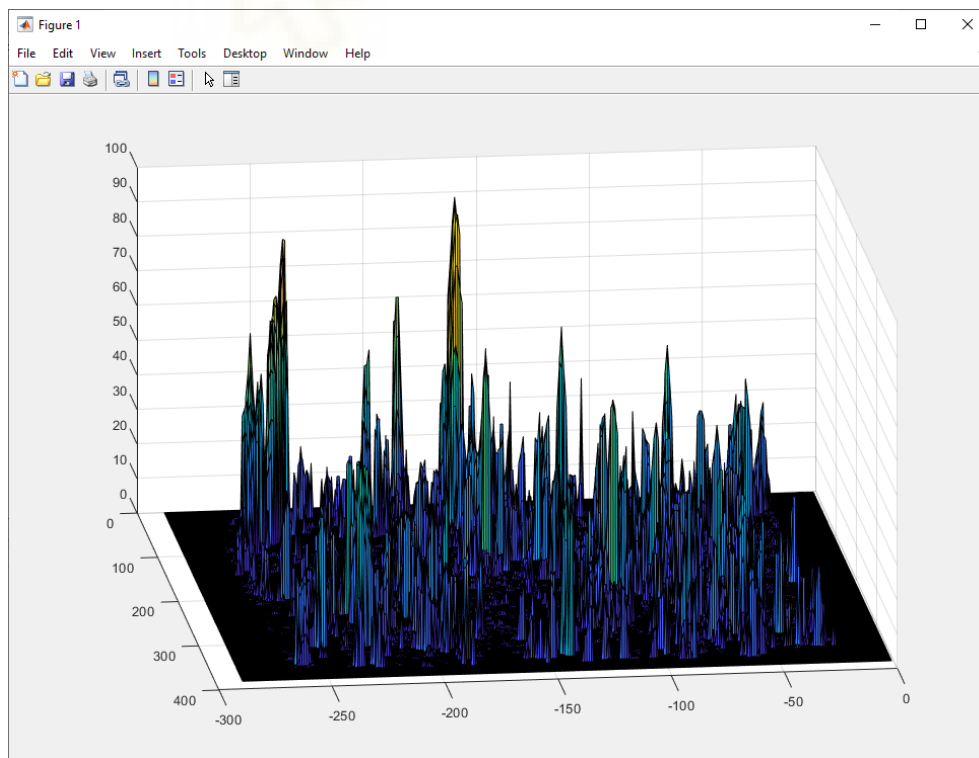


Imagen 5.13: Superficie LFP (2)

En este caso se ha optado por representar los frames como superficies ya que de esta manera se pueden ver las diferencias térmicas entre los defectos y las partes de piel libres de ellos de una manera visual. En las imágenes 5.14 y 5.15 se puede observar la superficie calculada a partir del cubo *High Pass Filtered*.

