



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA AUTOMÁTICO
BASADO EN VISIÓN POR
COMPUTADOR PARA LA
DETECCIÓN DE DEFECTOS SOBRE
PISTAS DE SOLDADURA**

Alumno: Carlos Suca Alguacil

Tutor: Prof. D. Diego Manuel Martínez Gila
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Junio, 2017



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática

Don Diego Manuel Martínez Gila y Don Pablo Cano Marchal, tutor del Proyecto Fin de Grado titulado: Diseño e implementación de un sistema automático basado en visión por computador para la detección de defectos sobre pistas de soldadura, que presenta Carlos Suca Alguacil, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2017

El alumno:

Carlos Suca Alguacil

Los tutores:

Diego Manuel Martínez Gila

Pablo Cano Marchal

Agradecimientos

A toda mi familia, por su apoyo y paciencia en cada momento, sin su ayuda nada de esto sería posible.

A mis amigos de toda la vida, tantos momentos compartidos han influido positivamente en mi vida.

A todos mis compañeros de universidad, por la ayuda continua para superar las dificultades de mi carrera y sobre todo por resultar ser grandes amigos.

A mis compañeros de piso José Luis, Fran, Pascual y Jesús. Por estas a mi lado en los buenos y no tan buenos momentos.

A todos los profesores de mi vida académica, de todos y cada uno de ellos he aprendido.

A los compañeros del Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador por su ayuda y tiempo en el transcurso de este Trabajo Fin de Grado.

A Elisabez Estévez, profesora de la Universidad de Jaén, por su ayuda y colaboración en la realización de este Trabajo Fin de Grado.

A Diego Manuel Martínez Gila, tutor de este trabajo, por su tiempo, paciencia y dedicación para poder ayudarme y por todo lo que me ha enseñado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. METODOLOGÍA	2
3.1. Probetas para ensayos.....	3
3.2. Tecnologías para la detección de defectos de conductividad eléctrica en probetas.....	5
3.2.1. Termografía activa	5
3.2.2. Perfilometría láser.....	9
3.2.3. Visión por computador 2D en el espectro visible	10
3.3. Setup desarrollado.....	12
3.3.1. Termografía activa	12
3.3.2. Perfilometría láser.....	16
3.3.3. Visión por computador 2D en el espectro visible	20
3.4. Diseño software	24
3.4.1. Termografía activa	25
3.4.2. Perfilometría láser.....	25
3.4.3. Visión por computador 2D en el espectro visible	27
4. RESULTADOS	39
4.1. Termografía activa	39
4.2. Perfilometría láser	42
4.3. Visión por computador 2D en el espectro visible.....	46
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	50
6. PRESUPUESTO	52
6.1. Cuadro de precios.....	52
6.2. Estimación horas empleadas	54
6.3. Resumen presupuesto	55
7. REFERENCIAS.....	55

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 3.1 Diseño de las probetas y nomenclatura de las diferentes zonas	3
Figura 3.2 Probeta con pistas 75% cobre y 25% estaño.....	3
Figura 3.3 Probeta con pistas 100% estaño	3
Figura 3.4 Probeta con pistas 100% cobre	3
Figura 3.5 Esquema de termografía activa.....	8
Figura 3.6 Esquema de perfilometría láser	10
Figura 3.7 Esquema de visión por computador	11
Figura 3.8 Cámara térmica Gobi-640-GigE.....	12
Figura 3.9 Distancia nominal entre cámara térmica y probeta de ensayo	15
Figura 3.10 Fuente externa de calor, foco halógeno	15
Figura 3.11 Escenario general del setup de termografía activa.....	16
Figura 3.12 Sensor Gocator 2420	17
Figura 3.13 Diseño 3D del soporte de probeta	18
Figura 3.14 Soporte de probeta	19
Figura 3.15 Escenario general del setup de perfilometría láser	20
Figura 3.16 Cámara Mako G125	21
Figura 3.17 Foco Luxe LED 20W	23
Figura 3.18 Escenario general del setup de visión por computador.....	24
Figura 3.19 Ejemplo de visualización de un ensayo en Xeneth.....	25
Figura 3.20 Ejemplo de la Interfaz Gocator Web	26
Figura 3.21 Ejemplo de software SoMove	27
Figura 3.22 Flujograma de defectos de continuidad.....	29
Figura 3.23 Ejemplo de inspección de una captura con defectos en el extremo e intermedios	30
Figura 3.24 Flujograma detección de continuidad en los extremos de las pistas.....	31
Figura 3.25 Ejemplo de la evolución de una imagen binarizada en el proceso de defectos en los extremos	32
Figura 3.26 Flujograma detección de defectos intermedios.....	33
Figura 3.27 Ejemplo del proceso de defectos intermedios.....	34
Figura 3.28 Ejemplo de capturas binarizadas (izquierda) y reconstruidas (derecha)	35
Figura 3.29 Ejemplo de mejora del proceso defectos intermedios	36
Figura 3.30 Ventana principal de Interfaz de usuario - Análisis de pistas serigrafiada.....	37
Figura 3.31 Ejemplo de análisis de una pista	38
Figura 3.32 Ejemplo de la interfaz de usuario al pulsar 'Exceso de material'	38
Figura 4.1 Ejemplo de inyección de corriente eléctrica a las pistas de dos placas distintas	39
Figura 4.2 Resultados termografía con foco halógeno (izquierda) y resultados termografía con foco halógeno y relé (derecha)	41
Figura 4.3 Resultados termografía con soldador	42
Figura 4.4 Fotografía de la probeta número 2	43
Figura 4.5 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 2	43
Figura 4.6 Fotografía de la probeta número 6	44
Figura 4.7 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 6	44

Figura 4.8 Fotografía de la probeta número 9	45
Figura 4.9 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 9	45
Figura 4.10 Identificación de defectos de continuidad sin modelo 2D y con modelo 2D respectivamente	46
Figura 4.11 Ejemplo de falso negativo en la detección de defectos de continuidad (probeta número 9 pista 3)	48
Figura 4.12 Resistencia eléctrica en función del grosor.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Especificaciones de cada placa	4
Tabla 3.2 Conductividad de los materiales de fabricación de las probetas	7
Tabla 4.1 Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de detección de no continuidad..	48
Tabla 4.2 Relación entre grosor y resistencia de las especificaciones	50

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es seguir aprendiendo y poniendo en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de los cursos académicos y distintas asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.

A su vez, este proyecto se ha realizado en el Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador (GRAV) de la Universidad de Jaén, el cual se dedica tanto a proyectos de investigación fundamental como proyectos de transferencia de tecnología por lo que ha supuesto una motivación extra el tener acceso a un entorno laboral, equipos especializados y ayuda de profesionales y profesores, los cuales me han guiado en este proyecto.

Este Trabajo Fin de Grado, consiste en el estudio de tecnologías capaces de llevar a cabo un control de calidad a pistas serigrafiadas dispuesta sobre placas de material plástico, para la detección de defectos que puedan ocasionar fallos de conductividad eléctrica, con métodos no invasivos y sin contacto.

Precisamente estos métodos en auge con la condición de realizarse sin contacto suponen un reto personal y profesional en el campo de la ingeniería.

Este trabajo es un primer prototipo de un sistema automático de inspección de defectos de conductividad eléctrica sin contacto.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto radica en analizar diferentes tecnologías válidas para el análisis, de detección de defectos de continuidad sobre pistas de circuitos eléctricos serigrafiados dispuestos en placas fabricadas con termoplásticos con la finalidad de poder realizar un control de calidad.

La inspección de calidad consiste en comprobar la conductancia (G) de las pistas a través de técnicas no destructivas y sin contacto.

Se han analizado y realizado pruebas con las tecnologías de termografía activa y perfilometría láser para finalmente centrarse en un sistema automático basado en visión por computador, el cual tiene varios objetivos:

- Identificar y diferenciar los distintos tipos de defectos que pueden contener las pistas de soldadura.
- Diseño del hardware necesario del sistema automático. Este incluye la selección de la cámara industrial, el sistema de iluminación, escena y soportes para la correcta colocación de las pistas de soldadura.
- Diseño del software necesario del sistema automático. Este incluye recopilación de información necesaria, base de datos, algoritmos para el procesamiento de imágenes y clasificación de defectos y la interfaz software de usuario.
- Evaluar los resultados obtenidos y la viabilidad de la tecnológica.

3. METODOLOGÍA

En este apartado se describen el material utilizado para realizar los ensayos así como las distintas tecnologías analizadas para resolver la problemática del proyecto.

El análisis de defectos se realiza sobre placas de pruebas fabricadas con termoplásticos sobre las que se imprimen pistas de soldadura para interconectar componentes eléctricos (de aquí en adelante probetas), y este debe ser con ensayos no destructivos (END, o pruebas no destructivas PND y en inglés NDT de non destructive testing) y sin contacto.

Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de examen o prueba practicada en materiales, componentes y partes; usando técnicas que no alteran o dañan el estado físico o constitución química, de estos mismos. El

propósito de estas pruebas es detectar discontinuidades superficiales e internas de dichos materiales [1].

Se han estudiado y realizado ensayos con las tecnologías END de termografía activa, perfilometría láser y visión por computador en el espectro visible.

3.1. Probetas para ensayos

Las probetas sobre las que se han realiza los distintos ensayos, están fabricadas de una mezcla de los plásticos acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y polimetilmetacrilato (PMMA), en las cuales se tiene tres pistas serigrafiadas. Estas pistas son de una aleación al 75% cobre y 25% estaño, Figura 3.2, 100% estaño, Figura 3.3, o 100% cobre, Figura 3.4, dependiendo de la placa.

El diseño de las placas es rectangular, con un tamaño de 79 mm de largo por 49 mm de ancho, con las esquinas redondeadas, y a su vez la placa no es totalmente plana ya que tiene una pequeña curvatura en los extremos. El diseño de cada pista es diferente en forma y anchura, como se puede observa en la Figura 3.1. A su vez, aunque la forma de las pistas es semejante entre todas las placas, la anchura de estas varía según la placa.

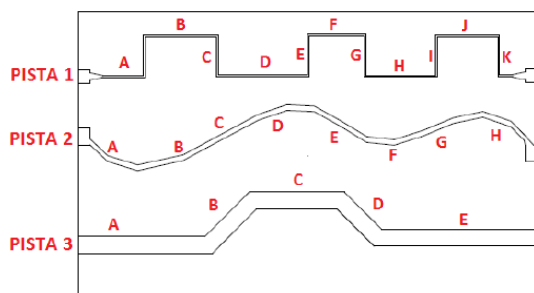


Figura 3.1 Diseño de las probetas y nomenclatura de las diferentes zonas

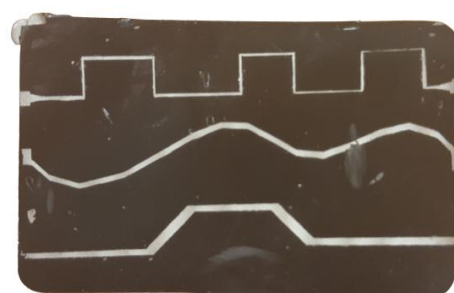


Figura 3.2 Probeta con pistas 75% cobre y 25% estaño

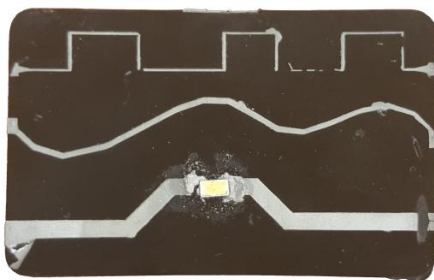


Figura 3.3 Probeta con pistas 100% estaño



Figura 3.4 Probeta con pistas 100% cobre

Para la experimentación que se ha llevado a cabo en este TFG se ha contado con doce probetas, de las cuales se han analizado todas a excepción de la número cuatro, por lo tanto, se analizan once placas. Cinco de ellas tienen conectado en su tercera pista un diodo emisor de luz (LED), como se observa en la Figura 3.3.

Los defectos hallados en las placas, son producidos durante el proceso de fabricación y en otras ocasiones de forma manual a propósito. La siguiente tabla recoge las especificaciones de cada probeta.

Número de placa	Material (%)	Altura Plasma (mm eje z)	LED	Fallos y zonas críticas			Resistencia (Ω)		
				Pista 1	Pista 2	Pista 3	Pista 1	Pista 2	Pista 3
1	75 Cu/25 Sn	127	Si	F-G-K	H	-	5.6	3.1	0.6
2	75 Cu/25 Sn	127	Si	C-E/F-G/H	A-B/C-D	-	5.2	2.1	0.6
3	75 Cu/25 Sn	127	No	B	G	-	8.8	2.1	1.1
4	75 Cu/25 Sn	127	No	C-I	-	E	3.8	0.9	1.4
5	100 Sn	127	No	A	C/D-G/H	-	4.6	0.7	0.15
6	100 Sn	127	No	E	-	-	-	0.5	0.4
7	100 Sn	127	No	E-I/H	-	-	1.4	0.5	0.4
8	100 Sn	127	Si	B/C-F/G-G/H-K	E/H	A	-	2.0	0.5
9	100 Cu	130	No	A-B-D-F-H-J-K	F	A	-	278.6	41.5
10	100 Cu	130	No	A-C-F-G-G/H-H	E	A	-	62.0	10.1
11	100 Cu	127	Si	A-E/F-F/G-G/H	A-D	-	-	-	3.7
12	100 Cu	127	Si	A-C/D-E/F-G/H-J	-	A	-	13.9	3.0

Tabla 3.1 Especificaciones de cada placa

Los defectos localizados en zonas X-Y, son independientes y los defectos X/Y están localizados en la esquina formada por las zonas X e Y.

3.2. Tecnologías para la detección de defectos de conductividad eléctrica en probetas.

En este apartado se describen brevemente los fundamentos teóricos de las tres tecnologías escogidas así como los procedimientos para analizar las probetas.

3.2.1. Termografía activa

La termografía infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y analizar cambios en la temperatura de superficies de materiales con precisión. La Física permite convertir las mediciones de la radiación infrarroja en medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación emitida en la franja infrarroja del espectro electromagnético.

Las cámaras termográficas, son capaz de medir la energía radiante emitida por materiales con sensores infrarrojos, sensibles a estas longitudes de onda. Esto permite medir la energía radiante emitida por superficies de materiales y, por lo tanto, determinar la temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto.

La radiación infrarroja es la señal de entrada que la cámara termográfica necesita para generar una imagen de rango de temperaturas, donde cada temperatura distinta se representa con un color o tonalidad, según una escala determinada.

Dentro de la termografía existen dos métodos de trabajo, termografía pasiva y activa. En la termografía pasiva se estudian las diferencias de temperaturas naturales propias del material. En la termografía activa se utilizan fuentes de calor externas que permiten excitar térmicamente el material o objeto de forma que se acentúan las irregularidades internas (grietas, cortes, discontinuidades, filtraciones) no detectables mediante termografía pasiva [2].

En el análisis de las probetas, ya mencionadas, se requiere de termografía activa, por lo tanto, es una técnica de inspección relacionada con los ensayos no destructivos, en la que intervienen las cámaras termográficas como instrumento de medición de la temperatura sin contacto y una fuente de calor externa como excitador térmico, observando anomalías en la evolución de la temperatura [3].

Cabe recordar que el objetivo principal de este proyecto es la inspección de calidad para comprobar la conductancia sobre pistas serigrafiadas dispuestas en placas fabricadas con termoplásticos. La conductancia es la capacidad de un material, de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él. Depende de la estructura atómica y molecular del material.

La conductancia (G) se mide en Siemens (S) y se define como:

$$G = \sigma \cdot \frac{S}{L} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde en el sistema internacional:

G(S): conductancia eléctrica.

σ (S/m): conductividad eléctrica de un material.

S(m²): área transversal.

L(m): longitud.

Precisamente la conductividad eléctrica conlleva el potencial uso de la termografía, ya que esta tecnología se basa en la ley de conductividad de Wiedemann-Franz, que establece para los metales que el cociente entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica es proporcional a la temperatura absoluta multiplicada por la constante de proporcionalidad o número de Lorenz:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$\lambda(\text{W/m}\cdot\text{K})$: conductividad térmica.

$\sigma(\text{S/m})$: conductividad eléctrica

$L(\text{W/S}\cdot\text{K}^2)$: constante de proporcionalidad o número de Lorenz.

$T(\text{K})$: temperatura absoluta.

La conductividad térmica del ABS o PMMA material del que están fabricadas las probetas es bastante menor a la del cobre o estaño como se observa en la siguiente tabla.

Material	Conductividad térmica (W/m·K)	Conductividad eléctrica (S/m)
ABS	0,083736 - 0,125604	10^{-13}
PMMA	0,167472 - 0,251208	$0,5 \cdot 10^{-13}$
Cobre	372 - 385	$5,96 \cdot 10^7$
Estaño	64	$8,70 \cdot 10^6$

Tabla 3.2 Conductividad de los materiales de fabricación de las probetas

Teniendo todo ello en cuenta, se puede considerar que mediante el calentamiento de la serigrafía, utilizando una cámara térmica como sensor y una fuente externa como excitador térmico, se podría observar las zonas de micro-corte o discontinuidades en la pistas al propagarse el calor de un extremo a otro de la placa.

Para ello, se han elaborado una serie de prototipos; todos ellos formados por una cámara térmica pero con diferentes excitadores térmicos y así obtener los mejores resultados posibles. La siguiente figura muestra un esquema general.

