

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

***Monitorización del proceso de soldadura mediante visión
artificial y fuentes de iluminación láser y LED***

**(Welding process monitoring by means of machine vision and laser and
LED illumination sources)**

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: David Ibáñez Cervera

Octubre – 2012

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN
CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: David Ibáñez Cervera
Director del PFC: Jesús M^a Mirapeix Serrano

Título: “Monitorización del proceso de soldadura mediante visión artificial y fuentes de iluminación láser y LED”

Title: “Welding process monitoring by means of machine vision and laser and LED illumination sources”

Presentado a examen el día: 1 de Octubre de 2012

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Antonio Quintela Incera
Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús M^a Mirapeix Serrano
Vocal (Apellidos, Nombre): José Luis Crespo Fidalgo

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N°
(A asignar por Secretaría)

Agradecimientos

En primer lugar quisiera dar las gracias a mis padres M^a del Carmen y José Antonio por ser los pilares de vida, lo que soy, se lo debo a ellos.

A mis hermanos José María y Raúl por apoyarme y darme ánimos en los momentos que lo necesitaba, y sin duda, quiero agradecer enormemente a mi abuela María por ser la mujer más especial de mi vida.

Quiero también dar las gracias a todo el departamento de fotónica, ya que siempre que lo he necesitado me han aportado su granito de arena, en especial a José que me aportó muchos granitos de arena!

Quisiera a dar las gracias también a; Güitian, Alfonso, Lucio, Walid, Sergio, Lara, Marta, Ismael y al resto de los amig@s de la universidad aunque no os nombre! Por haberme escuchado y ayudado siempre que lo he necesitado, por esos cafés, discusiones,...jajj...

Quiero agradecer al resto de mis amig@s y familiares, tanto de Villanueva como del resto de pueblos o ciudades donde os encontréis, por haber tenido que aguantarme tantas épocas duras de exámenes y haber estado siempre a mi lado.

Finalmente, quiero darte las gracias a ti Jesús, por saber encaminarme con sutileza siempre que lo he necesitado, por tu saber estar y escuchar, por enseñarme, etc. *Eres muy Bueno!!!*

MUCHAS GRACIAS A TOD@S POR FORMAR PARTE DE MI VIDA !!!!!!!

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 Contexto	9
1.2 Motivación	11
1.3 Objetivos	12
1.4 Organización del documento	13
2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA	14
2.1 La soldadura	14
2.2 Historia de la soldadura	16
2.3. Estado del Arte en la monitorización en línea de procesos de soldadura..	18
2.3.1 Introducción	18
2.3.2 Técnicas de monitorización	18
2.3.3 Enfoque al sistema de visión artificial	20
2.4 Espectro de luz	21
2.5 Espectrómetros	23
2.6 Estudio comparativo de cámaras de video empleadas	25
2.7 Caracterización de las distintas fuentes de iluminación	28
2.8 Caracterización de los filtros ópticos mediante fuente de luz blanca	34
3 SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL	39
3.1 Introducción	39
3.2 <i>Set up</i> de soldadura	39