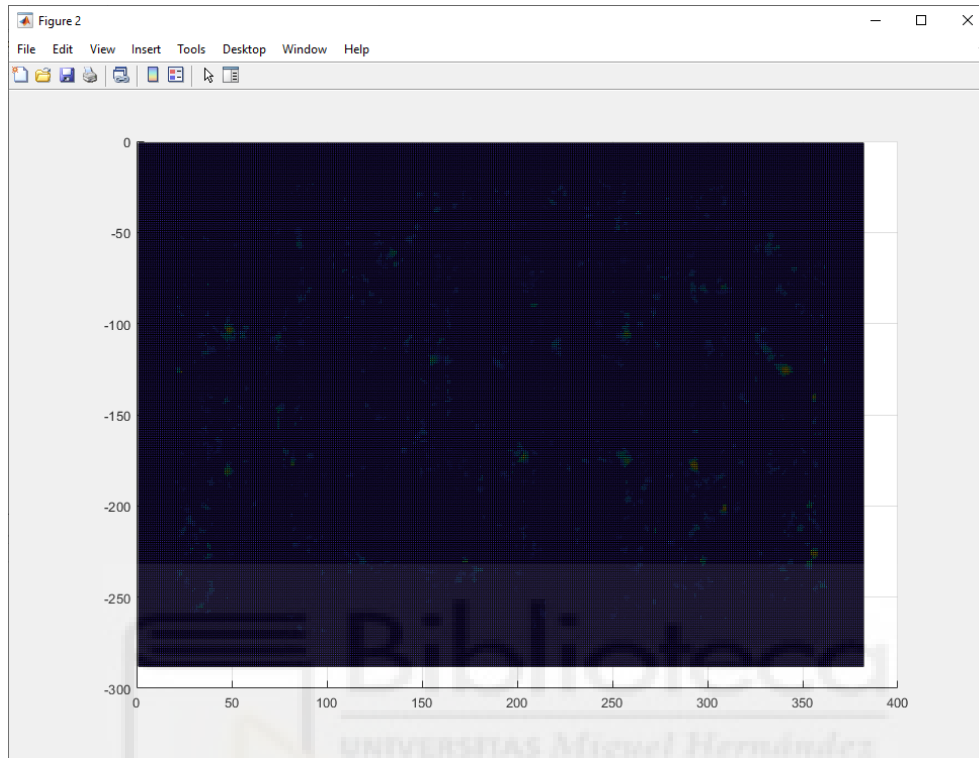


Imagen 5.14: Superficie HPF (1)

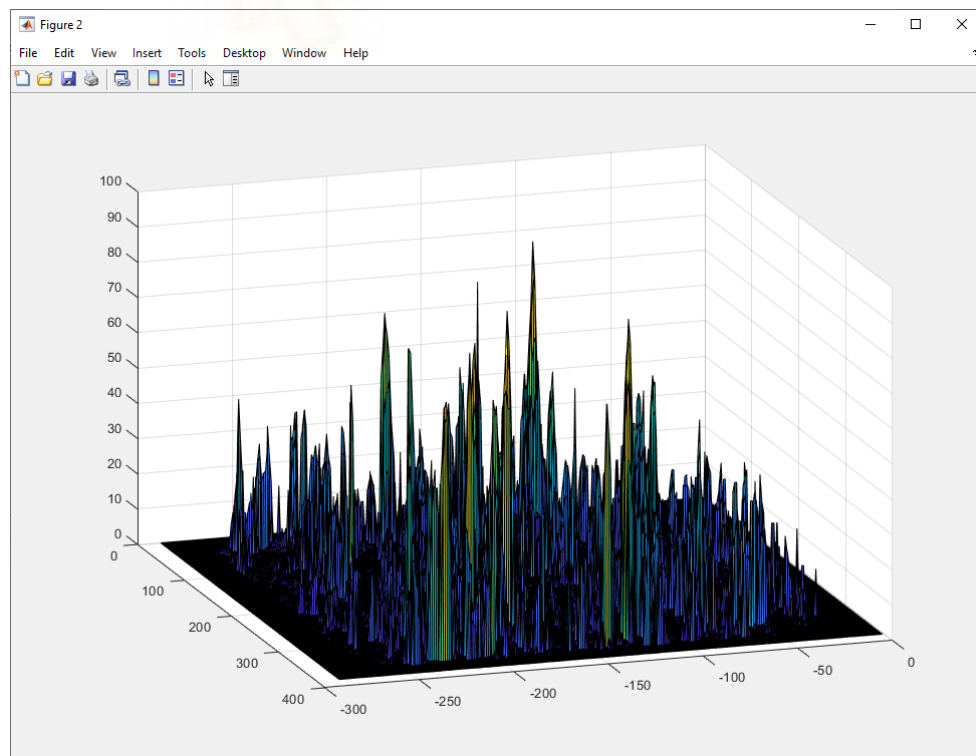


Imagen 5.15: Superficie HPF (2)

En estas superficies se puede ver como los defectos destacan por encima del resto, sin embargo, todavía existe mucho ruido que puede provocar confusiones al unir las dos superficies y haga que no se puedan diferenciar en una sola imagen los diferentes tipos de defectos correctamente. Para eliminar el ruido se le aplicará a cada cubo un umbral de corte (en porcentaje). Únicamente se mantendrán los valores que se encuentren por encima del umbral. Una vez se han eliminado los valores inferiores al umbral se binariza la imagen, se pone a 1 todo lo que sea distinto de cero y se calcula la unión de ambos cubos. Por último, se le aplica al cubo final generado un filtro de gauss y se obtendrá el resultado mostrado en la imagen 5.16.