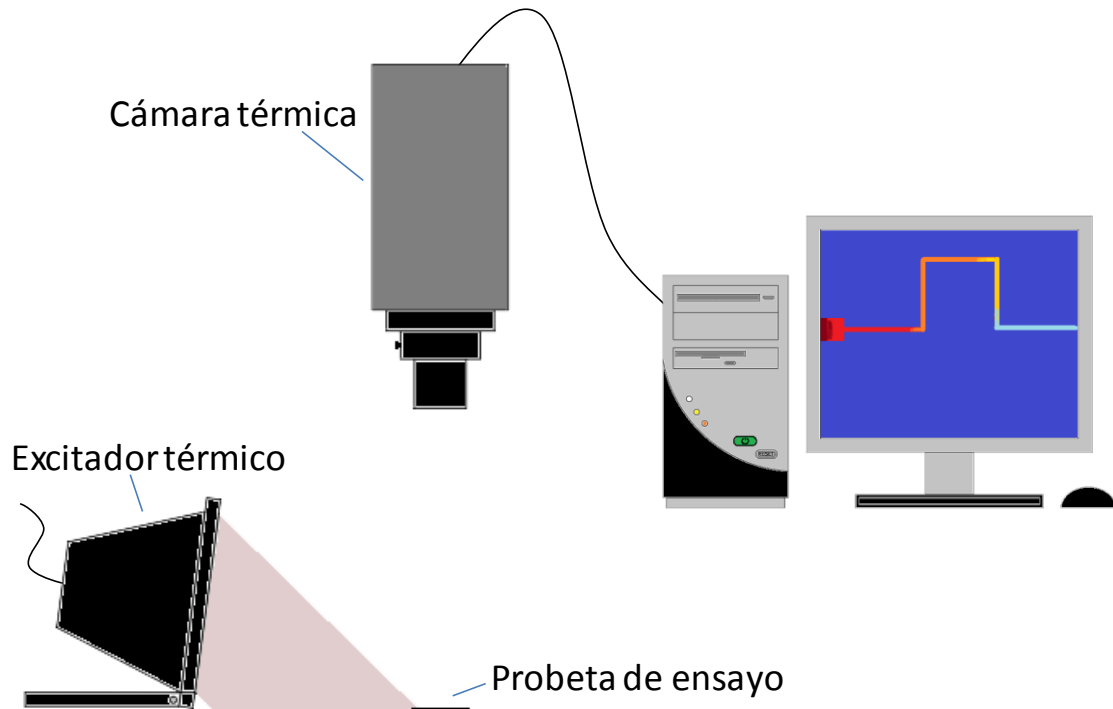


Figura 3.5 Esquema de termografía activa

Las fuentes externas utilizadas para comprobar la propagación de calor en la pista y apreciar posibles defectos, son:

1- Se utiliza como transmisor de calor un foco halógeno para calentar inicialmente el extremo de las tres pistas uniformemente.

2- Se le conecta al foco halógeno anterior, un relé controlado con el microcontrolador Arduino Uno, para que la transmisión de calor sea por impulsos.

3- Por último, el foco externo de calor es un soldador muy próximo a una de las pistas serigrafiadas pero sin llegar a tener contacto, para reducir, focalizar y aproximar la fuente de calor a una de las dichas pistas. Dicho soldador tiene control de temperatura.

Los mejores resultados se obtuvieron con el foco halógeno como se verá en el apartado de resultados de este TFG.

3.2.2. Perfilometría láser

La perfilometría láser se comporta como un escáner láser para crear una representación en 3D del objeto analizado. El sistema proyecta un láser de baja potencia sobre dicho objeto y miden la posición del haz reflejado usando sensores de posición. El láser es desplazado sobre la superficie del objeto, midiendo las alturas para generar dicha representación 3D [4].

El funcionamiento del láser (light amplification by stimulated emission of radiation), se basa en el proceso de emisión estimulada, descrito por primera vez por Albert Einstein en 1917 en uno de sus tres artículos sobre la teoría cuántica de la radiación. El láser es un dispositivo que amplifica la luz; en primer lugar los fotones de una fuente de energía chocan con los electrones de los átomos del láser pasando estos a un estado de excitación. A continuación, son estimulados por fotones externos para que emitan la energía almacenada en forma de fotones. Los fotones emitidos tienen una frecuencia que depende de los átomos en cuestión y se desplazan en fase con los fotones que los estimulan. La luz se amplifica a través de dos espejos paralelos generando nuevas emisiones estimuladas. Y al mismo tiempo, la luz láser se filtra por uno de los espejos, que es sólo parcialmente reflectante. Todo ello constituye el proceso fundamental del láser [4].

Por lo tanto la perfilometría láser permite obtener la anchura y el espesor local de piezas mediante un escaneado de alta velocidad.

Los equipos comerciales que implementan esta tecnología presentan diferentes intensidades y longitudes de onda y tienen la posibilidad de proyectar diferentes patrones de luz (puntos, líneas rectas, circunferencias, cruces, cuadrados, etc.) consiguiendo diferentes resoluciones y rangos de medida.

Aplicando la tecnología al análisis del control de calidad de las pistas, se puede realizar una reconstrucción para obtener la imagen 3D de la serigrafía (véase Figura 3.6) y después, mediante procesado de imagen, obtener las características de las pistas (discontinuidades, grosor y espesor).

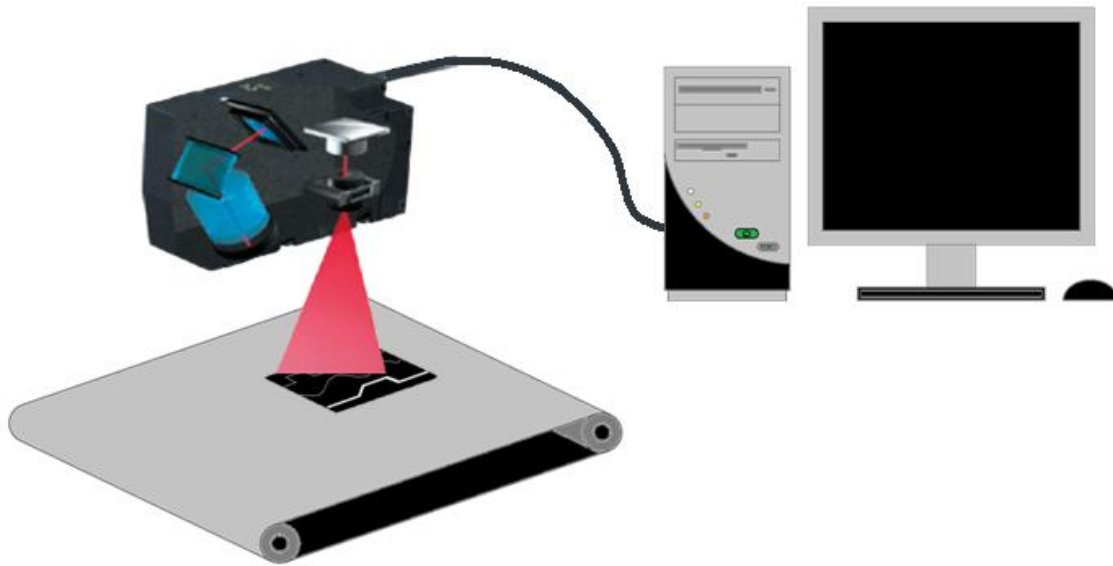


Figura 3.6 Esquema de perfilometría láser

3.2.3. Visión por computador 2D en el espectro visible

La visión por computador convencional extrae información del mundo real a partir de imágenes usando sensores de cámara de video en el espectro visible para posteriormente procesarlas por computador.

Hay que destacar, que ningún sistema de inspección automática por visión por computador, es capaz de detectar la conductividad de las pistas en un circuito impreso. La conductividad de las pistas es un parámetro eléctrico que no puede ser cuantificado mediante una captura de una imagen.

Pero si es posible con esta tecnología analizar la morfología de las pistas para detectar defectos de fabricación. En este TFG se ha diseñado un algoritmo capaz de detectar estos defectos y clasificarlos como defectos de continuidad cuando la pista presenta un corte muy evidente.

El algoritmo mejora notablemente con el modelo del diseño 2D, a través de un proceso de sustracción de defectos por comparación de la imagen capturada a tiempo real y la imagen del modelo 2D. En los ensayos realizados en este trabajo no se cuenta con ninguna referencia de las placas o probetas de ensayo. Además cabe recordar que las pistas de las probetas de ensayo

tienen distinta anchura y material de fabricación. Por lo que se realiza una máscara de algunas de las placas para poder realizar esta comparación.

La siguiente figura muestra un esquema general de visión por computador.

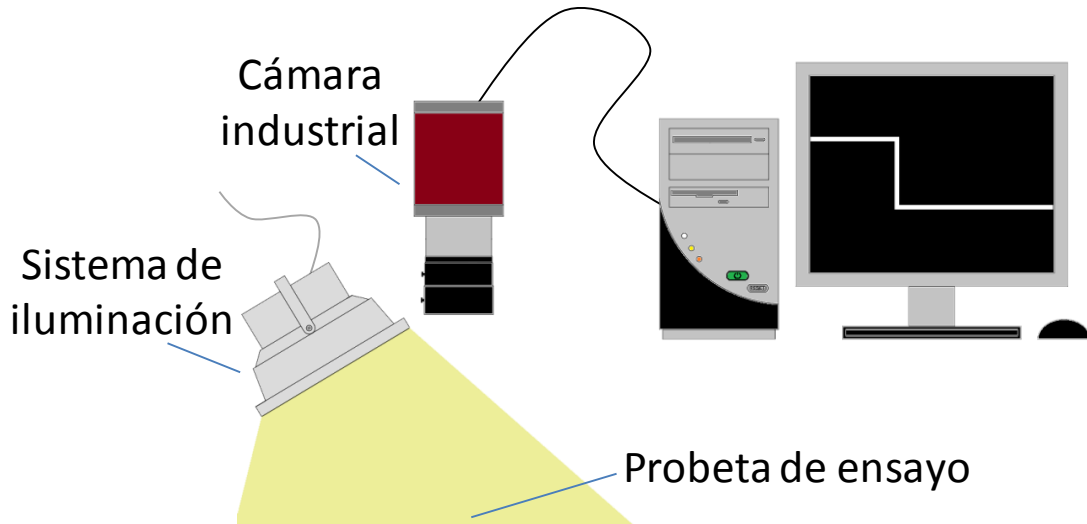


Figura 3.7 Esquema de visión por computador

Por otro lado, cabe la posibilidad de medir las dimensiones de las pistas con un sistema de visión por computador, y relacionar estas con la conductancia (ver Ec. 1).

Con técnicas de visión 2D no se puede obtener el espesor de las pistas. Pero si se puede obtener la medida del grosor o anchura y analizar si existe una correlación entre el grosor promedio de las pistas y las resistencias dadas por las especificaciones (Tabla 3.1). Ya que la resistencia (R) es la inversa de la conductancia (G), y por consiguiente está igualmente relacionada con el grosor:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde en el sistema internacional:

$R(\Omega)$: resistencia eléctrica.

$\rho(\Omega \cdot m)$: resistividad del material.

$L(m)$: longitud.

$S(m^2)$: área transversal.

Por lo tanto es de esperar que, a mayor grosor la resistencia sea menor. En el apartado de resultados de este proyecto se analiza esta correlación entre la anchura y resistencia de las pistas.

3.3. Setup desarrollado

Este apartado describe los distintos elementos hardware empleados en las distintas tecnologías así como su colocación final para realizar las pruebas descritas en este TFG.

3.3.1. Termografía activa

En esta tecnología el setup desarrollado está formado por una cámara térmica, soporte para dicha cámara y un foco halógeno como fuente externa inductora de calor (ver Figura 3.11).A continuación se describen estos componentes.

La cámara térmica empleada ha sido una *Gobi-640-GigE* del fabricante *Xenics* (ver Figura 3.8). Se trata es una cámara microbolómetro no refrigerada que cubre el espectro LWIR (Long Wavelength Infra-Red) [5].



Figura 3.8 Cámara térmica Gobi-640-GigE

Las características a destacar son las siguientes:

- Array microbolómetro no refrigerado.
- Sensibilidad de 8 a 14 micrómetros.
- Resolución 640 x 480 píxeles.
- Tamaño de píxel: 17 micras.
- Frecuencia de fotogramas: 50 Hz.
- Óptica estándar: 18mm F/1 (foco manual).
- Ópticas opcionales: 14.25mm, 25mm, 50mm y 75mm.
- Incluye DSP para corrección de imagen y comunicación electrónica.
- Interfaz control y adquisición en GigE.
- Dimensiones Gobi 640GE: 49x49x77mm.
- Calibración:
 - Estándar: 20°C - 120°C.
 - Opción 1: 50°C – 400°C.
 - Opción 2: 300°C - 1200°C.

Se ha colocado la cámara a una distancia nominal de 13,07 cm de la superficie para poder adquirir información de toda la probeta a inspeccionar. Dicha altura, se calcula con el modelo pin-hole por el cual:

$$x = \frac{f}{z} \cdot X , \quad y = \frac{f}{z} \cdot Y \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

x, y (mm): coordenadas en la captura.

X, Y (mm): coordenadas en el espacio.

f (mm): focal, distancia del centro de la lente al foco.

z (mm): distancia nominal, distancia entre el sensor de la cámara hasta el objeto a visualizar.

Como se ha comentado, las placas miden 79 mm de largo y se les añade un margen de 10 mm, por lo tanto la distancia horizontal de visualización, es en total de 89 mm.

Por otro lado, de las características de la cámara se extrae que las imágenes tienen una resolución de 640x480 píxeles y que el tamaño de pixel es de 17 μm , por lo tanto, el eje horizontal de la imagen tendrá un tamaño total de:

$$x = 640 \text{ pixeles} \cdot 17 \cdot 10^{-3} \text{ mm} / \text{pixeles} = 10,88 \text{ mm}$$

La focal estándar es de 18 mm, por lo tanto despejando la distancia nominal de la ecuación del modelo *pin-hole* (Ec. 4) se puede calcular la altura a colocar la cámara.

$$z = \frac{X}{x} \cdot f$$

$$z = \frac{79 \text{ mm}}{10,88 \text{ mm}} \cdot 18 \text{ mm} = 130,7 \text{ mm} \rightarrow 13,07 \text{ cm}$$

Se ha sujetado la cámara térmica con la base Kaiser RS1 para posicionarla a la altura correcta tal y como ilustra la Figura 3.9.

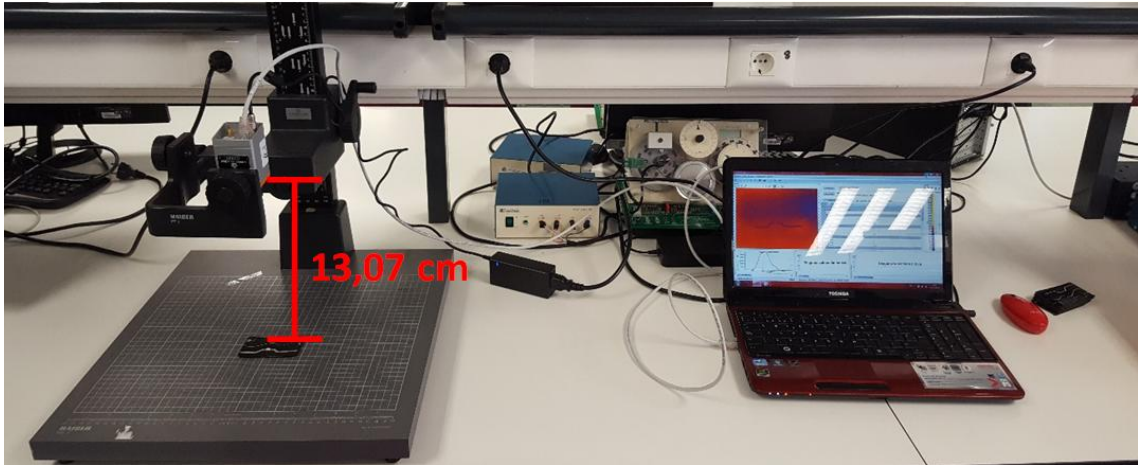


Figura 3.9 Distancia nominal entre cámara térmica y probeta de ensayo

Por último se añade al sistema un foco halógeno de 400W/230V (ver Figura 3.10) como fuente excitadora de calor.



Figura 3.10 Fuente externa de calor, foco halógeno

La siguiente figura ilustra el escenario general para la inspección de defectos de conductividad utilizando la tecnología de termografía activa. Tal y como se aprecia, el foco debe estar colocado hacia un lateral de la probeta ya que es la posición más adecuada para inducir calor inicialmente sobre un extremo de la probeta y permitiendo así observar la propagación térmica en las mismas.

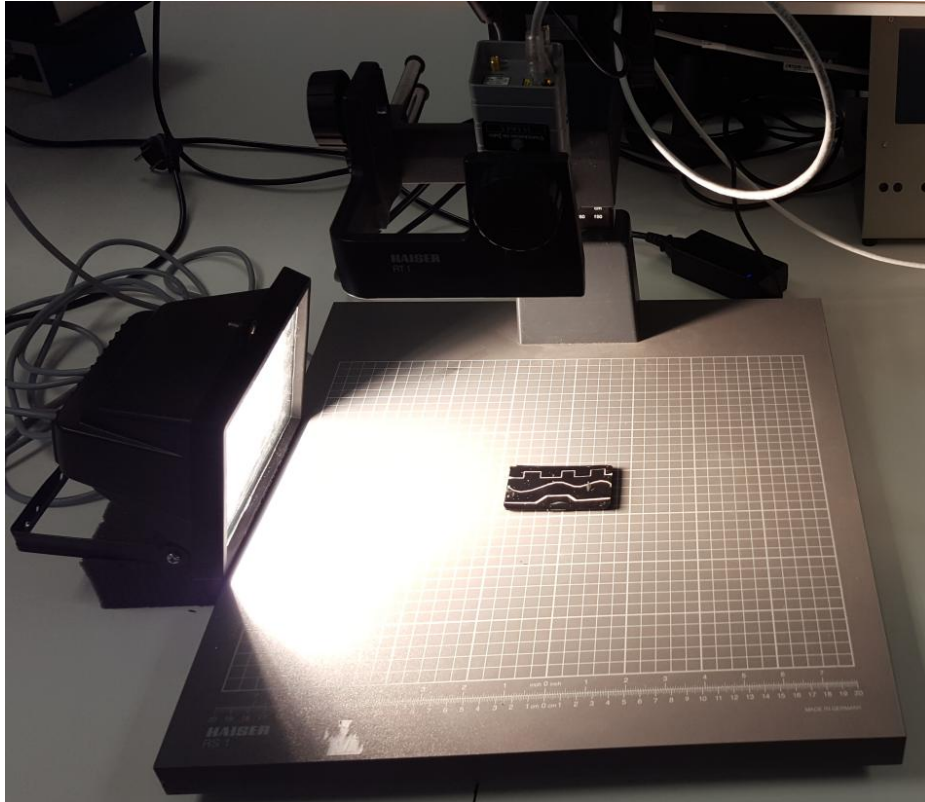


Figura 3.11 Escenario general del setup de termografía activa

3.3.2. Perfilometría láser

Para realizar las pruebas necesarias de esta tecnología, se requiere de un sistema capaz de desplazar las placas para ser analizadas por el sensor 3D colocado en una posición fija. El movimiento debe ser a lo largo del eje longitudinal de las probetas y para ello se utiliza una cinta transportadora. A su vez se le añade un soporte para las probetas, el cual además, se diseña con el objetivo de desplazar estas en el eje transversal, en tres posiciones fijas, que corresponde a las tres pistas. Todos estos elementos se caracterizan a continuación.