3.3 <i>Set up</i> del sistema de visión	42
3.4 Experimentos	44
4 PROCESADO DE DEFECTOS	75
4.1 Introducción	75
4.2 Sistema de procesado	75
4.3 Procesado de soldadura sin defectos	77
4.4 Procesado de soldadura con defectos	79
5 CONCLUSIONES	93
5.1 Líneas futuras	94
ANEXO	95
BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Ejemplo del cabezal o boquilla de soldadura TIG durante el proceso.
- Figura 2.2 - Ejemplo del proceso de soldadura de arco a TIG con su correspondiente radiación de plasma generado.
- Figura 2.3 - Representación del espectro de luz con sus diferentes zonas de emisión.
- Figura 2.4 - Representación espectral de la zona visible.
- Figura 2.5 - Esquema de funcionamiento de un espectrómetro CCD.
- Figura 2.6 - Espectrómetro Eonic CCD (*Charge-Coupled Device*, dispositivo de carga acoplada).
- Figura 2.7 - Cámara de vídeo Pixelink.
- Figura 2.8 - Entorno gráfico de la cámara Pixelink.
- Figura 2.9 - Cámara de video visible Guppy.
- Figura 2.10 - Cámara F033C con óptica de entrada integrada.
- Figura 2.11 - Espectro de luz fluorescente.
- Figura 2.12 - Espectro de super diodo de luz blanca.
- Figura 2.13 - Fuente de luz Blanca profesional DH2000.
- Figura 2.14 - Espectro de luz blanca.
- Figura 2.15 - Espectro de emisión del detector de fallos en fibra.
- Figura 2.16 - Espectro de emisión del patrón de líneas.
- Figura 2.17 - Super diodo con luz en azul.
- Figura 2.18 - Espectro de emisión del super diodo azul.
- Figura 2.19 - Super diodo con luz en rojo.
- Figura 2.20 - Espectro de emisión del super diodo en rojo.
- Figura 2.21 - Filtro óptico en 532nm.
- Figura 2.22 - Espectro de la respuesta del filtro en verde.
- Figura 2.23 - Filtro óptico en 632nm
- Figura 2.24 - Espectro de visión del filtro en rojo.
- Figura 2.25 - Filtro óptico en 428nm.
- Figura 2.26 - Espectro de luz del filtro en azul.
- Figura 2.27 - Filtro óptico en 532nm.
- Figura 2.28 - Espectro del filtro en color verde.
- Figura 2.29 - Filtro óptico en 632nm.
- Figura 2.30 - Espectro de emisión de filtro en rojo.
-
- Figura 3.1 - Sistema del gas de protección.
- Figura 3.2 - Set up de soldadura.
- Figura 3.3 - Interfaz de control de parámetros de imagen.
- Figura 3.4 - Set up del sistema de visión artificial del proceso de soldadura de arco TIG.
- Figura 3.5 - Parámetros comunes de las imágenes.
- Figura 3.6 - Parámetros de soldadura.
- Figura 3.7 - Visión obtenida sin iluminación externa.
- Figura 3.8 - Visión finalizo el proceso.
- Figura 3.9 - Visión del proceso con filtrado de imagen.
- Figura 3.10 - Set up experimental con láser en verde.
- Figura 3.11 - Visión frontal obtenida con láser en verde.
- Figura 3.12 - Visión filtrada obtenida con puntero láser en verde.
- Figura 3.13 - Set up experimental con láser de Helio Neón.
- Figura 3.14 - Visión obtenida con el láser de Helio Neón
- Figura 3.15 - Set up experimental con súper diodo en rojo.
- Figura 3.16 - Parámetros de imagen de prueba 4.

Figura 3.17 - Visión obtenida con súper diodo en rojo.
 Figura 3.18 - Visión con lente formato "lupa" y súper diodo en rojo.
 Figura 3.19 - Vision obtenida con iluminación + lupa, con grabación frontal.
 Figura 3.20 - Visión obtenida con súper diodo en rojo, variando el ángulo de inclinación de la cámara respecto a la horizontal: a) Visión a 40º b) Visión a 50º.
 Figura 3.21 - Visión obtenida con enfoque lateral de luz con súper diodo en rojo.
 Figura 3.22 - Visión con enfoque lateral con súper diodo en rojo.
 Figura 3.23 - Visión frontal con enfoque de súper diodo en rojo lateral.
 Figura 3.24 - Set up experimental con súper diodo en rojo y sensor en el lateral.
 Figura 3.25 - Visión lateral con súper diodo en rojo.
 Figura 3.26 - Parámetros de imagen con captura y enfoque frontal.
 Figura 3.27 - Resultados de WeldStorm con visión y enfoque frontal.
 Figura 3.28 - Visión al comienzo del cordón.
 Figura 3.29 - Visión obtenida durante el proceso de soldadura con captura y enfoque frontal en consecutivos instantes de tiempo: a) t=1.2seg. b) t= 1.6seg. c) t=2seg. d) t=2.4seg.
 Figura 3.30 - Visión del cordón de soldadura con súper diodo en rojo en diferentes instantes de tiempo: e) t=2.8seg. f) t=3.2seg. g) t=3.6seg h) t=4seg.
 Figura 3.31 - Visión obtenida durante el proceso.
 Figura 3.32 - Lente de enfoque para las fuentes de luz.
 Figura 3.33 - Set up experimental con lente de enfoque integrada.
 Figura 3.34 - Visión del proceso de soldadura con óptica de enfoque durante el proceso: a) t=2seg. b) t=3seg. c) t= 4seg.
 Figura 3.35 - Visión lateral obtenida tras finalizar el proceso de soldadura.
 Figura 3.36 - Set up experimental con súper diodo en azul.
 Figura 3.37 - Parámetros de imagen con super diodo en azul.
 Figura 3.38 - Visión lateral con super diodo en azul tras finalizar el proceso.
 Figura 3.39 - Visión lateral con elevada intensidad de trabajo.
 Figura 3.40 - Visión obtenida con súper diodo en azul