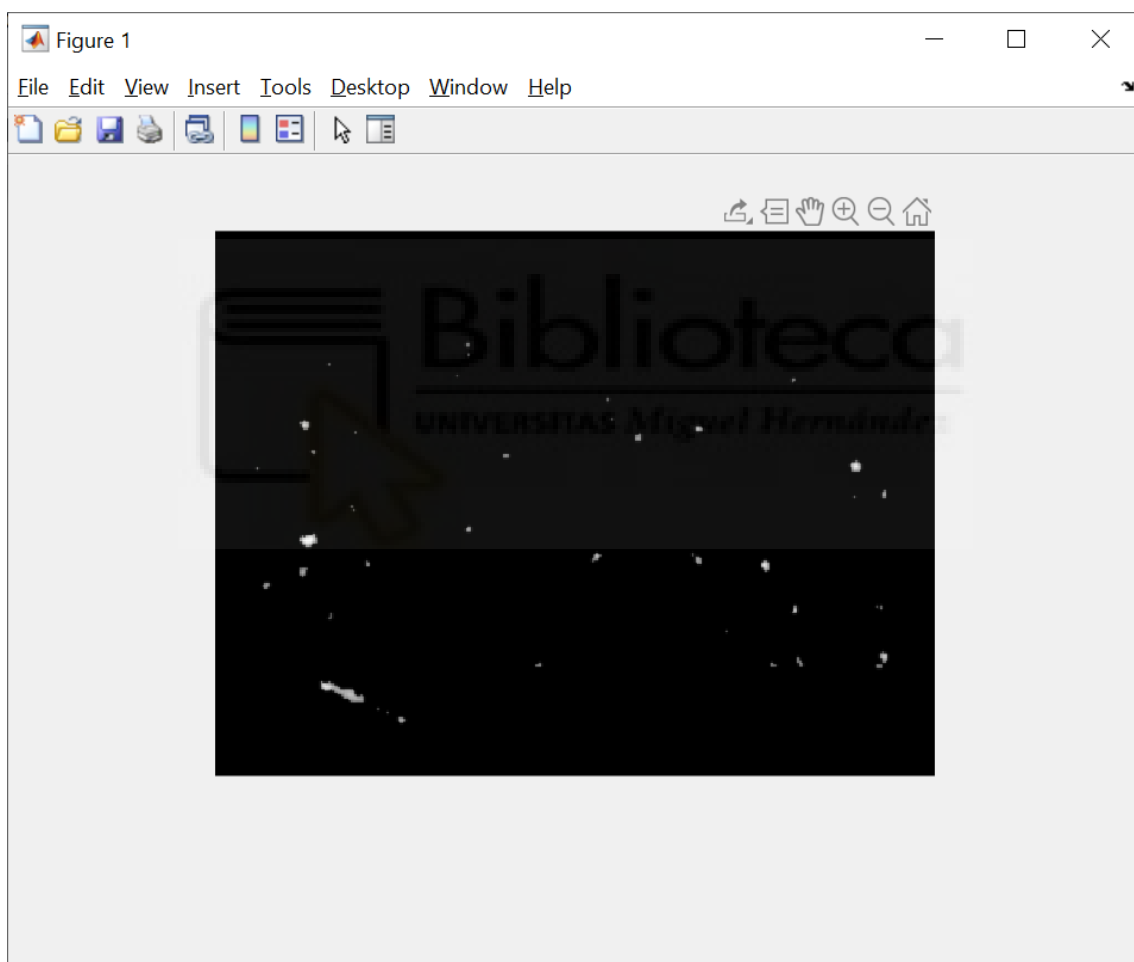


Imagen 5.16: Imagen final binarizada

Algunos defectos son claramente reconocibles como la veta alargada de abajo a la izquierda, sin embargo, otros no terminan de distinguirse o no muestran su forma completa. Esta plataforma está siendo una herramienta imprescindible para la mejora del algoritmo de detección que se ha mostrado, así como para el desarrollo de nuevos algoritmos, pero este

aspecto no forma parte del proyecto, entre otras cosas por su gran envergadura. Por último, la plataforma está completamente desarrollada y en producción, pero no está cerrada, ya que es posible que se necesiten nuevos procesos de usos habituales que habrá que ir añadiendo.



Capítulo 6 - Bibliografía

[1] Maldague, X. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*; Wiley: New York, NY, USA, 2001.

[2] Ibarra-Castanedo, Clemente & Genest, Marc & Piau, Jean-Marc & Guibert, Stéphane & Bendada, Abdelhakim & Maldague, Xavier. (2007). CHAPTER X ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUES FOR THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS. 10.1142/9789812770943_0014.

[3] Modest, M.F. *Radiative Heat Transfer*; Academic Press: Waltham, MA, USA, 2013.

[4] Vollmer, M.; Möllmann, K.P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*; Wiley: Weinheim, Germany, 2011.