Dichos ensayos se han realizado con el sensor Gocator 2420 del fabricante LMI Technologies, Figura 3.12, por su gran precisión, ya que las pistas analizadas tiene un espesor en el rango de micrómetros.



Figura 3.12 Sensor Gocator 2420

El sensor 3D inteligente Gocator cuenta con un sensor de 2Mp y las siguientes características [6]:

- Velocidad de barrido: 5000 Hz.
- Resolución X: 0,014 mm.
- Resolución Z: 0,0058 mm.
- Campo de visión: 27-32 mm.
- Rango de medición: 25 mm.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, para el desplazamiento en el eje longitudinal de las probetas se utiliza una cinta transportadora accionada con el servomotor BSH0553P [7] y controlada por el servovariador Lexium 32M [8] ambos del fabricante Schneider Electric [9].

Y por último el soporte para el correcto posicionamiento de las placas, debe ser flexible para intercambiarse entre las tres pistas serigrafiadas, que serán analizadas.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se ha diseñado dicho soporte con el programa *SOLIDWORKS* [10] (véase Figura 3.13) e imprimido en 3D con termoplástico ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA). Dicho soporte cuenta con dos piezas, una fija colocada en la cinta transportadora y una segunda pieza, la cual se puede fijar en tres posiciones distintas en la primera pieza, estas posiciones corresponde a las tres pistas serigrafiadas de las probetas, Figura 3.14.

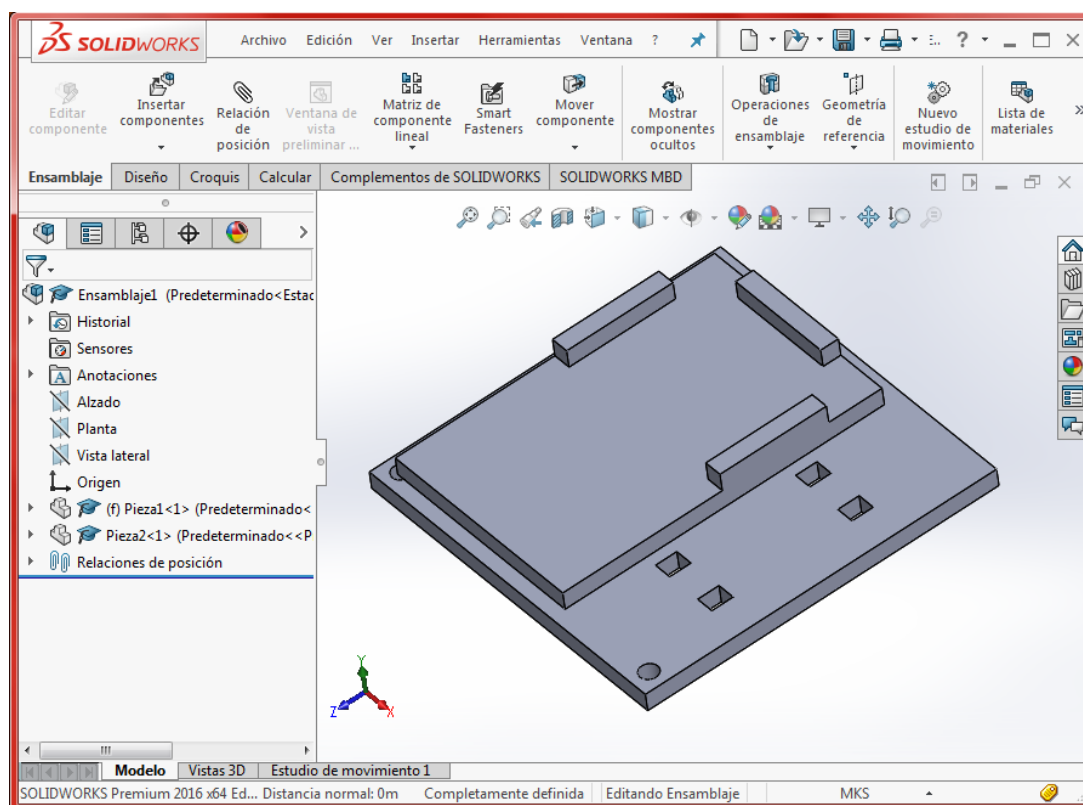


Figura 3.13 Diseño 3D del soporte de probeta

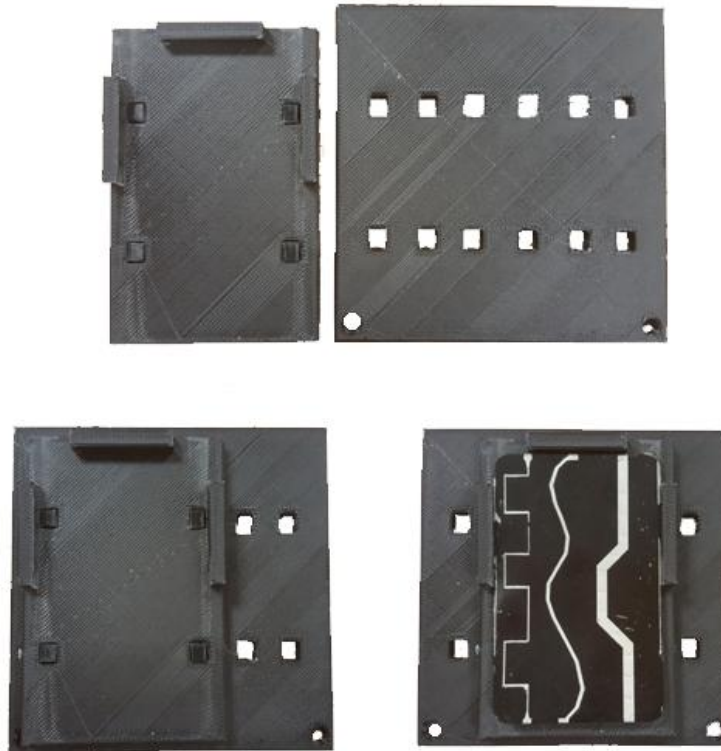


Figura 3.14 Soporte de probeta

El diseño y vistas de estas piezas quedan reflejados en el anexo nº 1 "ESQUEMAS DEL DISEÑO MECÁNICO".

La altura de colocación del sensor Gocator respecto la probeta debe permite la reflexión de laser en esta, por lo que se fija a 10 cm de altura respecto la probeta. Ya que la resolución de la captura se puede ajusta por software como se verá en el apartado de diseño software. En la siguiente figura se muestra el escenario general para el análisis de las pistas serigrafiadas con la tecnología de perfilometría láser.

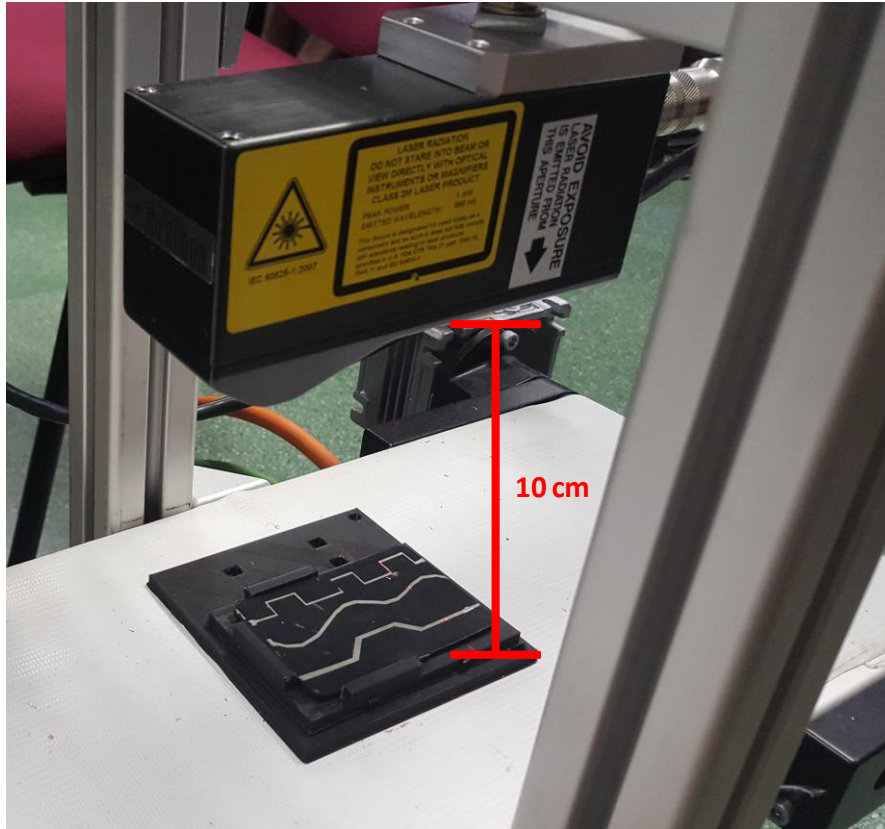


Figura 3.15 Escenario general del setup de perfilometría láser

3.3.3. Visión por computador 2D en el espectro visible

El sistema desarrollado por visión por computador cuenta con una cámara industrial, fijada a un soporte, un sistema de iluminación, una cinta transportadora para desplazar las placas y un soporte para las placas (ver Figura 3.18). A continuación se describen los componentes hardware empleados en las pruebas realizadas con esta tecnología.

La cámara que se ha utilizado es la Mako G125 del fabricante Allied Vision Technologies con imágenes a color y sensor de dispositivo de carga acoplada (CCD - siglas en inglés de Charge Coupled Device). En la siguiente figura se muestra dicha cámara.



Figura 3.16 Cámara Mako G125

Dentro de sus características, destacan las siguientes [5]:

- Resolución: 1292x964 píxeles.
- Sensor: 1/3" CCD Sony ICX445.
- Velocidad: 30 img/s.
- Interfaz: GigE.
- Tamaño píxel: 3,75 μm .
- Regiones de interés (ROI).
- Control de ganancia y exposición.
- White balance.
- Binning.
- Modo grabación.
- StreamBytesPerSecond (control de anchura de banda).

En una primera estancia se le añade a la cámara una lente óptica con distancia focal de 35 mm y se calcula la altura a la que se debe colocar con el modelo pin-hole (Ec. 4). Teniendo en cuenta que las placas miden 79 mm de largo y como se divide la distancia en 4 imágenes del mismo tamaño, se tendrá una longitud horizontal de:

$$X = \frac{79 \text{ mm}}{4} = 19,75 \text{ mm}$$

Lo cual implica que la distancia de visualización en el eje de abscisas debe ser de 19,75 mm de largo.

Por otro lado, de las características de la cámara se extrae que las imágenes tienen una resolución de 1292x964 píxeles y dado que el tamaño de pixel es de 3,75 μm , el eje horizontal de la imagen tendrá un tamaño total de:

$$x = 1292 \text{ pixeles} \cdot 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ mm/pixeles} = 4,845 \text{ mm}$$

Por lo tanto, con una focal de 35 mm la cámara debe colocarse a la altura de:

$$z = \frac{X}{x} \cdot f$$

$$z = \frac{19,75 \text{ mm}}{4,845 \text{ mm}} \cdot 35 \text{ mm} = 142,7 \text{ mm} \rightarrow 14,27 \text{ cm}$$

Pero en el momento de realizar las pruebas, con esta altura la cámara no es capaz de enfocar correctamente, por lo que se le añade un anillo extensor (a) de 10 mm y se calcula nuevamente la altura:

$$z = \frac{X}{x} \cdot (f + a)$$

$$z = \frac{19,75 \text{ mm}}{4,845 \text{ mm}} \cdot (35 \text{ mm} + 10 \text{ mm}) = 183,4 \text{ mm} \rightarrow 18,34 \text{ cm}$$

Finalmente, la distancia nominal entre el sensor de la cámara y la posición de las probetas debe ser de 18,34 cm.

Otro aspecto de gran importancia en un sistema de visión por computador es el sistema de iluminación que debe ser capaz de iluminar bien la escena sin crear sombras ni reflejos. El sistema de iluminación seleccionado ha sido un

foco LUXE LED 20W 220v luz fría 600mA, con un panel de LEDs blancos (véase Figura 3.17).



Figura 3.17 Foco Luxe LED 20W

Con objeto de impedir perturbaciones lumínicas, se han utilizado una serie de paneles blancos como se observa en la Figura 3.18.

Por último, tanto la cinta transportadora como el soporte de placas son los mismos que en el apartado anterior. Se pueden observar todos estos elementos en la siguiente figura, que presenta el escenario general desarrollado para el análisis de calidad por visión por computador de las pistas serigrafiadas.

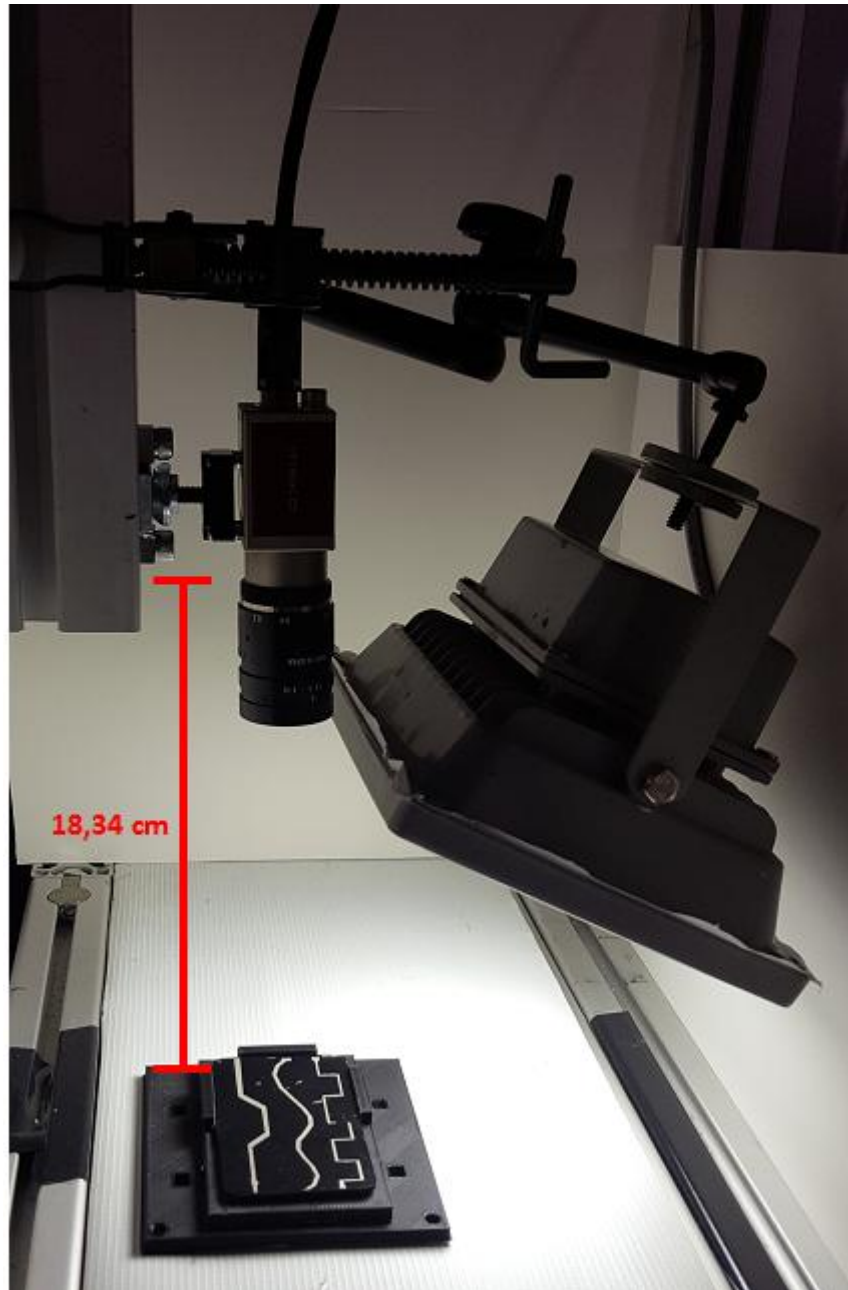


Figura 3.18 Escenario general del setup de visión por computador

3.4. Diseño software

Este apartado está dedicado a la descripción de las distintas herramientas software empleadas en las distintas tecnologías, así como la lógica empleada en los algoritmos desarrollados para conseguir detectar defectos en las probetas.

3.4.1. Termografía activa

El software necesario para realizar los ensayos de termografía activa es el que controla la cámara térmica, llamado *Xeneth* [11] proporcionado por el propio fabricante de la cámara. La siguiente figura ilustra un ejemplo de visualización de dicho software en un ensayo de termografía activa.