Figura 4.1 - Sistema de procesado de imagen, NI Vision.
 Figura 4.2 - Cordón de soldadura correcta.
 Figura 4.3 - Secuencia del proceso de soldadura bien realizado.
 Figura 4.4 - Verificación del correcto proceso de soldadura.
 Figura 4.5 - Cordón de soldadura con bajada de intensidad.
 Figura 4.6 - Secuencia del proceso con bajada de intensidad.
 Figura 4.7 - Detección de defecto por bajada de intensidad.
 Figura 4.8 - Cordón de soldadura con cambio de espesor.
 Figura 4.9 - Imagen ilustrativa del defecto.
 Figura 4.10 - Secuencia del proceso con cambio de espesor.
 Figura 4.11 - Detección de defecto por cambio de espesor en la chapa.
 Figura 4.12 - Cordón de soldadura con aparición de un cráter.
 Figura 4.13 - Imagen ilustrativa de la aparición de un poro o cráter de salida.
 Figura 4.14 - Secuencia ilustrativa del proceso con la aparición de un poro o cráter, a) Región de interés, ROI, b) Píxeles de la imagen que superan el umbral establecido, c) FFT por truncamiento.
 Figura 4.15 - a) Soldadura correcta. b) Desvío vertical de la antorcha.
 Figura 4.16 - Secuencia del proceso con desvío de antorcha.
 Figura 4.17 - Detección de fallo de desvío de antorcha.
 Figura 4.18 - Cordón de soldadura con defecto de aporte de gas.
 Figura 4.19 - Visión del cordón de soldadura tras finalizar su proceso.
 Figura 4.20 - Secuencia del proceso con falta de aporte de gas.
 Figura 4.21 - Detección de falta de aporte de gas.

Figura 4.22 - Cordón de soldadura con suciedad.

Figura 4.23 - Secuencia del proceso con defecto de suciedad.

Figura 4.24 - Detección de fallo de suciedad.

Figura 4.24 - Cordón de soldadura con varios defectos continuos.

Figura 4.25 - Secuencia de múltiples defectos.

Figura 4.26 - Detección de múltiples defectos en un cordón.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Los procesos de soldadura, ya bien sean de arco o láser, constituyen un factor clave en diferentes sectores industriales tales como el automovilístico, aeronáutico, naval o nuclear. Estos sectores industriales citados, requieren de unas exigencias de calidad muy rigurosas y exigentes, ya que por ejemplo, un pequeño defecto de soldadura en un generador de vapor de una central nuclear puede derivar en un problema muy serio, o una fisura en una soldadura en el motor de un avión podría derivar en un accidente, por poner algunos ejemplos ilustrativos.

Actualmente el 50% de los productos que se requieren en nuestras vidas, llevan consigo un proceso de soldadura, directa o indirectamente, hacérselo que da una idea de la importancia que tienen estos procesos en nuestras vidas.

La realización de procesos de soldadura de alta calidad implica una elevada complejidad, tanto desde el punto de vista de su realización como de verificación, ya que existe una gran variedad de parámetros de entrada, con lo que se requiere de diferentes métodos de pruebas para conseguir determinar los rangos óptimos de los parámetros mediante ensayos en el laboratorio y cupones de pruebas para evitar que aparezcan defectos durante el proceso.

Aun teniendo los márgenes de los parámetros que influyen en el proceso de soldadura bien delimitados, siempre existe la posibilidad de que aparezcan nuevos defectos a la hora de realizar las soldaduras, por lo que en los últimos años han ido surgiendo diversas técnicas para la monitorización en tiempo real de la calidad de los cordones de soldadura.