[5] Gade, R.; Moeslund, T.B. Thermal cameras and applications: A survey. *Mach. Vision Appl.* 2014, 25, 245–262.

- [6] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. (2014). Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, *14*(7), 12305–12348.
- [7] Meola, C. Infrared Thermography: Recent Advances and Future Trends; *Bentham Science: New York, NY, USA*, 2012.
- [8] Stewart, M.; Webster, J.; Schaefer, A.; Cook, N.; Scott, S. Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare. *Anim. Welf.* 2005, *14*, 319–325.
- [9] Amalu, W.C. *A Review of Breast Thermography*. Disponible online: <http://www.iact-org.org/downloads/a-review-of-bc.pdf>
- [10] Ring, F. *Thermal imaging today and its relevance to diabetes*. *J. Diabetes Sci. Technol.* 2010, *4*, 857–862.
- [11] Nguyen, A.V.; Cohen, N.J.; Lipman, H.; Brown, C.M.; Molinari, N.A.; Jackson, W.L.; Kirking, H.; Szymanowski, P.; Wilson, T.W.; Salhi, B.A.; *et al.* *Comparison of 3 infrared thermal detection systems and self-report for mass fever screening*. *Emerg. Infect. Dis.* 2010, *16*, 1710–1717.
- [12] Vargas, J.; Brioschi, M.; Dias, F.; Parolin, M.; Mulinari-Brenner, F.; Ordonez, J.; Colman, D. Normalized methodology for medical infrared imaging. *Infrared Phys. Technol.* 2009, *52*, 42–47.
- [13] Fikackova, H.; Ekberg, E. Can infrared thermography be a diagnostic tool for arthralgia of the temporomandibular joint? *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology* 2004, *98*, 643–650.
- [14] Manginas, A.; Andrianides, E.; Leontiadis, V.; Sfyarakis, P.; Maounis, T.; Degiannis, D.; Alivizatos, P.A.; Cokkinos, D.V. Right ventricular endocardial thermography in transplanted and coronary artery disease patients: First human application. *J. Invasive Cardiol.* 2010, *22*, 400–404.

- [15] Bagavathiappan, S.; Lahiri, B.; Saravanan, T.; Philip, J.; Jayakumar, T. Infrared thermography for condition monitoring—A review. *Infrared Phys. Technol.* 2013, *60*, 35–55.
- [16] Luong, M.P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mech. Mater.* 1998, *28*, 155–163.
- [17] La Rosa, G.; Risitano, A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *Int. J. Fatigue* 2000, *22*, 65–73.
- [18] Grinzato, E.; Vavilov, V.; Kauppinen, T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy Build.* 1998, *29*, 1–9.
- [19] Badulescu, C.; Grèdiac, M.; Haddadi, H.; Mathias, J.D.; Balandraud, X.; Tran, H.S. Applying the grid method and infrared thermography to investigate plastic deformation in aluminium multicrystal. *Mech. Mater.* 2011, *43*, 36–53.
- [20] Pastor, M.; Balandraud, X.; Grèdiac, M.; Robert, J. Applying infrared thermography to study the heating of 2024-T3 aluminium specimens under fatigue loading. *Infrared Phys. Technol.* 2008, *51*, 505–515.
- [21] Meola, C.; Carlomagno, G.M.; Squillace, A.; Giorleo, G. The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints. *Infrared Phys. Technol.* 2004, *46*, 93–99.
- [22] Balaras, C.; Argiriou, A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy Build.* 2002, *34*, 171–183.
- [23] Bomberg, M.; Shirliffe, C. Influence of moisture and moisture gradients on heat transfer through porous building materials. *ASTM STP* 1978, *660*, 211–233.
- [24] Kiiskinen, H.T.; Kukkonen, H.K.; Pakarinen, P.I.; Laine, A.J. Infrared thermography examination of paper structure. *Tappi J.* 1997, *80*, 159–162.