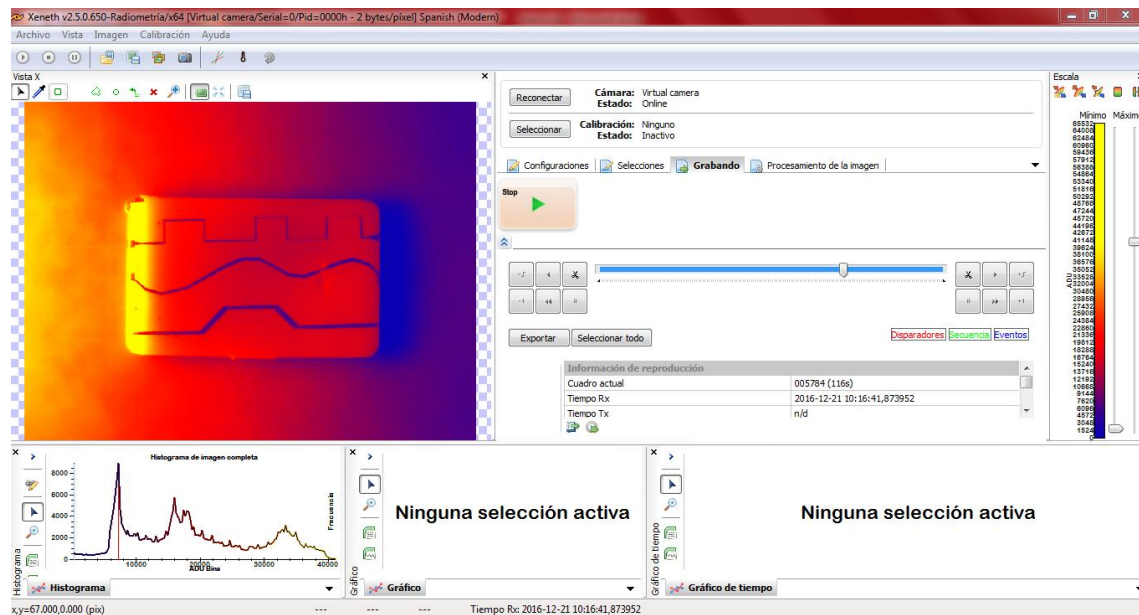


Figura 3.19 Ejemplo de visualización de un ensayo en Xeneth

Este nos permite reproducir y grabar video, con el fin de observar la evolución de la temperatura en el tiempo, así como realizar capturas, control del rango de temperatura y nos muestra el histograma del video a tiempo real.

3.4.2. Perfilometría láser

Los programas que se han empleado para el correcto funcionamiento de los ensayos realizados con esta tecnología, son el controlador del sensor Gocato 2420 y el controlador de la cinta transportadora.

El sensor 3D Gocator 2420 lleva integrado una interfaz de usuario sin necesidad de instalación de software, ya que se puede acceder a través de un navegador web (ver Figura 3.20) [12].

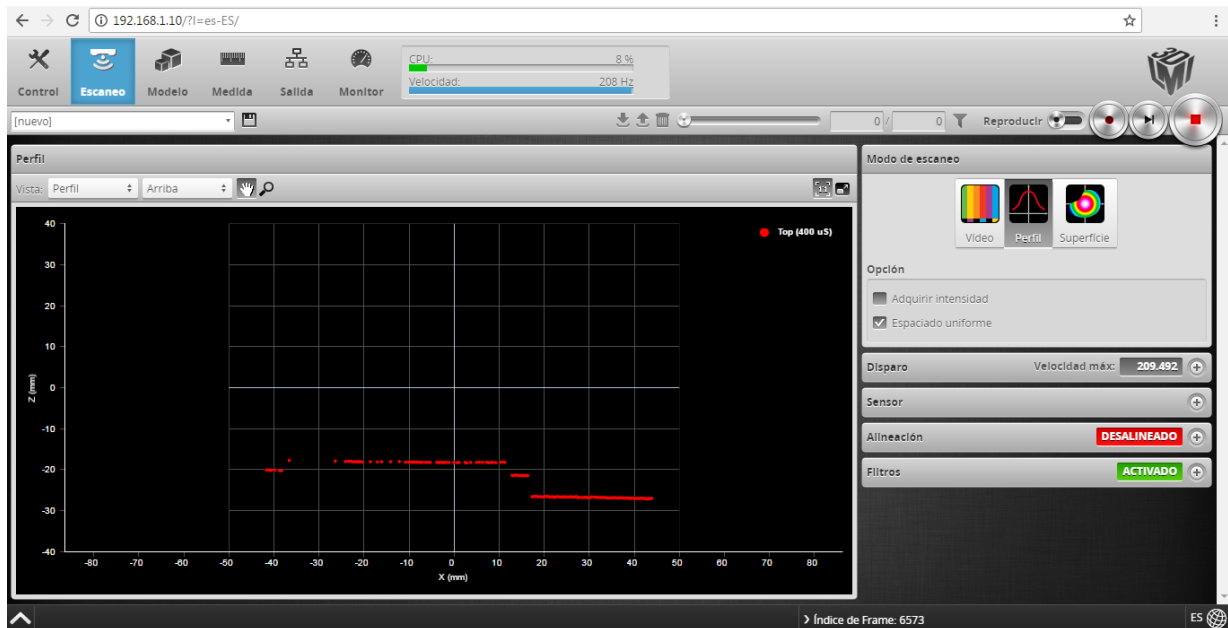


Figura 3.20 Ejemplo de la Interfaz Gocator Web

Para la correcta representación 3D se debe ajustar el área que se desea analizar, la velocidad de desplazamiento de la pieza respecto del sensor, dos tiempos de exposición que serán el necesario para representar la probeta completa y un segundo tiempo de exposición para detectar las pistas más adecuadamente. Con estos parámetros e indicándole el tamaño de la probeta en el eje de desplazamiento de esta, el software es capaz de detectar y representar las probetas de ensayos. En el apartado de resultados de este TFG se pueden observar ejemplos de estas representaciones 3D.

Por otro lado, el software SoMove distribuido por Schneider Electric [13], realiza el control de la cinta transportadora. El cual ofrece variadas opciones como desplazar la cinta en ambas direcciones, fijar posición inicial, escoger desplazar la cinta a la posición numérica deseada, elegir la velocidad de desplazamiento etc. (ver Figura 3.21). En el caso del control de calidad de las pistas serigrafiadas es necesario un desplazamiento continuo de principio a fin de la probeta analizada.

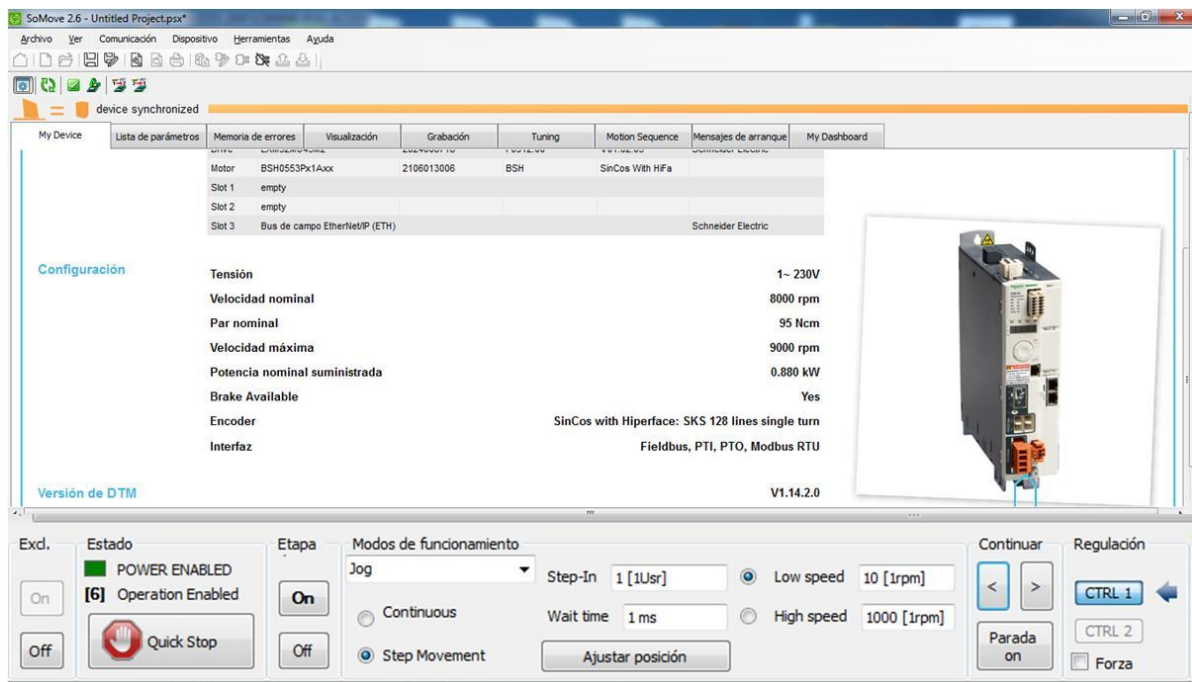


Figura 3.21 Ejemplo de software SoMove

3.4.3. Visión por computador 2D en el espectro visible

Las capturas realizadas con esta tecnología son procesadas y analizadas en busca de defectos que puedan ocasionar fallos de conductividad eléctrica por un algoritmo desarrollado para dicho propósito. También se ha desarrollado un primer prototipo de interfaz de usuario.

Tanto el algoritmo como la interfaz de usuario se han diseñado con el software matemático MATLAB (MATrix LABoratory - Laboratorio de Matrices) que ofrece un entorno de desarrollo integrado. Con ayuda de las cajas de herramientas de adquisición de imagen (Image Acquisition Toolbox) y procesamiento de imagen (Image Processing Toolbox) y a su vez, comandos de procesamiento de imagen [14], todo ello basado en su propio lenguaje de programación (lenguaje M).

Como se ha comentado anteriormente, la conductancia es una propiedad eléctrica que no se puede cuantificar con un sistema de visión por computador. Pero un corte en las pistas es un indicio evidente de no continuidad y por ello

este módulo software tiene como principal objetivo detectar estas discontinuidades.

Se ha diseñado un algoritmo capaz de detectar cortes y falta de material en las pistas. Sin embargo este tiene algunas limitaciones que se eliminan en una segunda versión que hace uso de los archivos del modelo 2D de las pistas como se explica más adelante en este apartado.

El algoritmo se divide en tres procesos; procesamiento de la captura de la probeta, realizada por la cámara, detección de defectos de continuidad en los extremos de la pista y detección de defectos intermedios de la pista.

Como ya se ha mencionado cada pista se divide en cuatro capturas. Cada una en primer lugar se somete a una binarización. Aunque las pistas de las distintas probetas tienen una tonalidad distinta, por el material de fabricación, todas se diferencian claramente del resto de la probeta al ser negra. Por lo que se usa el método Otsu por el cual elige el umbral óptimo maximizando la varianza entre clases mediante una búsqueda exhaustiva de las intensidades de gris de la captura. Para finalmente crear dos clases donde el negro y valores de gris cercanos al negro se ponen a 0 y el resto a 1.

Posteriormente a la imagen binarizada se le somete a una eliminación de segmentos donde, en primer lugar, se ponen a 0 las primeras y últimas cincuenta columnas de la captura binarizada para eliminar perturbaciones no deseadas alejadas de la pista analizada. A continuación se eliminan conjunto de píxeles a 1, menores de quinientos píxeles para aislar la pista. Por último, se rellenan huecos en la pista.

La identificación de los defectos en los extremos únicamente se hará en la primera y última captura de cada pista. Sin embargo la identificación de defectos interiores se realiza en todas ellas.

Todo este proceso se ilustra en el siguiente flujograma, a través de un ejemplo de una captura de una pista con defecto en el extremo derecho y a su vez defectos intermedios.

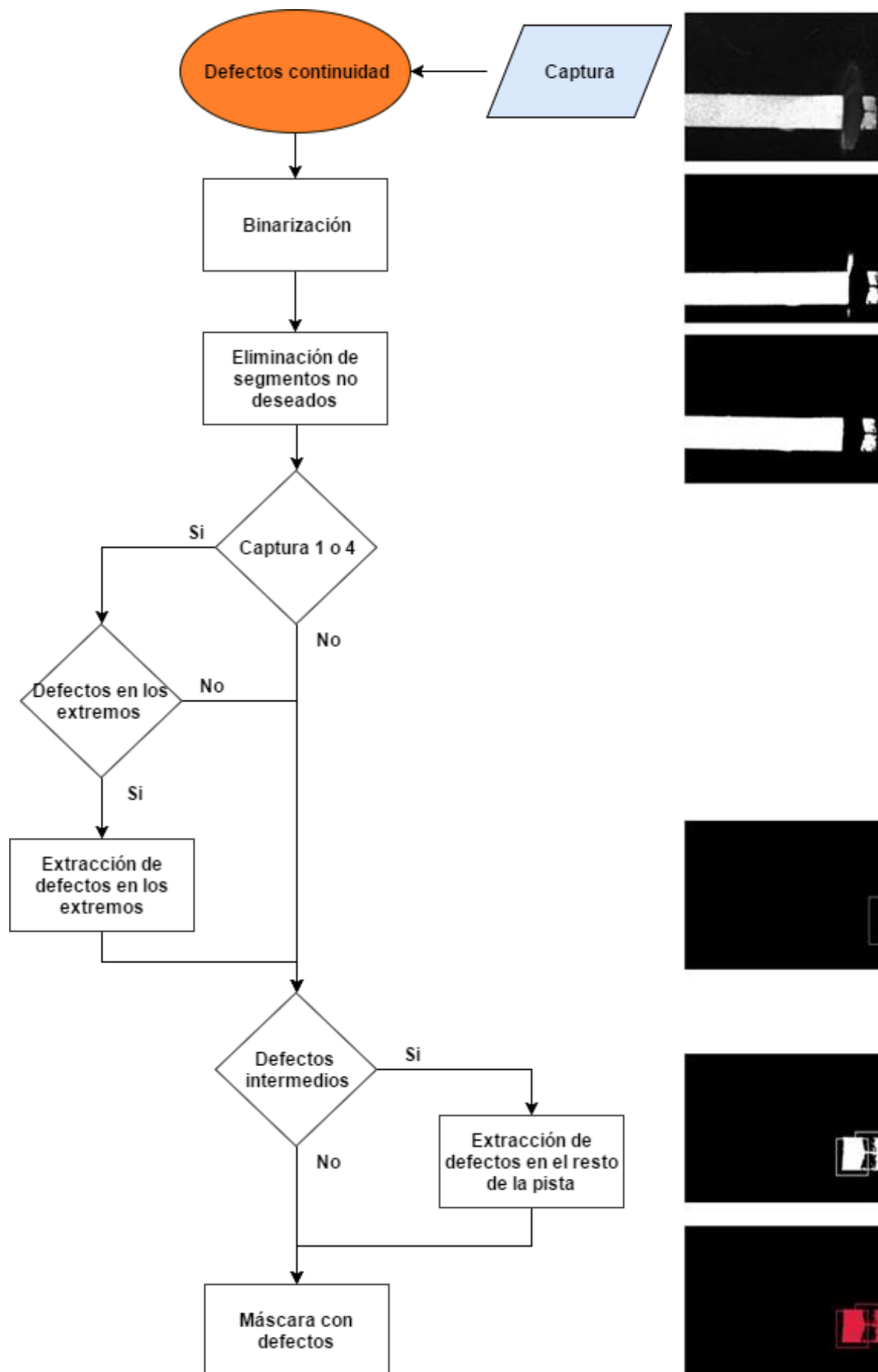


Figura 3.22 Flujograma de defectos de continuidad

Una vez creada la máscara con defectos se superpone a la captura inicial obteniendo el resultado final de la inspección (véase Figura 3.23).

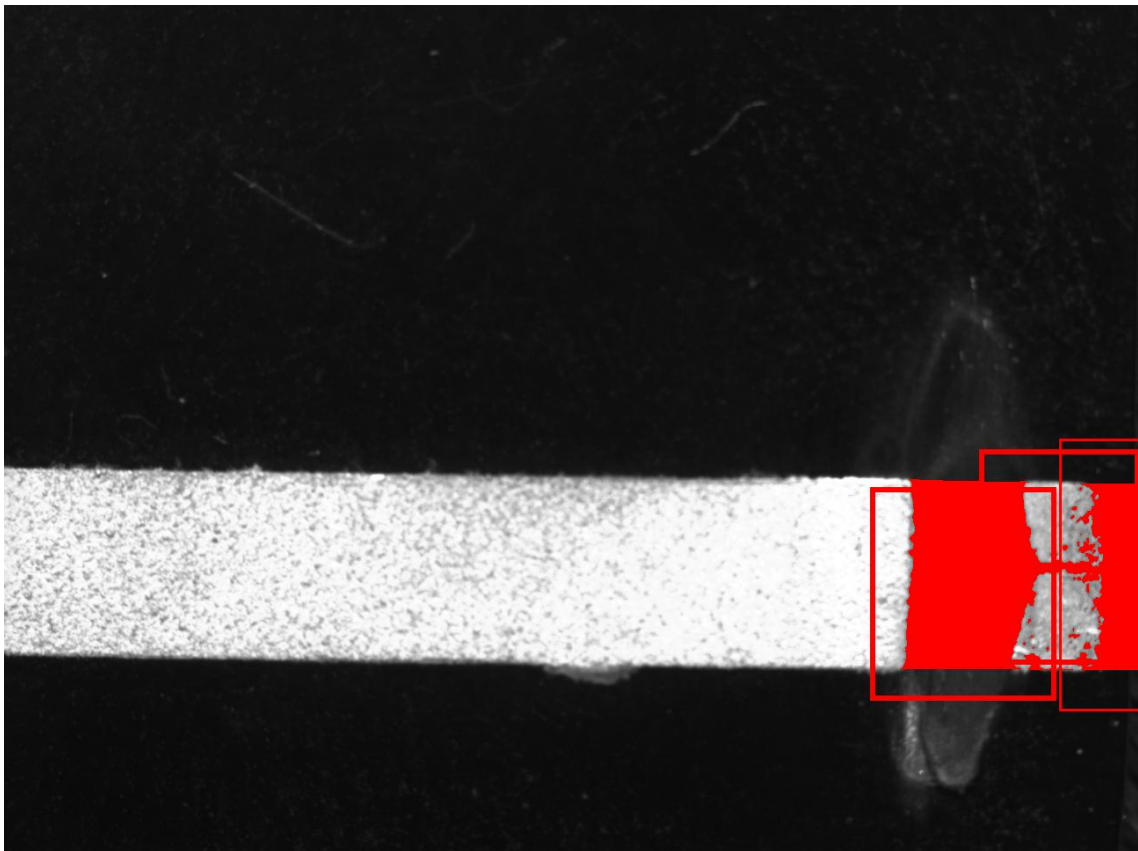


Figura 3.23 Ejemplo de inspección de una captura con defectos en el extremo e intermedios

Los defectos en los extremos son por falta de material en el principio y final de la pista y conllevan un fallo de continuidad en los extremos de esta. El algoritmo comprueba si la primera columna de la primera captura binarizada y la última columna de la última captura binarizada tienen al menos un pixel a 1. Si no encuentra ningún 1, quiere decir que no hay pista y por lo tanto es un defecto de continuidad que será identificado enmarcándolo en rojo. La Figura 3.24 ilustra a través de un flujograma la lógica seguida por dicho proceso. A continuación del siguiente flujograma se muestra un ejemplo de la evolución de una imagen binarizada y procesada de entrada para una mejor compresión (ver Figura 3.25).