Precisamente en este ámbito es donde se centrará más nuestra atención, en la investigación de las técnicas de monitorización de la calidad de soldadura en tiempo real para poder detectar los posibles defectos que se ocasionen en los cordones de una manera rápida y eficiente. Este punto es, precisamente, una de las principales preocupaciones de la industria, el tiempo empleado en realizar un proceso, ya que a mayor tiempo empleado, y, consecuentemente, mayor coste. Se requiere, por tanto, de una exigente calidad en los procesos de soldadura pero también se necesitan unos sistemas eficientes que permitan detectar los defectos lo antes posible para así introducir los cambios necesarios al momento, pudiendo corregir así el proceso y adquirir la calidad requerida por los estándares y normativas vigentes en los diferentes sectores y productos que se estén fabricando.

En la actualidad, una vez se hayan soldado las piezas, ya bien siguiendo el proceso de soldadura de arco o láser (o cualquier otra variante del proceso, como soldadura por fricción, por haz de electrones, etc.), dependiendo del proceso y calidad que requiera la pieza, se debe proceder a realizar su verificación o análisis.

Se emplean para ello técnicas de ensayos no destructivos (NDT, *Non-Destructive Testing*, Evaluación No-Destructiva), como pueden ser los líquidos penetrantes, ultrasonidos, partículas magnéticas, o rayos X, que garanticen que la pieza no ha sufrido defectos durante el proceso de soldadura. Incluso es necesario en ocasiones el uso de técnicas destructivas como el corte de los cordones soldados para observar la posible aparición de defectos (macrográficas).

Todas estas técnicas no destructivas y destructivas son efectivas para comprobar la calidad de las soldaduras realizadas, pero son procesos relativamente lentos, que tienen un coste económico y temporal bastante elevado y que se realizan *off-line*, una vez que el proceso ha finalizado, teniendo el inconveniente de que no se puede actuar en tiempo real sobre ningún parámetro de entrada para tratar de eliminar algún defecto que haya podido aparecer durante la soldadura.

1.2 Motivación del proyecto

En el sector industrial existe un gran interés para disponer de un sistema sensor para la monitorización visual de calidad del proceso de soldadura de arco en tiempo real, el cuál permita el seguimiento y control del proceso.

Resultaría interesante tratar de paliar la contribución de la intensa radiación óptica proveniente del plasma de soldadura, que en condiciones normales evita un correcto visionado y seguimiento del baño de soldadura.

Durante estos últimos años, el estudio de mejorar la calidad de los sistemas ópticos está siendo demandado por las empresas que requieren de un control del proceso en todo momento, ya que suelen implicar soldaduras con unos altos requerimientos de calidad, adquiriendo por lo tanto un importante coste económico.

Seguidamente, están apareciendo diferentes técnicas referente al análisis de la calidad de las soldaduras de arco o láser: el análisis de la espectroscopia óptica del plasma, el análisis de las emisiones acústicas producidas durante el proceso de soldadura, la medición de la tensión de la carga inducida, el procesamiento de la imagen por medio de la termografía infrarroja, etc.

Principalmente, se ha visto un gran desarrollo en la técnica de espectroscopia óptica del plasma generado durante el proceso de soldadura de arco, adquiriendo y procesando las líneas de emisión de los espectros del plasma (gas ionizado) a lo largo del proceso de soldadura. Esta solución está muy bien considerada, ya que está demostrado que se obtiene una gran cantidad de información espectral acerca de la soldadura realizada y que se puede obtener una correlación directa con la calidad de los cordones resultantes, permitiendo así verificar su calidad o no.

Volviendo a la técnica que se propone en este estudio de monitorizar del proceso de soldadura de arco TIG en tiempo real mediante iluminado de fuentes externas de luz, al igual que la técnica anteriormente comentada de la espectroscopia óptica del plasma, se obtiene una gran ventaja, la de ser un sistema No Invasivo, ya que el sistema sensor no interfiere para nada en el desarrollo del proceso, el sistema de monitorización va conectado al ordenador mediante un cable firewire y el procesado se realiza directamente en el PC, lo cuál no interfiere en absoluto a la electrónica de que se dispone en sus alrededores.

En este estudio se desarrollará, por tanto, un procesado de imagen con enfoque preliminar, un estudio inicial de si ha sucedido alguna imperfección durante el proceso, es más, si el procesado se hace de una manera conjunta con la toma de imágenes de la cámara, nada más comenzar el posible defecto en el cordón de soldadura, se podría tomar medidas para corregirlo o en su defecto minimizarlo durante su ejecución. Si bien para la implementación fiable de este objetivo sería necesario, posiblemente, realizar no sólo la detección sino también la clasificación de los defectos o, en caso contrario, la limitación del estudio a una defectología básica.