- [25] Sugiura, R.; Noguchi, N.; Ishii, K. Correction of low-altitude thermal images applied to estimating soil water status. *Biosyst. Eng.* 2007, *96*, 301–313.
- [26] Vavilov, V.P.; Nesteruk, D.A. Detecting water in aviation honeycomb structures: The quantitative approach. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2004, *1*, 173–184.
- [27] Wiecek, B. Review on thermal image processing for passive and active thermography. Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, Shanghai, China, 1–4 September 2005; pp. 686–689.
- [28] Ibarra-Castanedo, C.; Genest, M.; Piau, J.M.; Guibert, S.; Bendada, A.; Maldague, X.P.; Chen, C. Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization. In *Active Infrared Thermography Techniques for the Non-Destructive Testing of Materials*; Chen, C.H., Ed.; World Scientific: Singapore, Singapore, 2007; pp. 325–348
- [29] Hung, Y.; Chen, Y.; Ng, S.; Liu, L.; Huang, Y.; Luk, B.; Ip, R.; Wu, C.; Chung, P. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 2009, *64*, 73–112.
- [30] Ibarra-Castanedo, C.; Galmiche, F.; Darabi, A.; Pilla, M.; Klein, M.; Ziadi, A.; Vallerand, S.; Pelletier, J.F.; Maldague, X.P. Thermographic nondestructive evaluation: Overview of recent progress. *Proc. SPIE 5073* 2003.
- [31] Usamentiaga, R.; García, D.F.; Molleda, J. Real-time adaptive method for noise filtering of a stream of thermographic line scans based on spatial overlapping and edge detection. *J. Electron. Imaging* 2008, *17*, 033012.
- [32] Giorleo G. and Meola C. “Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates”, *NDT&E International*, 35:287–292, 2002.
- [33] Nordal P. E. and Kanstand S. O. “Photothermal radiometry,” *Physica Scripta*, 20:659-662, 1979.

[34] Busse G. "Techniques of infrared thermography: Part 4. Lockin thermography," in Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing, Volume 3, X. Maldague technical ed., P. O. Moore ed., 3rd edition, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001, 718 p.

[35] Wu D. and Busse G. "Lock-in Thermography for NonDestructive Evaluation of Materials," *Rev. Gén. Therm.*, 37:693-703, 1998.

[36] Vavilov, V. P. and Burleigh, D. D. (2015). Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing, *NDT & E International*, Vol. 73, pp. 28-52. 10.1016/j.ndteint.2015.03.003.

[37] Darryl P. Almond, Stefano L. Angioni, Simon G. Pickering, Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation, *NDT & E International*, Volume 87, 2017, Pages 7-14, ISSN 0963-8695.

[38] Valivov VP. Infrared NDT of bonded structures. *Brit J Ndt* 1981:175–83.

[39] Vavilov VP, Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal nondestructive testing of bonded structures. *Research Techniques in Nondestructive testing*, 5. London: Academic Press; 1982. p. 239–79.

[40] Almond DP, Delpech P, Peng Wang, Behesty M. Quantitative determination of impact damage and other defects in carbon fiber composites by transient thermography. *Proc SPIE* 1996;2944:256–64.

[41] Thermal Wave Imaging, Inc. Ferndale MI, USA.

[42] C-Checkir, Automation technology GmbH, Bad Oldesloe, Germany.

[43] Simon Pickering, Darryl Almond, Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques, *NDT & E International*, Volume 41, Issue 7, 2008, Pages 501-509, ISSN 0963-8695.

- [44] Maldague X. P. V. (2001). Theory and practice of infrared technology of non-destructive testing. John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-18190-0.
- [45] E. D'Accardi, D. Palumbo, R. Tamborrino, U. Galietti, Quantitative analysis of thermographic data through different algorithms, *Procedia Structural Integrity*, Volume 8, 2018, Pages 354-367, ISSN 2452-3216.
- [46] Balageas D.L., Roche J.M., Leroy F.H., Gorbach A.M. (2013). THE THERMOGRAPHIC SIGNAL RECONSTRUCTION METHOD: A POWERFUL TOOL FOR THE ENHANCEMENT OF TRANSIENT THERMOGRAPHIC IMAGES. ICB Seminar 2013 on "Advances of IR-thermal imaging in medicine" Warsaw (Poland)
- [47] Benitez H., Ibarra-Castanedo C., Loaiza H., Caicedo E., Bendada A., Maldague X. (2006). Defect Quantification with Thermographic Signal Reconstruction and Artificial Neural Networks. . *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 10.21611/2006.010.
- [48] Balageas D. L., Chapuis B., Deban G., and Passilly F. (2010). Improvement of the detection of defects by pulse thermography thanks to the TSR approach in the case of a smart composite repair patch. 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- [49] Palumbo D., De Finis R., Demelio G.P., Galietti U. (2016). A new rapid thermographic method to assess the fatigue limit in GFRP composites. *Composite Part B*, 103, 60-67.