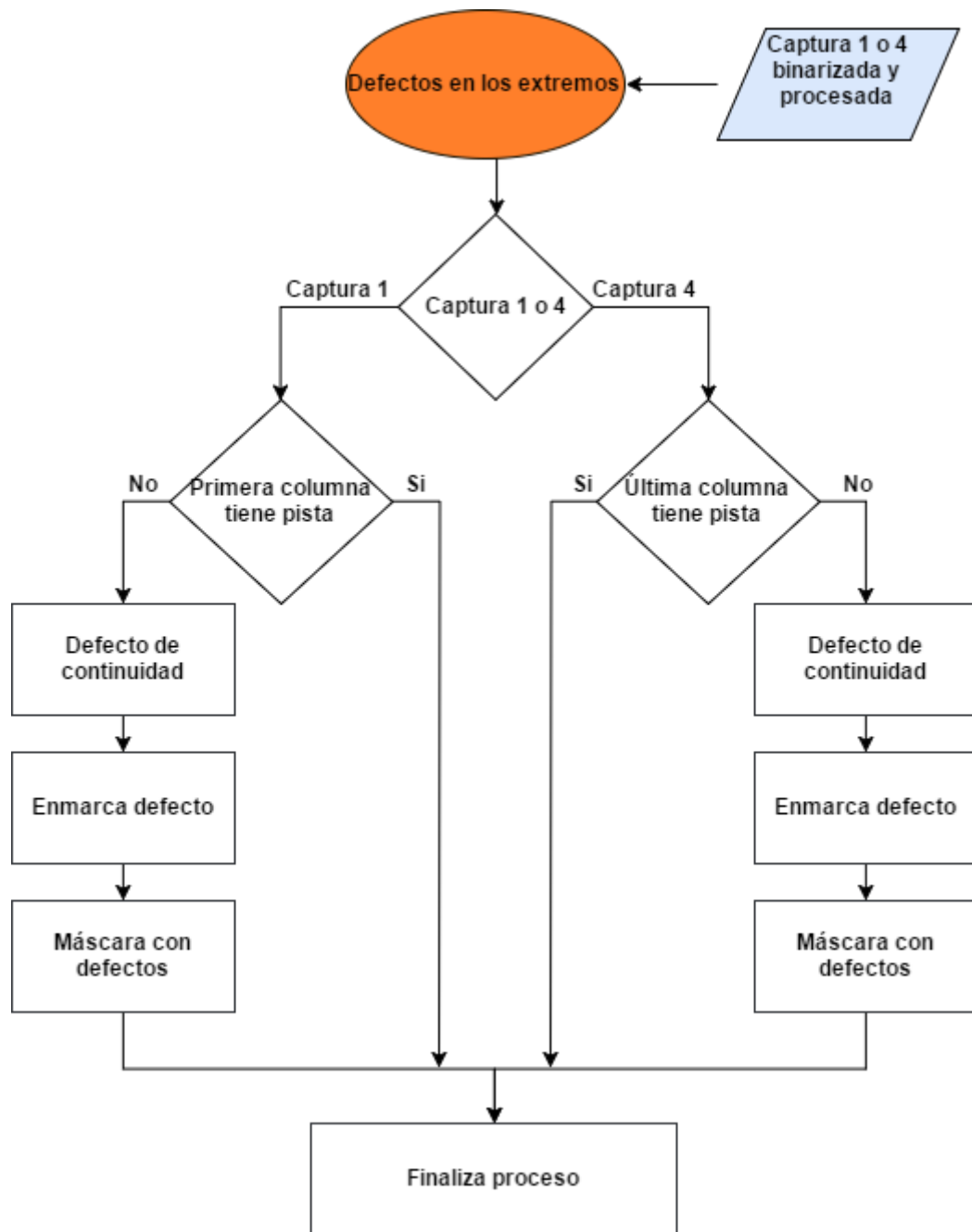


Figura 3.24 Flujograma detección de continuidad en los extremos de las pistas

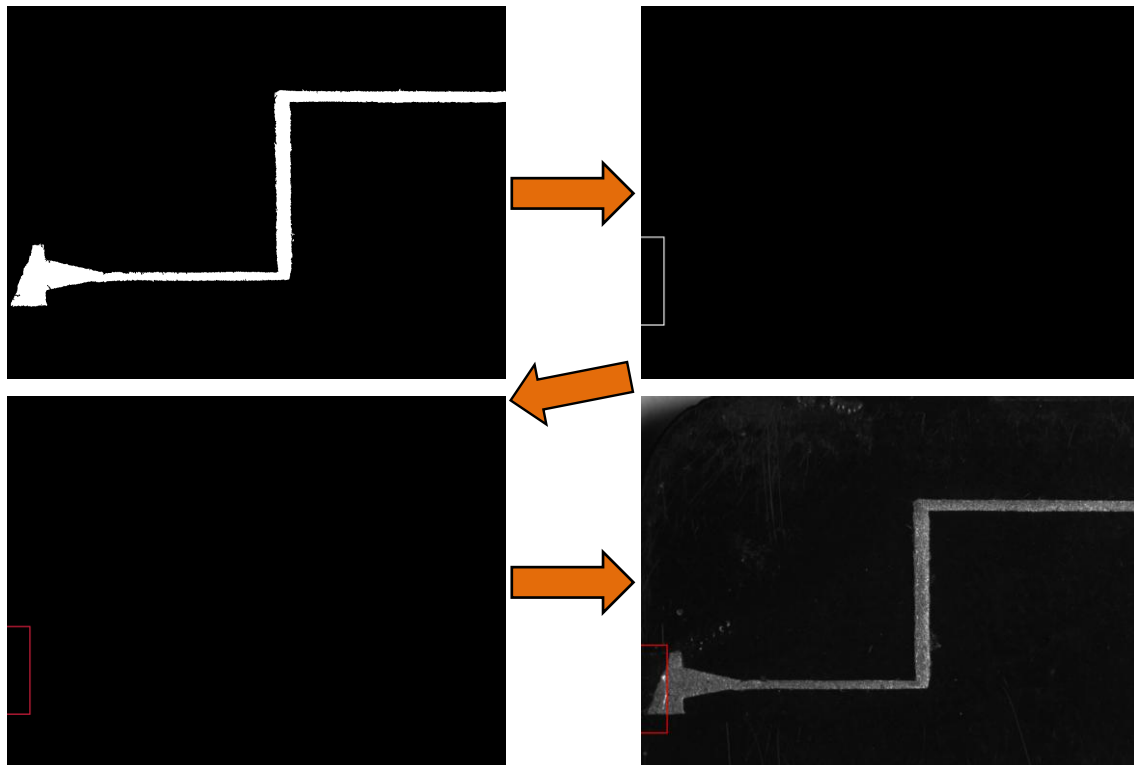


Figura 3.25 Ejemplo de la evolución de una imagen binarizada en el proceso de defectos en los extremos

Por otro lado, los defectos intermedios implica la falta de material en pista. Dicho módulo se aplica a las cuatro capturas de cada pista. Y se han distinguido dos tipos, microcortes y cortes profundos que atraviesan toda la pista. Aunque ambos implican falta de material, solamente el caso de un corte que atravesase/divida la pista implica una no continuidad.

Este proceso en primer lugar, detecta falta de material por comparación entre la captura binaria tratada y sin tratar, el cual se identifica en rojo y si además, esta falta de material supone un corte que divide la pista en dos partes o más, serán enmarcados para indicar que supone un defecto que implica no continuidad. El siguiente flujograma resume la lógica implementada para la detección de estos defectos, seguido de un ejemplo (véase Figura 3.27).

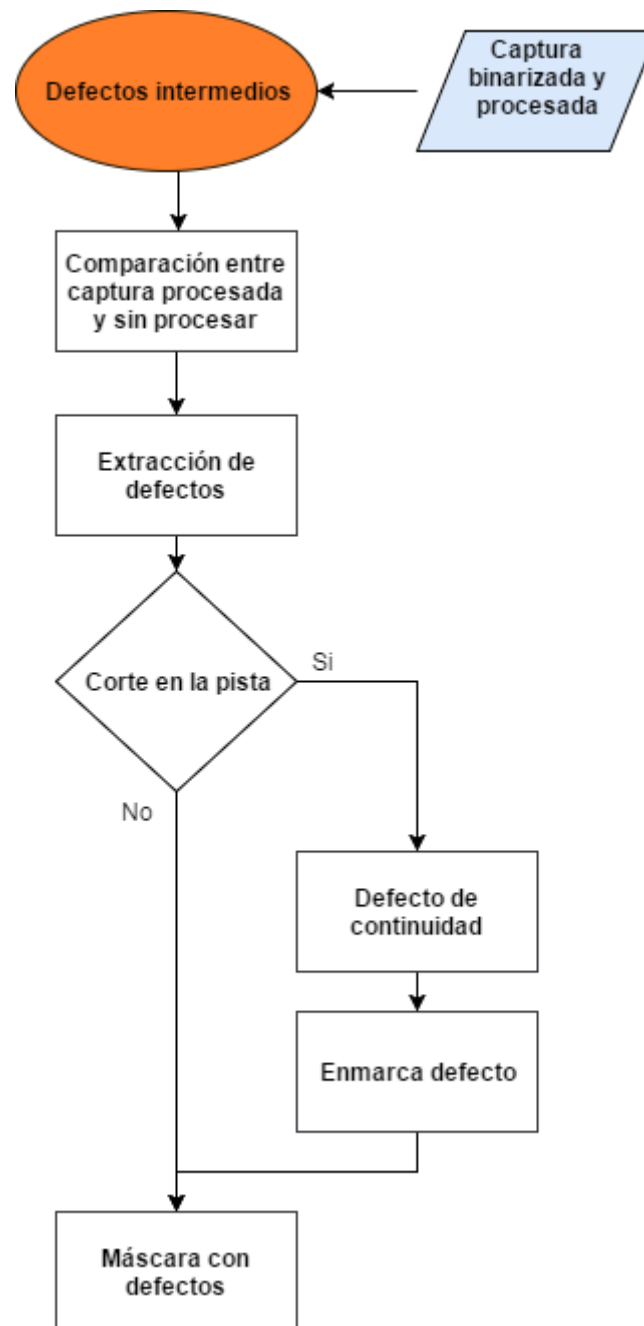


Figura 3.26 Flujograma detección de defectos intermedios

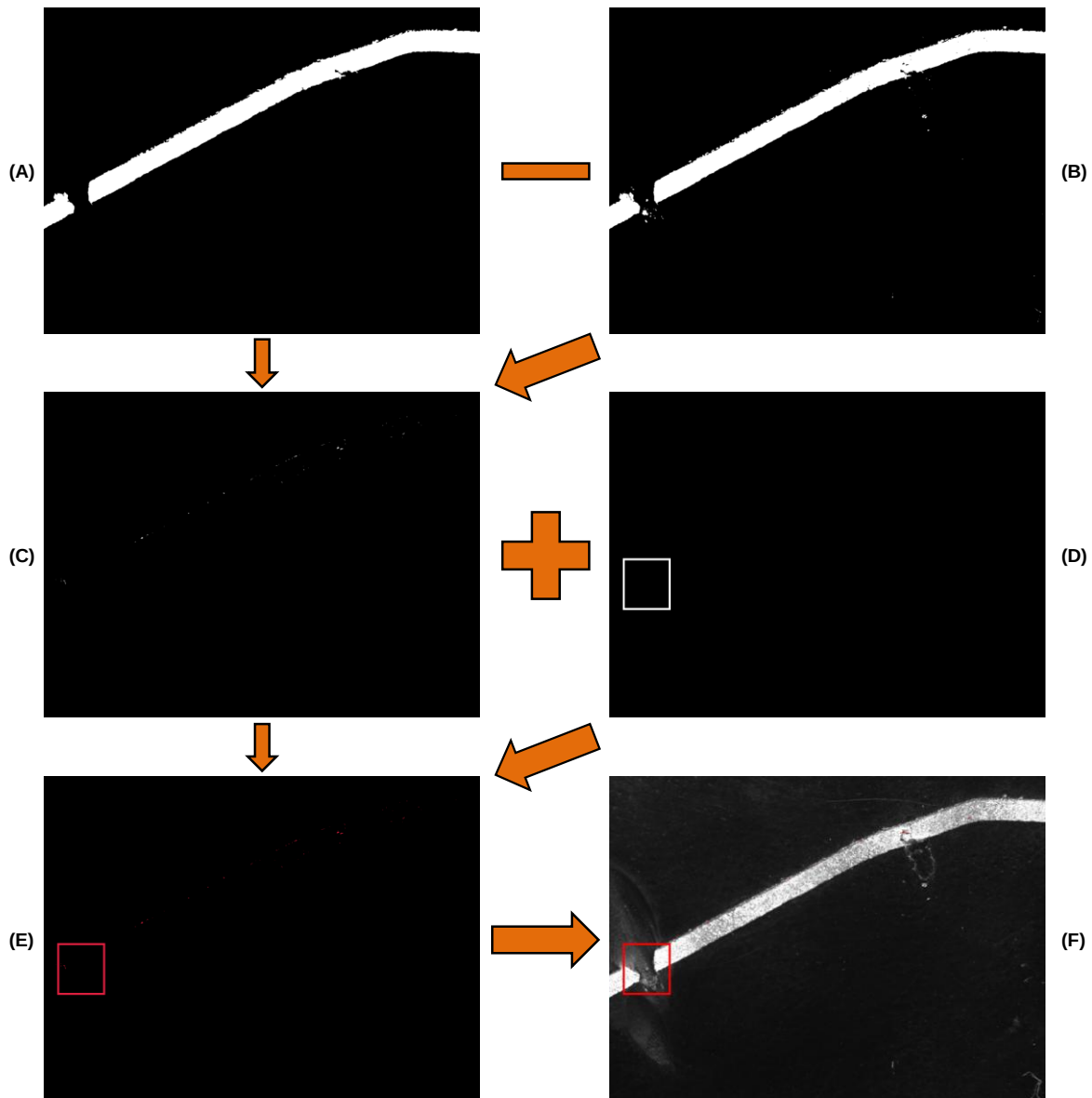


Figura 3.27 Ejemplo del proceso de defectos intermedios

En el ejemplo anterior la imagen binarizada (B) es comparada con la imagen procesada (A) para extraer los defectos (C). A su vez en la imagen (A) se analiza si la pista está dividida en una o más partes con el comando 'bwlabel' de MATLAB el cual etiqueta las distintas regiones de píxeles y las enumera. Enmarcando estas divisiones (D) para ser sumado con (C) y obtener la máscara total de defectos en rojo (E). Para finalmente superponerla a la captura realizada por la cámara (F).

Como se observa en la última captura (F), de la figura anterior, el algoritmo no es capaz de detectar toda la falta de material correctamente y tampoco es capaz de detectar el exceso de material en la pista. El exceso de

material no está directamente ligado con la continuidad en las pistas de las placas pero sí que puede influir en la conductancia de las mismas. Por lo tanto, se ha desarrollado una versión mejorada del algoritmo, en la cual se realiza una sustracción de defectos por comparación entre las imágenes capturadas y el modelo 2D. No se cuenta con el modelo 2D por lo que se han sustituido por capturas tratadas y reconstruidas con el editor grafico Adobe Photoshop, desarrollado por Adobe Systems Incorporated, para crear máscaras de las pistas (ver Figura 3.28).

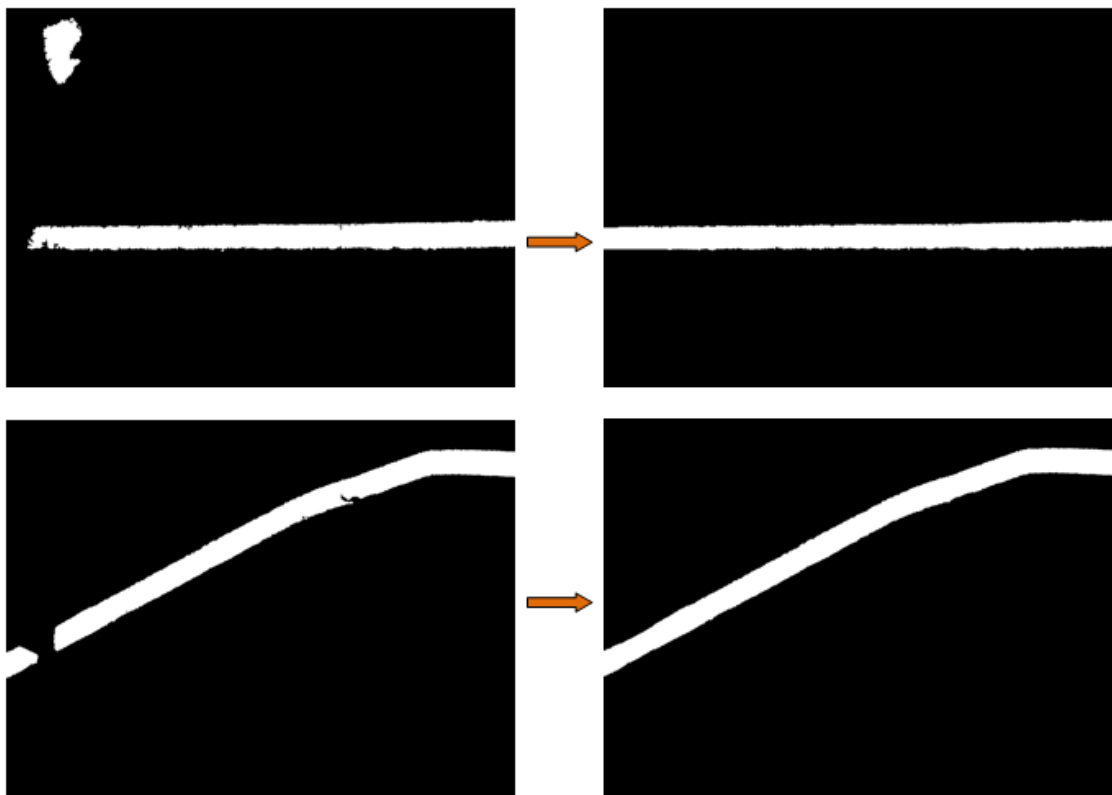


Figura 3.28 Ejemplo de capturas binarizadas (izquierda) y reconstruidas (derecha)

El segundo ejemplo de la figura anterior es el mismo que el ejemplo de la Figura 3.27, y a continuación se observa como mejora notablemente el algoritmo con el mismo ejemplo una vez más.