1.3 Objetivos de este proyecto

El objetivo del vigente trabajo es desarrollar un sistema de monitorización mediante visión artificial del proceso de soldadura de arco TIG en tiempo real, iluminando la zona de soldadura mediante fuentes de iluminación externas.

Se pretende iluminar la sección de soldadura mediante diferentes fuentes de luz, ya bien sean punteros láser, láseres de media potencia, diodos Led de alta potencia, etc. Con el fin de enfocar su haz luminoso en la zona de soldadura, tratando de paliar la fuerte radiación de plasma producido durante el proceso de soldadura.

Según sea la longitud de onda de cada fuente de luz, se incorporará un filtro óptico al sensor, qué mediante diferentes posicionamientos de los elementos del sistema sensor, ya bien sea, principalmente, combinando distancias de enfoques y ángulos de inclinación se puedan conseguir resultados viables.

El desarrollo de la monitorización mediante visión artificial del baño de soldadura en tiempo real, podría permitir una complementación conjunta al análisis acústico del proceso y a la espectroscopia óptica del plasma producido, obteniendo así una información completa de todo el proceso de soldadura de arco.

El estudio de las diferentes posibilidades de iluminación, enfoques de cámara buscando los óptimos ángulos, disposición ideal de los elementos del sistema sensor, etc. Serán estudiados en el vigente proyecto.

Al igual que el procesado de la imagen, según la calidad que requiera el ensayo o la propia empresa, se incidirá mas en unos aspectos u otros, pudiendo obtener mejores resultados en función de las características de cada elemento fundamental que compone el sistema; ya bien sea: la potencia de la fuente de luz, la resolución de la cámara de video, la anchura espectral de los filtros ópticos, la calidad de las lentes, etc.

1.4 Organización del documento

Tras esta breve introducción, el vigente documento se divide en las siguientes secciones:

- El Capítulo 2 está dedicado esencialmente a una breve introducción teórica utilizada en el desarrollo de este proyecto donde se explicarán fundamentalmente los conceptos relacionados con la soldadura y su historia con sus diferentes métodos estudiados en la actualidad referente al proceso de soldadura. El estado del arte de la monitorización de los procesos de soldadura en tiempo real, las técnicas utilizadas, serán estudiadas en el vigente proyecto, al igual que una breve comparativa de los distintos sensores utilizados en la monitorización, diferentes aspectos técnicos de los componentes utilizados y una exhausta caracterización de las fuentes de luz y filtros ópticos utilizados en sus distintas configuraciones

- En el Capítulo 3 se explicará brevemente el *set up* experimental, tanto la parte relativa al montaje del sistema de visión en todas sus diferentes situaciones con sus correspondientes fuentes de luz y filtros ópticos, como de la parte correspondiente al sistema que realiza las soldaduras en los diferentes ensayos realizados en el laboratorio, con el fin de obtener una gran variedad de posibilidades en la monitorización del proceso de soldadura en tiempo real.

- En el capítulo 4 se expondrá el procesado de varios defectos de soldadura, debidamente explicados y caracterizados mediante el sistema de procesado de imagen, realizado con software específico, con el fin de poder detectar defectos en línea de una manera eficaz y rápida.

- En el Capítulo 5 se detallarán las conclusiones que se han obtenido tras la realización del proyecto y sobre las posibles líneas futuras que quedan abiertas para su posterior estudio.

- Finalmente, en el Anexo, se adjuntarán las fichas técnicas de todos los componentes que forman el sistema sensor, junto con todos los soportes técnicos necesarios para su correcto funcionamiento y control.

2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

El presente capítulo pretende mostrar brevemente al lector, el escenario actual en lo que se refiere a las diversas soluciones existentes de sistemas sensores y de monitorización de procesos de soldadura.

También se incluirán las diferentes caracterizaciones de las fuentes de luz y filtros ópticos mediante el espectrómetro Eonic BWTEK CCD con el fin de posicionar y obtener lo mejor posible toda la información espectral con el mayor rigor posible.