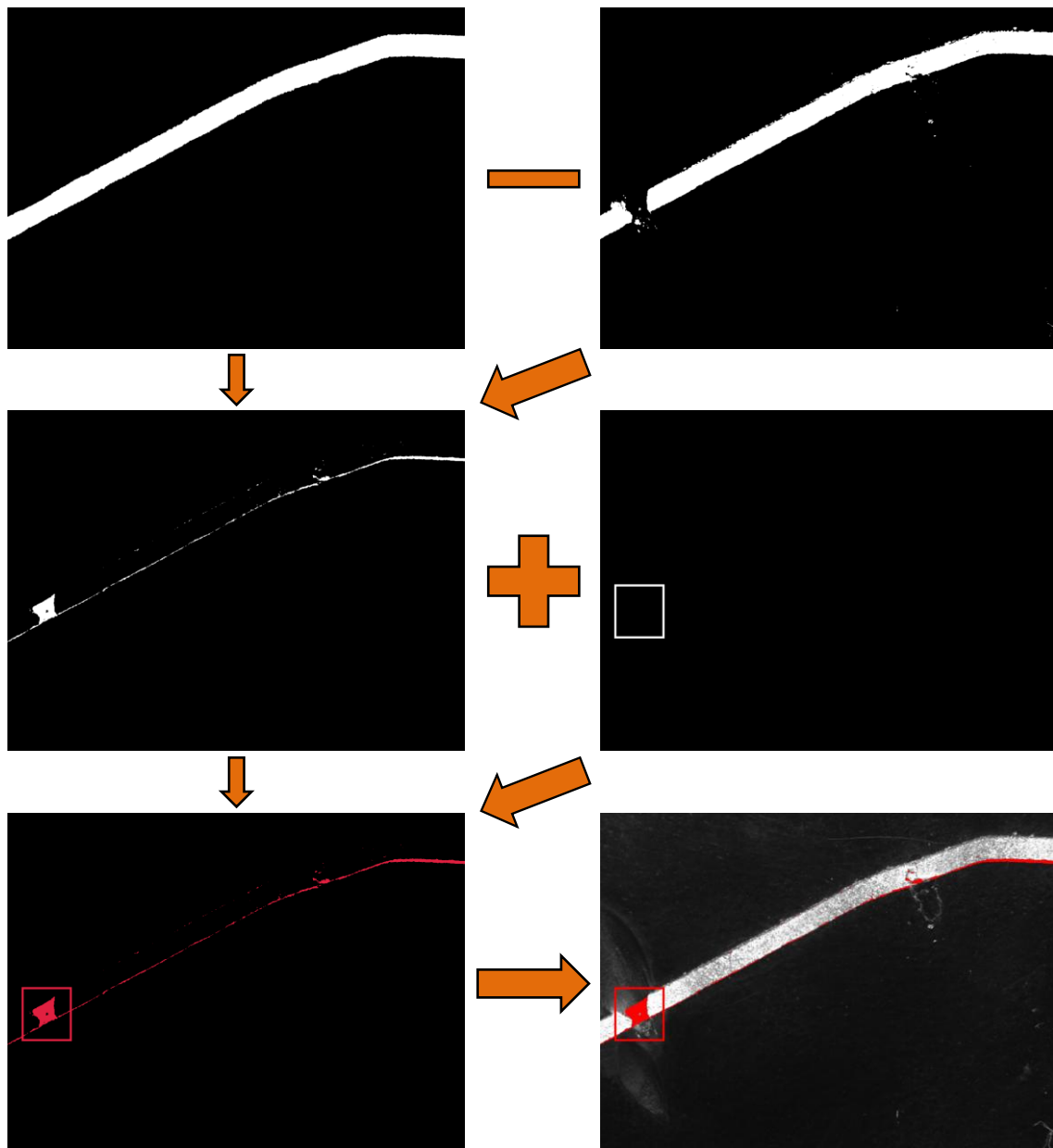


Figura 3.29 Ejemplo de mejora del proceso defectos intermedios

En el apartado de resultados de este proyecto se pueden observar mas ejemplo de mejora del algoritmo, teniendo en cuenta que esta última versión si es capaz de detectar el exceso de material en la pista.

Por último el algoritmo con la versión mejorada capaz de detectar defectos de continuidad, escasez de material y exceso de material se implementa junto al control de la cinta transportadora y cámara en un primer prototipo de interfaz software de usuario llamado Interfaz de usuario - Análisis de pistas serigrafiada. En la siguiente figura se observa la ventana principal de dicha interfaz.



Figura 3.30 Ventana principal de Interfaz de usuario - Análisis de pistas serigrafiada

En primer lugar, en la parte inferior izquierda de la interfaz da la opción de introducir el número de placa y seleccionar en una lista entre las pistas uno, dos o tres, estas dos opciones son necesarias para que el programa de forma automática, nombre las distintas capturas realizadas en el momento de ser guardadas, en una base de datos para futuras revisiones de dichas placas.

Estas capturas se realizan de forma automática en un proceso que comienza al pulsar 'Comenzar análisis'. El proceso realiza el desplazamiento de la cinta transportadora a cuatro posiciones fijas que corresponde a las cuatro capturas en que se divide a la pista. Una vez, se han realizado estas cuatro capturas la cinta desplaza la probeta a la posición inicial de partida. Por último se muestra en pantalla en una ventana nueva el análisis completo de dicha pista con el algoritmo defectos de continuidad (ver Figura 3.31).

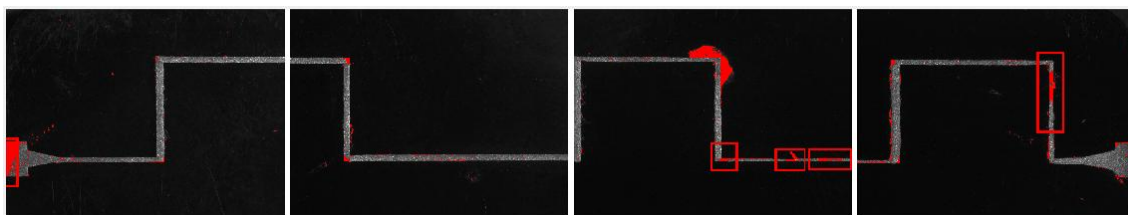


Figura 3.31 Ejemplo de análisis de una pista

Por último, las opciones de número de placa y número de pista junto a la opción de seleccionar parte, en una lista de cuatro posibilidades, correspondientes a las cuatro capturas realizadas por pista, son necesarias para escoger la captura de la placa que se quiere mostrar en la pantalla para un análisis más aislado de una captura concreta. Este análisis se realiza pulsando una de las opciones de 'Defectos de continuidad', 'Falta de material' y 'Exceso de material' situadas en la parte derecha de la ventana principal de la interfaz.

'Defectos de continuidad' muestra el análisis completo del algoritmo con el mismo nombre, mientras que 'Falta de material' y 'Exceso de material' indican en rojo, la escasez o exceso de material, respectivamente, de la pista en la captura seleccionada. A continuación se muestra un ejemplo de la interfaz una vez pulsado 'Exceso de material'.

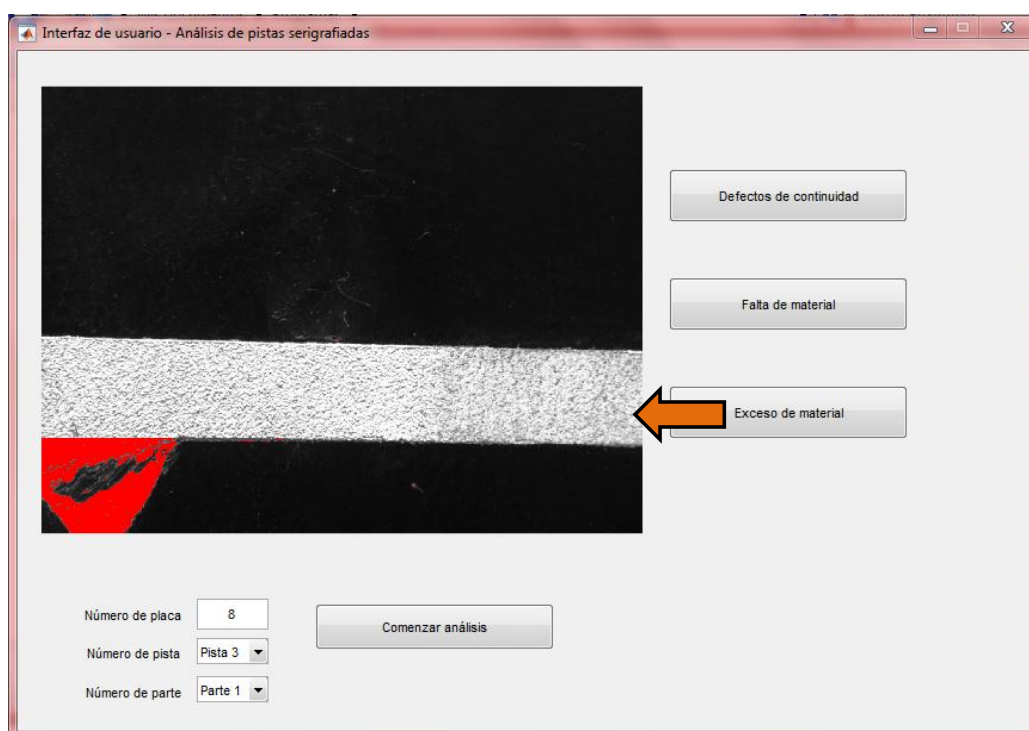


Figura 3.32 Ejemplo de la interfaz de usuario al pulsar 'Exceso de material'

4. RESULTADOS

En este apartado se muestran y describen los resultados obtenidos en los ensayos, empleando las distintas tecnologías.

4.1. Termografía activa

Se han realizado distintos ensayos con esta tecnología dependiendo del foco externo de calor como ya se menciona en el apartado metodología de este proyecto.

En primer lugar, con objeto de testear cómo con una cámara térmica se puede ver la diferencia de temperatura entre las pistas y el resto de la placa se hizo el ensayo de inducir una pequeña corriente eléctrica en cada pista con una fuente de alimentación (véase Figura 4.1). Nunca superando una corriente eléctrica de un amperio.

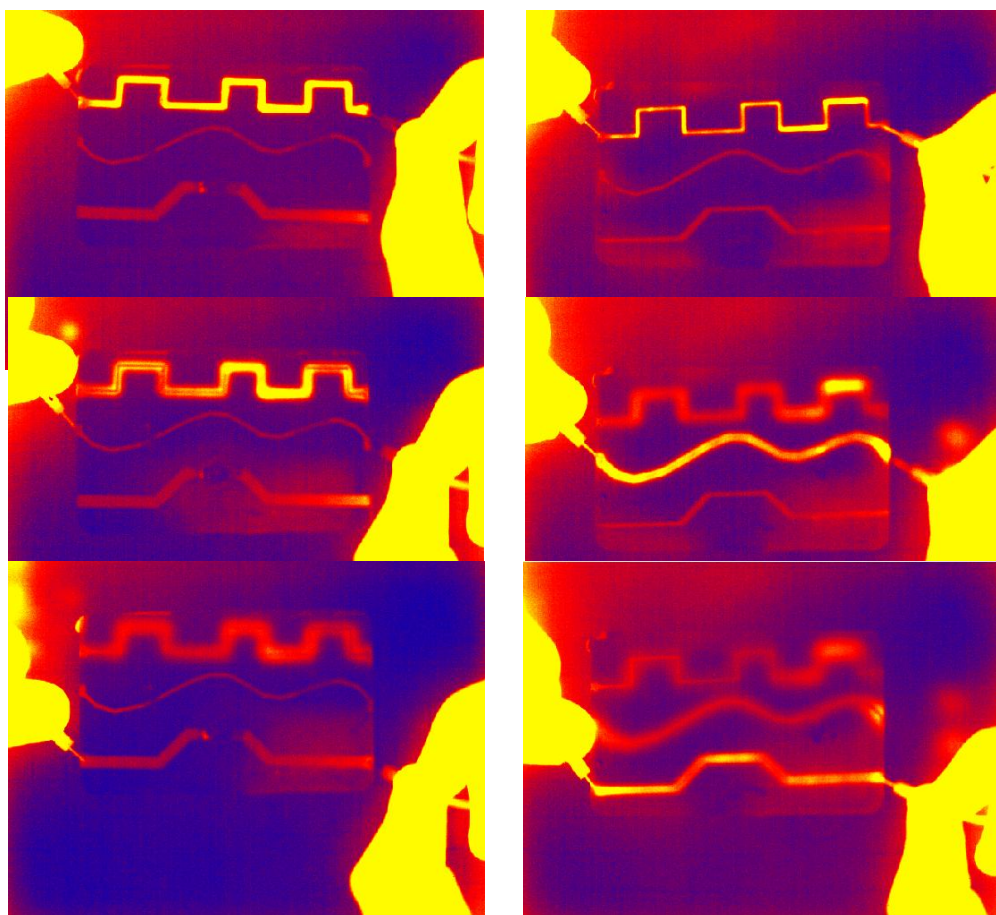


Figura 4.1 Ejemplo de inyección de corriente eléctrica a las pistas de dos placas distintas

Se observa con claridad, las pistas que conducen electricidad y a su vez calor e igualmente las que no son capaz de realizarlo.

Por lo tanto se utiliza el foco halógeno como excitador térmico, para calentar el extremo de la probeta uniformemente y analizar en el tiempo, la propagación de calor hasta el otro extremo ya que el cobre o el estaño tienen mayor conductividad térmica que el resto de la probeta.

El resultado no fue el esperado, como se aprecia en la parte izquierda de la Figura 4.2. La parte plástica de las probetas se calienta antes que las propias pistas por lo que es prácticamente imposible poder evaluar la propagación de calor en ellas, ni por tanto poder analizar la continuidad de las mismas adecuadamente o apreciar defectos en dichas pistas.

Teniendo en cuenta estos resultados negativos se consideró la posibilidad de poder transmitir el calor generado por el halógeno a través de impulsos en lugar de hacerlo de forma continuada. Para ello se le conectó al halógeno un relé, controlado a través de un microcontrolador. Tratando de apreciar una diferencia significativa entre las pistas y el resto de la placa, pero en contra se obtiene nuevamente resultados no satisfactorios, parte derecha de la Figura 4.2.

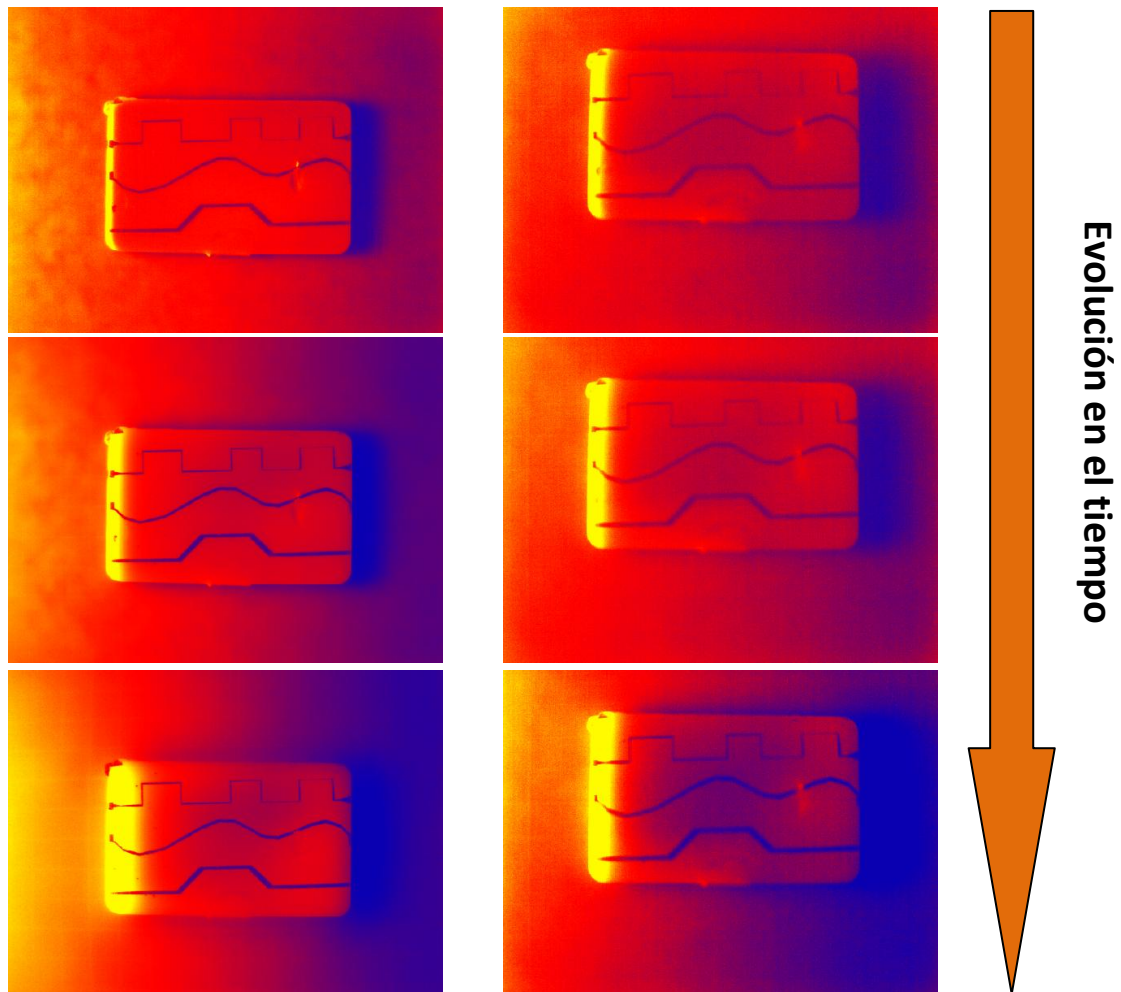


Figura 4.2 Resultados termografía con foco halógeno (izquierda) y resultados termografía con foco halógeno y relé (derecha)

Por lo tanto, se puede concluir que al menos la técnica de termografía en la que el excitador térmico es un foco halógeno no es una solución adecuada para la detección de la continuidad en las pistas serigrafiadas.

Por otro lado se han realizado ensayos con un soldador como fuente externa de calor, próximo a una pista, pero la alta temperatura del soldador contamina la escena, e igualmente no se aprecia diferencias significativas de conductividad térmica en la pista serigrafiada (ver Figura 4.3).

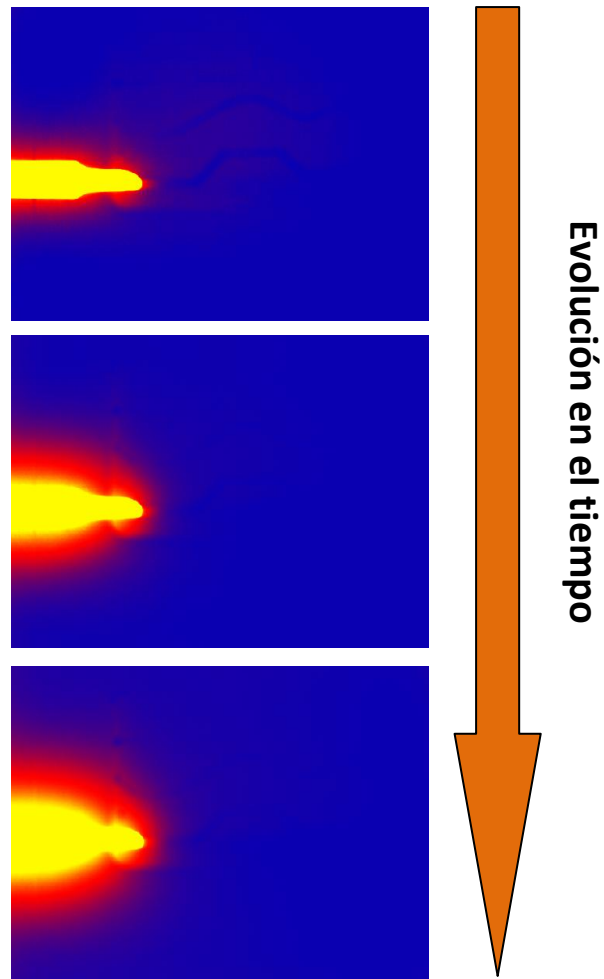


Figura 4.3 Resultados termografía con soldador

4.2. Perfilometría láser

Este apartado analiza los resultados obtenidos al realizar ensayos con esta tecnología sobre tres placas distintas con distintos defectos para extraer conclusiones.

Se analiza la probeta número 2, con defectos en la pista 1 y 2 señalados en rojo Figura 4.4. Como se puede observar los defectos antes mencionados son detectados por el sistema pero, también se aprecian zonas con defectos no reales, señalados con signos de interrogación (ver Figura 4.5)

RESULTADOS



Figura 4.4 Fotografía de la probeta número 2

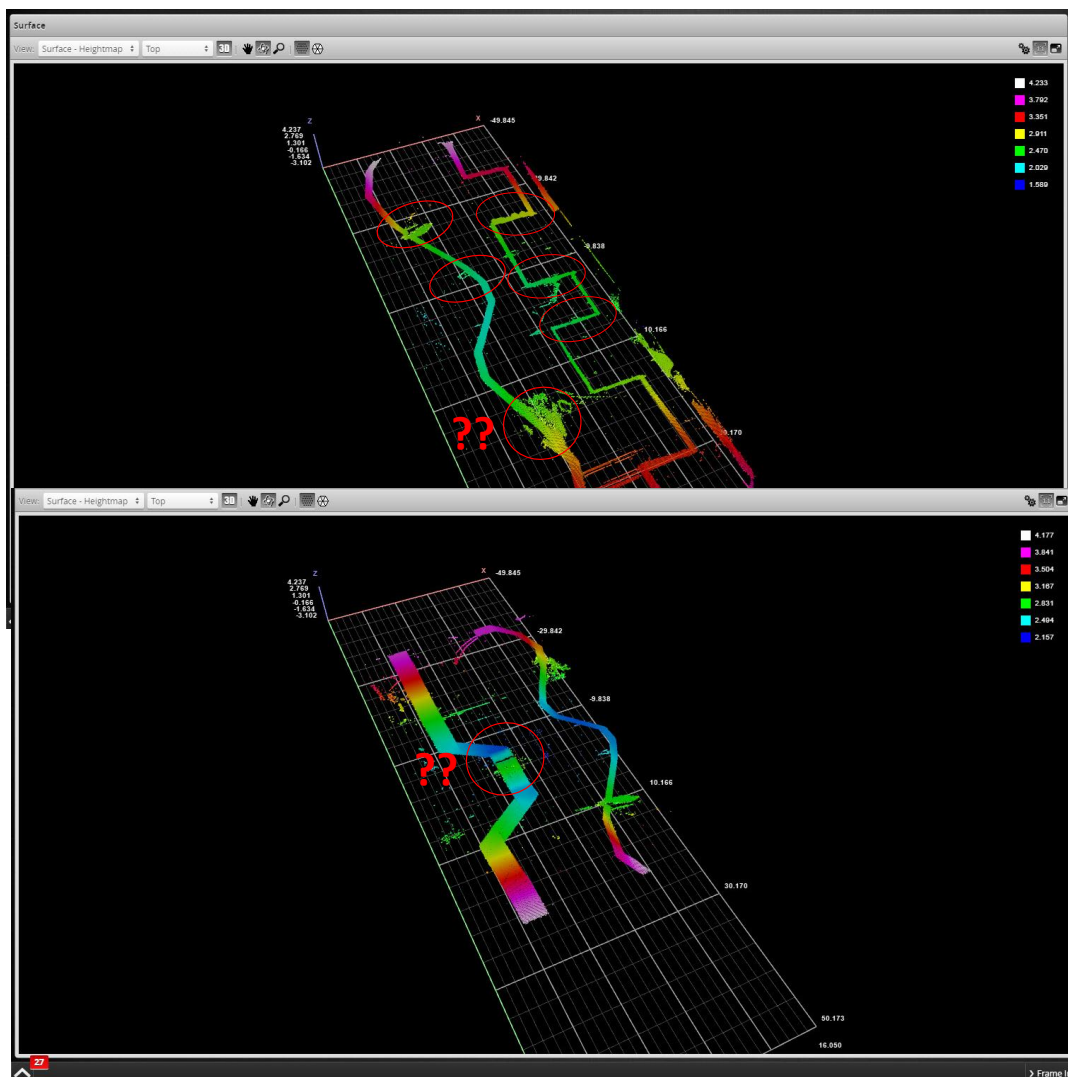


Figura 4.5 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 2

También se ha analizado la probeta número 6 con los siguientes defectos (véase Figura 4.6). En este caso, procesando la imagen 3D se pueden localizar correctamente los defectos, Figura 4.7

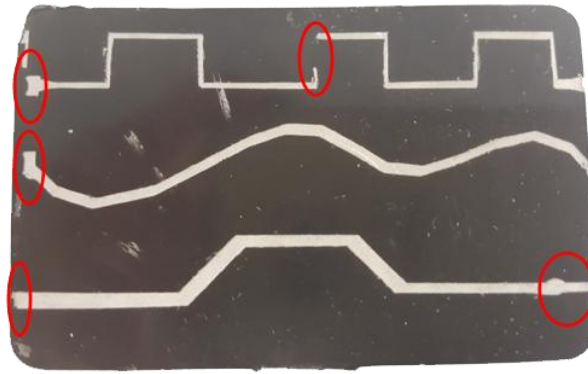


Figura 4.6 Fotografía de la probeta número 6

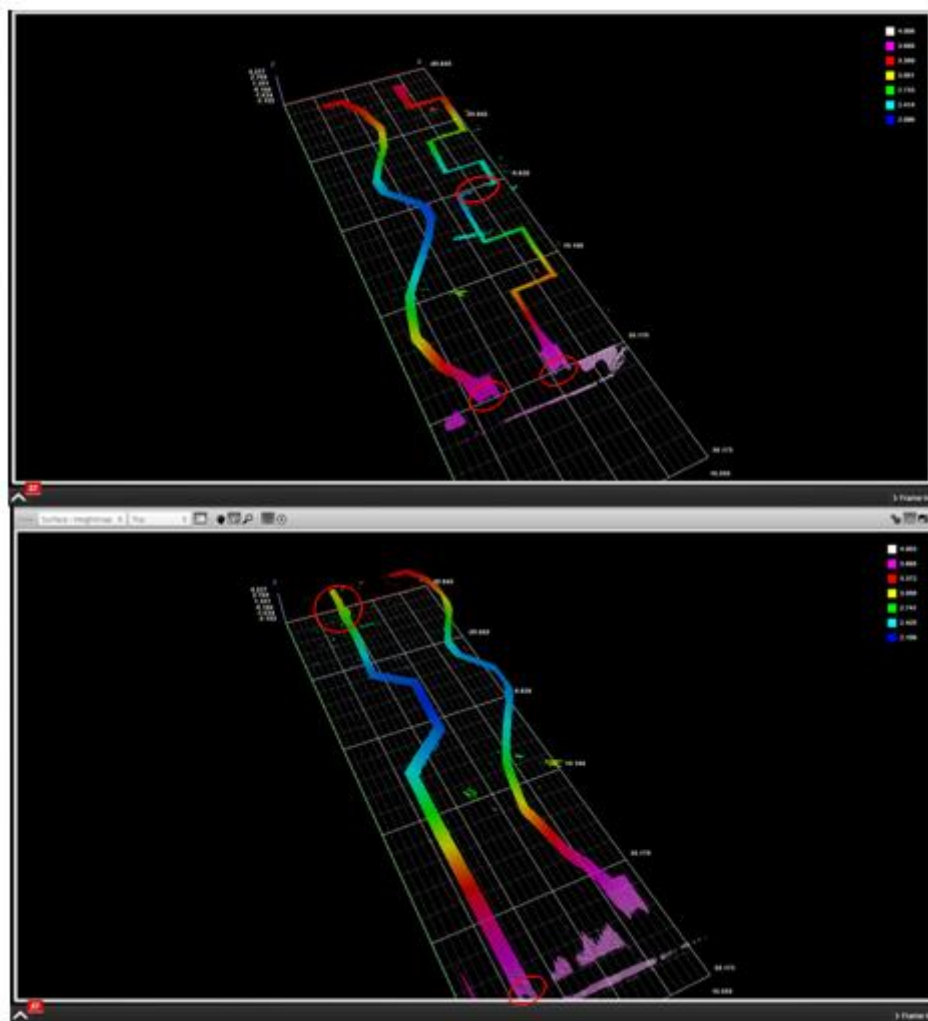


Figura 4.7 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 6

Por último se ha analizado la probeta número 9 (véase Figura 4.8). Como se puede observar en la Figura 4.9, en el análisis 3D de esta placa no detecta las zonas críticas/defectos.

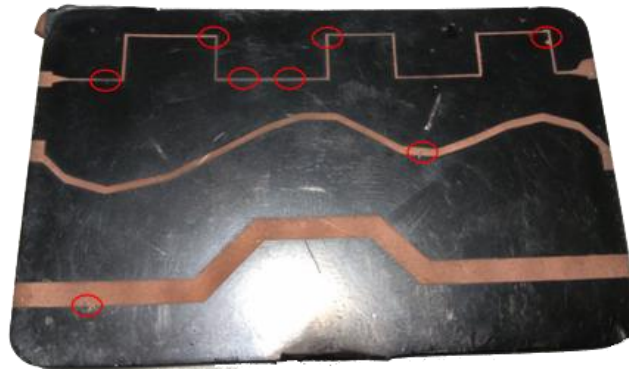


Figura 4.8 Fotografía de la probeta número 9

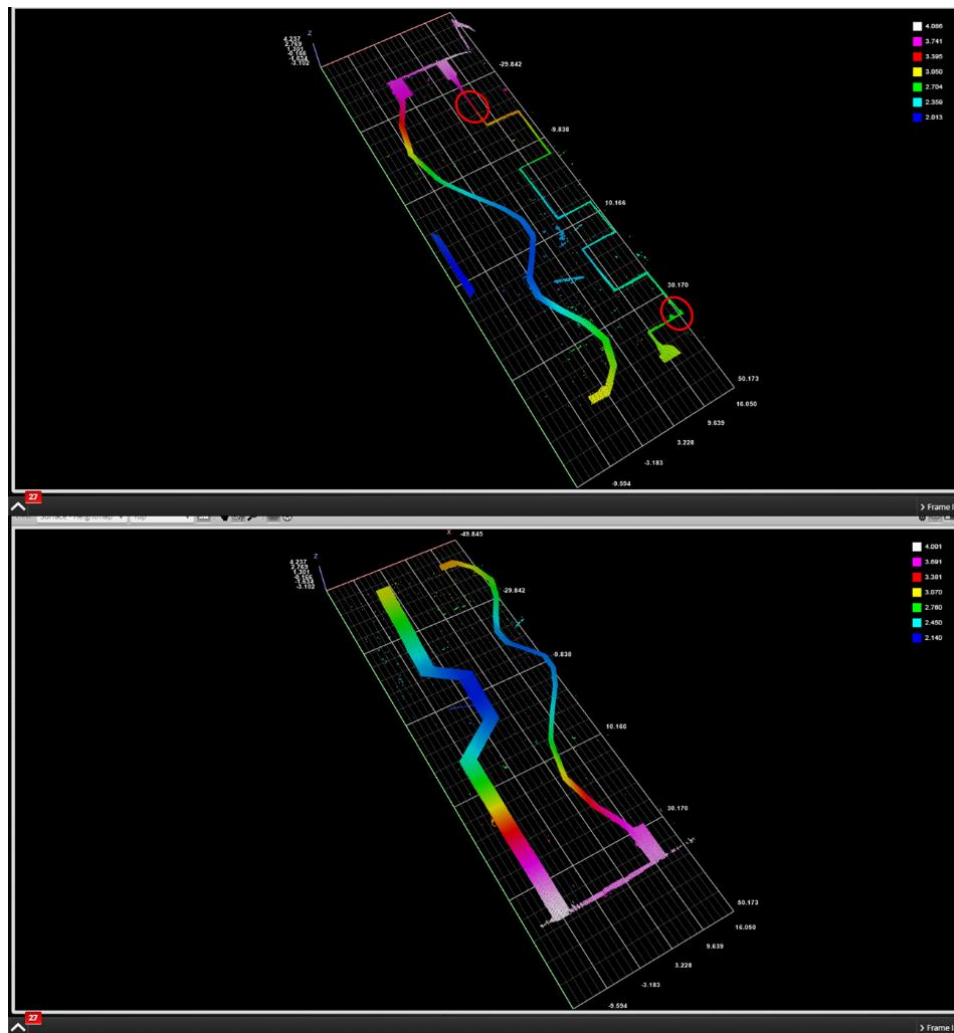


Figura 4.9 Imágenes 3D obtenidas por Gocator 2420 para la probeta número 9

Por lo tanto teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los tres casos, algunos defectos son detectados pero en cambio otros no, dándose además situaciones en las que se detectan falsos positivos. En este sentido, pese a que el sensor facilita información en 3D que a priori apunta a que puede solventar el problema de calcular la superficie y de esa manera tener información sobre la

resistencia (R) y por tanto de la conductancia, en la práctica ofrece resultados muy similares a los que se obtienen por visión por computador convencional. Es más, dichas imágenes facilitadas por el sensor tienen que ser procesadas con técnicas de visión por computador para detectar los defectos.

4.3. Visión por computador 2D en el espectro visible

Este apartado describe el conjunto de resultados obtenidos con esta tecnología. Dividido en los resultados obtenidos con el algoritmo de detección de defectos de continuidad en las pistas y el análisis del grosor de las pistas relacionado con la resistencia de estas mismas.

En primer lugar, cabe mencionar que algoritmo fue mejorado con ayuda de utilizar mascarar de las imágenes capturadas para sustraer defectos por comparación. A continuación se observa como mejora el sistema con un ejemplo.

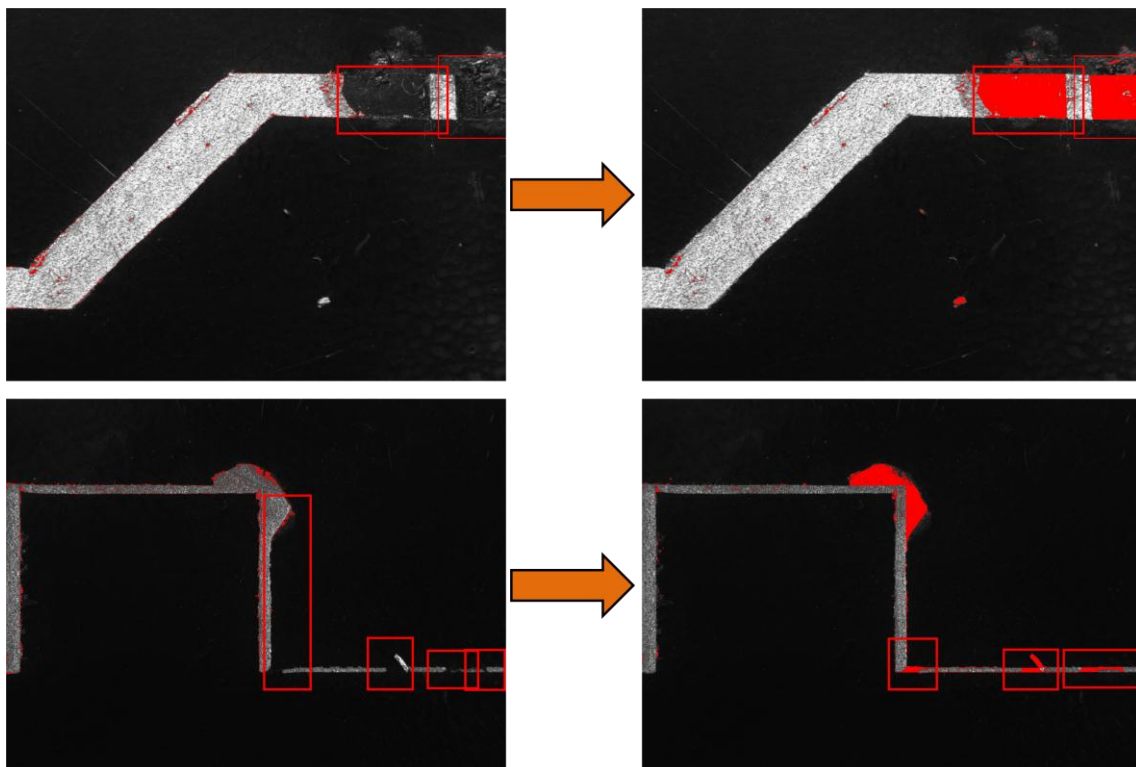


Figura 4.10 Identificación de defectos de continuidad sin modelo 2D y con modelo 2D respectivamente

Se han analizado once probetas de ensayo con esta tecnología y comparado los resultados con la continuidad de las pistas dadas por un

polímetro. La siguiente tabla resume la tasa de acierto de la detección de no continuidad. Los resultados son satisfactorios cuando la pista es 100% de estaño o 75% Cobre y 25% Estaño, la tasa de acierto es prácticamente del 100%. Únicamente la pista 3 de la placa número 2 (resaltada en rojo) presenta un falso negativo. Esta pista tiene LED por lo que en su correcto funcionamiento dicha pista no debe tener conductancia. El inconveniente del sistema actual es que con el algoritmo se aprecia que hay continuidad en la pista, y al tratarse de imágenes 2D el prototipo actual no distingue entre pista y LED.

La tasa de acierto disminuye para las placas 100% de cobre. Se han marcado en rojo dos casos de presencia de LED y cuatro situaciones en rojo en el que visualmente no hay defecto (véase Figura 4.11) pero el polímetro indica que no hay conductancia. Destacar que el caso de la pista 3 de la probeta número 8 pese a tener LED coincide el diagnóstico dado que también tiene cortes en el extremo e interiores.

Probeta	Material	Pista	Continuidad	
			Polímetro	Algoritmo
1	75% Cu-25% Sn	1	No	No
		2	No	No
		3	Si (LED)	Si (LED)
2	75% Cu-25% Sn	1	Si	Si
		2	No	No
		3	No (LED)	Si (LED)
3	75% Cu-25% Sn	1	No	No
		2	No	No
		3	No	No
5	100% Sn	1	No	No
		2	Si	Si
		3	No	No
6	100% Sn	1	No	No
		2	No	No

RESULTADOS

		3	No	No
7	100% Sn	1	No	No
		2	Si	Si
		3	No	No
8	100% Sn	1	No	No
		2	No	No
		3	No (LED)	No (LED)
9	100% Cu	1	No	No
		2	No	Si
		3	No	Si
10	100% Cu	1	No	No
		2	No	Si
		3	Si	Si
11	100% Cu	1	No	No
		2	No	Si
		3	No (LED)	Si (LED)
12	100% Cu	1	No	No
		2	No	Si
		3	No (LED)	Si (LED)

Tabla 4.1 Análisis de resultados obtenidos con el algoritmo de detección de no continuidad

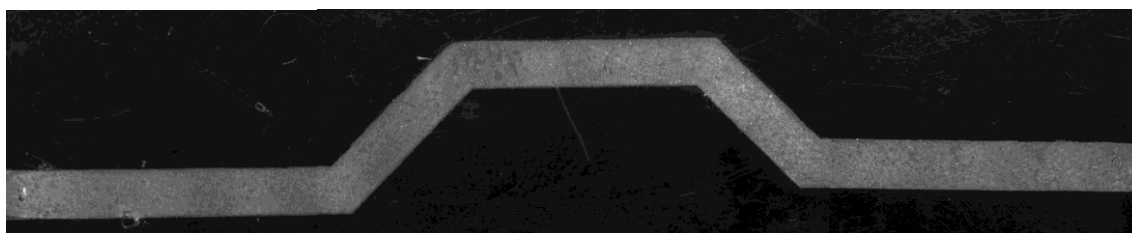


Figura 4.11 Ejemplo de falso negativo en la detección de defectos de continuidad (probeta número 9 pista 3)

Por otro lado, como se menciona en el apartado metodología de este TFG, una posible alternativa para solventar los falsos negativos en los que la pista visualmente no tiene ningún defecto pero si se mide con un polímetro la

conductancia es nula, es el análisis de correlación entre el grosor de la pista y su resistencia.

Dado que con técnicas de visión 2D no se puede obtener la característica del espesor (que en estas pistas es de orden de micras), se analiza si existe una correlación entre la anchura promedio de las pistas y la resistencia de las especificaciones de las probetas dadas en la Tabla 3.1 de este TFG.

No se analizan las pistas sin resistencia incluidas aquellas con LED, a su vez se separan por el material de fabricación, ya que para cada una de ellas cambia el valor de la resistividad. Se han tomado ocho medidas aleatorias del grosor en cada pista para realizar el promedio, la siguiente tabla muestra el espesor promedio de dichas pistas y su resistencia, y a continuación se muestra la tendencia en graficas (véase Figura 4.12), a menor grosor mayor resistencia como se deduce por la Ec. 3 de este proyecto.

Probeta	Material	Pista	Grosor promedio (píxeles)	Resistencia (Ω)
1	75% Cu-25% Sn	1	26	5,6
		2	47	3,1
2	75% Cu-25% Sn	1	38	5,2
		2	69	2,1
3	75% Cu-25% Sn	1	30	8,8
		2	75	2,1
		3	90	1,1
5	100% Sn	1	22	4,6
		2	75	0,7
		3	229	0,15
6	100% Sn	2	94	0,5
		3	128	0,4
7	100% Sn	1	57	1,4
		2	100	0,5
8	100% Sn	2	24	2

9	100% Cu	2	71	278,5
		3	220	41,5
10	100% Cu	2	62	62
		3	223	10,1
12	100% Cu	2	70	13,9

Tabla 4.2 Relación entre grosor y resistencia de las especificaciones

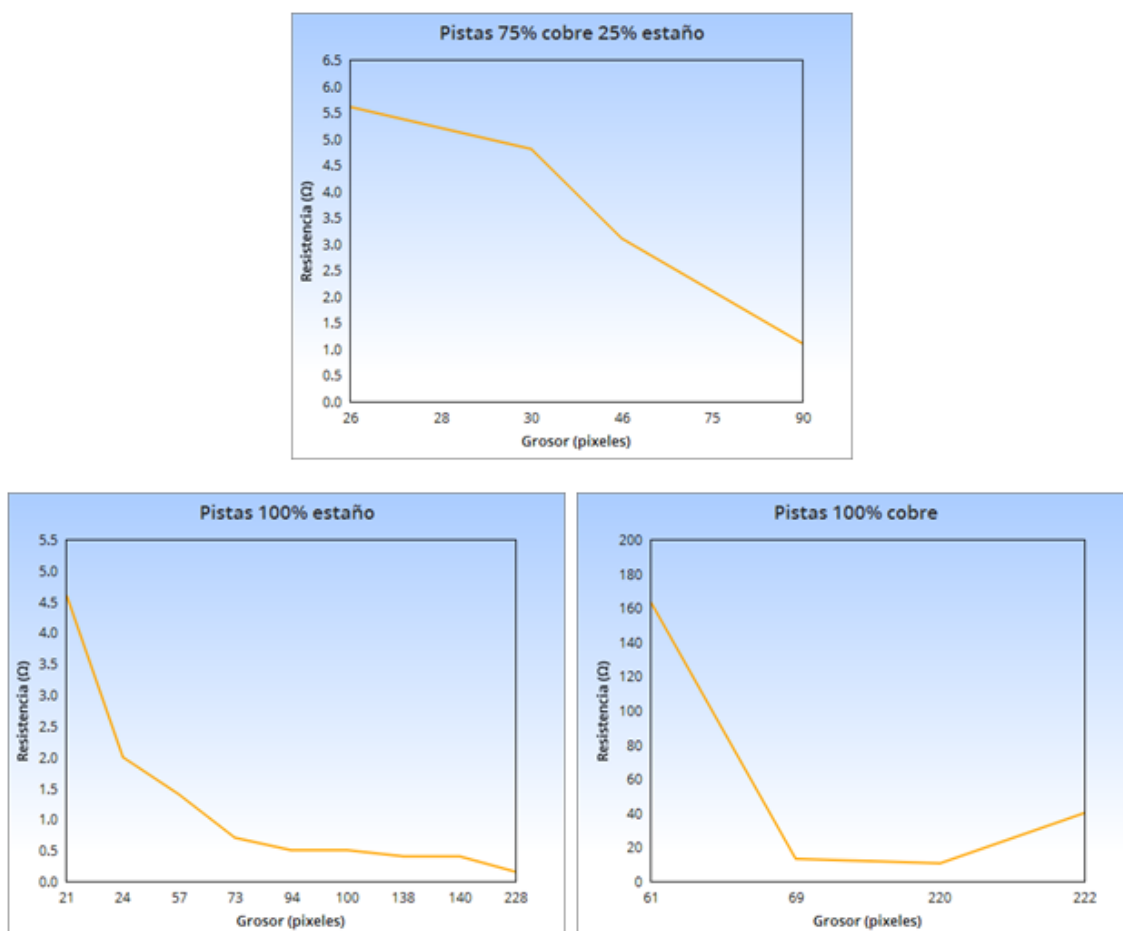


Figura 4.12 Resistencia eléctrica en función del grosor

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El sistema de visión por computador ha obtenido los mejores resultados en comparación con las tecnologías de termografía activa y perfilometría láser.

La termografía no ha dado resultados adecuados, ya que no se aprecian temperaturas más altas en las pistas que en el resto de la placa, esto se debe a

que la superficie de las pistas es mucho menor a la superficie de la placa, por lo tanto no se ha sido capaz de resolver el objetivo principal de comprobar la conductividad térmica de las pistas y por lo tanto la conductividad eléctrica.

La perfilometría láser, pese a que es capaz de realizar mediciones en 3D de la pista, al tratarse de espesores de micras y la propia forma de la placa influye en que, la medición no sea tan precisa como se requiere. Además, las imágenes adquiridas por el sensor 3D (Gocator 2420) tienen que ser procesadas con técnicas de visión por computador similares a las utilizadas en visión por computador convencional. Por lo tanto no es la tecnología más adecuada para detectar defectos de conductancia en las probetas de ensayo.

Como se ha mencionado visión por computador es la tecnología que mejores resultados da en las pruebas realizadas con las tres tecnologías distintas, además de ser el sistema más económico.

Para un mejor funcionamiento del algoritmo es necesario el modelo 2D de las placas. Por otro lado el algoritmo analiza todas las pistas por igual, esto incluye a las pistas con LED. El sistema o algoritmo pueden ser mejorados y tener en cuenta las pistas con LED, aunque no se puede detectar defectos internos del propio LED con un sistema de visión por computador en el espectro visible.

Este primer prototipo requiere de un operario que realice los cambios de posición de la placa para analizar las distintas pistas de una misma placa, por lo tanto cabe una mejoría en el sistema de desplazamiento de las probetas con movimientos automáticos en dos ejes perpendiculares, para realizar todas las capturas de las tres pistas de forma automática.

Como líneas de continuación de este trabajo de investigación, se propone realizar ensayos en termografía activa con láseres utilizados como excitadores térmicos sobre las pistas serigrafiadas. También continuar con la correlación entre grosor y resistencia con más muestras para finalmente diseñar algoritmos que calculen las resistencias de las pistas serigrafiadas sin contacto.

Por otro lado, dentro de las tecnologías END se encuentran otras posibilidades que pueden ser analizadas y comparadas con las descritas en este TFG.

Para finalizar, en el ámbito personal y académico este trabajo fin de grado, ha resultado ser una fuente de aprendizaje de conocimientos nuevos, y ha reforzado los adquiridos en la carrera.

Además, ha supuesto conocer un entorno laboral con las ventajas de, aprender del ingenio y experiencia de profesionales en mi mismo campo laboral y familiarizarse con equipos avanzados y especializados de este mundo laboral de la ingeniería electrónica industria.

6. PRESUPUESTO

A continuación se realiza una descripción de los costes económicos de los materiales necesarios para llevar a cabo el sistema de visión por computador convencional, tanto la parte de hardware como de software. Así como una estimación de las horas necesarias para el desarrollo del sistema.

6.1. Cuadro de precios

Código	Ud. Resumen	Cantidad	Precio	Total
UD001	Cámara Mako G125			
	Cámara Mako G-125			
	PoE 1/3" 1292x964.	1	466,83€	466,83€
UD002	Foco LED			
	Foco LUXE LED 20W 220V			
	LUZ FRÍA 600mA.	1	45,00€	45,00€

Código	Ud. Resumen	Cantidad	Precio	Total
UD003	Servomotor			
	Schneider Electric			
	BSH0553P11A2A.	1	571,66€	571,66€
UD004	Servovariador Lexium 32M			
	Schneider Electric			
	LXM32MU45M2.	1	554,49€	554,49€
UD005	Soporte probetas			
	Soporte de plástico.	1	20,20€	20,20€
UD006	PC completo			
	Computador, pantalla,			
	teclado y ratón.	1	496,10€	496,10€
UD007	Tarjeta de red			
	Tarjeta de Red NIC PCI Express			
	PCI-e 4Puertos Gigabit Ethernet			
	RJ45.	1	299,99€	299,99€
UD008	Lente óptica			
	Lente óptica 35 mm.	1	224,14€	224,14€
UD010	Anillo extensor			
	Pack 6 anillo extensor.	1	108,60€	108,60€
UD011	Perfil aluminio			
	Perfil 5, 1m.	4	2,09€	8,36€

Código	Ud. Resumen	Cantidad	Precio	Total
UD012	Panel blanco			
	Panel blanco de cartón duro 50x50 cm.	4	3,00€	12,00€
UD013	Cable Ethernet			
	Cable Ethernet Lan 10000Mbit/s 1m.	3	2,10€	6,30 €
UD014	Licencia MATLAB			
	Software de control.	1	2000,00€	2000,00€
UD015	Image Acquisition Toolbox			
	Herramienta de adquisición de imágenes para MATLAB.	1	1000,00€	1000,00€
UD016	Image Processing Toolbox			
	Herramienta de procesado de imágenes para MATLAB.	1	1000,00€	1000,00€
			TOTAL	6813,67 €

6.2. Estimación horas empleadas

Este apartado expresa una estimación de las horas empleadas para el desarrollo del sistema de visión por computador. Se tienen en cuenta las horas empleadas en el diseño hardware, montaje del Setup del sistema, el diseño software, todas las horas empleadas en realizar pruebas a lo largo del desarrollo completo y una vez terminado el prototipo y las horas de realización de esta memoria.

Código	Resumen	Cantidad
H001	Horas diseño hardware	20
H002	Horas montaje setup	10
H003	Horas diseño software	90
H004	Horas realización de pruebas	65
H005	Horas realización de la memoria	55
TOTAL		240 horas

6.3. Resumen presupuesto

El presupuesto material del proyecto asciende a la expresada cantidad de SEIS MIL OCHOCIENTOS TRECE EUROS con SESENTA Y SIETE CÉNTIMOS.

7. REFERENCIAS

- [1] «Ensayos no destructivos,» [En línea]. Available: <https://chirinossilveroer.files.wordpress.com/2012/05/trabajo-de-ensayos-no-destructivos.pdf>.
- [2] PI.T.Knowledge, «Dossier de termografía,» [En línea]. Available: http://www.pitkgroup.com/wp-content/uploads/docs/aplicaciones_de_la_termografia.pdf.
- [3] «Álava Ingenieros,» [En línea]. Available: http://www.pitkgroup.com/wp-content/uploads/docs/aplicaciones_de_la_termografia.pdf /.
- [4] A. R. Galván, «Sistema automático de inspección de deformaciones,» [En línea]. Available: <https://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2013/TesisArturoRedondo.pdf>.
- [5] «Infaimon, Visión artificial,» [En línea]. Available: <http://www.infaimon.com/es/>.
- [6] L. T. INC., «LMI TECHNOLOGIES,» [En línea]. Available: <http://lmi3d.com/products/gocator/g2/2400-series/laser-line-profile-sensors>.

REFERENCIAS

- [7] S. Electric, «Datasheet Servomotor BSH,» [En línea]. Available: http://www.orbitmotion.com/Downloads/GFG_Servo_VFD/BSH_Manual_V203_EN.pdf.
- [8] S. Electric, «Datasheet Servodrive LXM32A,» [En línea]. Available: http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/240000/FA240794/pl_PL/lxm32a_manual_v100_en.pdf.
- [9] S. Electric, «Schneider Electric,» [En línea]. Available: <https://www.schneider-electric.es/es/>.
- [10] SOLIDWORKS, «Web oficial SOLIDWORKS,» [En línea]. Available: <http://www.solidworks.es/sw/products/solidworks-products-adwords.htm?mktid=7773&gclid=CKrfp-PXtdQCFQu4GwodLssC0w>.
- [11] Xenics, «Xeneth 2.6,» [En línea]. Available: <http://www.xenics.com/es/xeneth-26>.
- [12] «Manual de usuario Gocator,» [En línea]. Available: https://www.stemmer-imaging.co.uk/media/uploads/vision-systems/lmi/10/106480-Manual_Gocator_2100_2300__2800_Series_zqdyGq0.pdf.
- [13] S. Electric, «Descarga SoMove,» [En línea]. Available: http://www.schneider-electric.com/en/download/document/SoMove_FDT/.
- [14] «MATLAB, Online,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/>.