2.1 La soldadura

La soldadura es un proceso de vital importancia en la sociedad actual, ya que representa una parte fundamental del proceso de elaboración de buena parte de los objetos que diariamente nos rodean, para que nuestra vida sea más fácil y placentera. De tal manera que los avances en los sistemas de mejora de los procesos de soldadura se ven incrementados con gran relevancia a lo largo de estos últimos años. El campo de actuación de la soldadura cada día abarca una mayor medida, de manera que las soldaduras hoy en día se utilizan tanto de la obra civil y edificación, pasando por el sector aeronáutico, automovilístico, naval, nuclear o el energético. Cualquiera de estos sectores requiere de muchísimos cordones de soldadura para la creación de los diferentes objetos que se fabriquen, teniendo en cuenta siempre que los niveles de calidad exigidos y normativas a cumplir no son los mismos lógicamente, como se verá más adelante.

Buscando el significado literal de la palabra Soldadura en el diccionario, se encuentra por definición; la soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la fusión: fundiendo ambas piezas y agregando, en ocasiones, un material de relleno fundido (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido que al enfriarse se convierte en una unión fija. A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, para producir la junta soldada.

Se pueden encontrar diferentes fuentes de energía para ser usadas en los procesos de soldadura, ya bien sea por medio de un arco eléctrico, un láser, una llama de gas, un rayo de electrones y procesos de fricción o ultrasonidos.

La energía más cotidiana que se puede encontrar a día de hoy es la energía necesaria para formar la unión entre dos piezas metálicas, vital para formar el arco eléctrico (soldadura de arco), donde se puede encontrar una variedad de diferentes tipos de energía a emplear en el proceso, las variantes comúnmente conocidas son: los procesos TIG (*Tungsten Inert Gas Welding*, Soldadura por Gas Inerte y Tungsteno), MIG (*Metal Inert Gas Welding*, Soldadura por Gas Inerte y Metal) o SAW (*Submerged Arc Welding*, Soldadura por Arco Sumergido) entre ellos, en el vigente trabajo, fundamentalmente se estudiara el arte de la monitorización visual del proceso de soldadura de arco mediante el proceso TIG, donde podría traducirse como soldadura de gas inerte y tungsteno.

El gas inerte hace referencia al también denominado gas de protección, típicamente argón o helio, o una mezcla de ambos, empleado para evitar la aparición de procesos de oxidación en las soldaduras debidos al oxígeno atmosférico. En la soldadura TIG, el electrodo está compuesto de tungsteno, material no consumible, el cuál es el encargado de conectar la máquina de soldadura con la pieza/as a soldar, posee su punto de fusión entorno a los 3410º C.



Figura 2.1 – Ejemplo del cabezal o boquilla de soldadura TIG durante el proceso.

2.2 Historia de la soldadura

Si nos remitimos a la historia y la ciencia en la era moderna, es indudable que el primer paso para la invención de la soldadura de arco, la produjo **Sir Humphry Davy** en 1801 cuando descubrió que era posible conducir electricidad en el aire entre dos electrodos; ¡realmente descubrió el arco eléctrico!

Los primeros electrodos en usarse fueron varillas sin ningún recubrimiento, las cuales produjeron arcos inestables, cordones amorfos, excesivas salpicaduras, y altísima fragilidad del metal de soldadura por causa de la contaminación del charco.

En el proceso de desarrollo de la soldadura, se comenzaron a utilizar revestimientos de diversos materiales orgánicos e inorgánicos; aunque en principio se hizo simplemente para generar estabilidad al arco, más que para producir soldaduras limpias.

En el año 1885, el ruso N Bernardos, determina la posibilidad de generar un charco metálico entre dos electrodos (un cátodo de carbón y un ánodo de metal) para unir piezas metálicas. Él patenta el primer equipo de soldadura en Inglaterra. Slavianoff es el primero en crear un electrodo (metálico) consumible, en 1892.

El sueco Oscar Kjellberg, es el primero en patentar un electrodo revestido (1907) fue el fundador de la compañía ESAB.

En USA (1912), los señores Strohmenger-Slaughter patentaron el primer electrodo con grueso recubrimiento, el cual comenzó a utilizarse a nivel industrial. Este tuvo una aceptación bastante lenta por causa de su precio. Desde el principio de la década de los 20's, se comenzó a investigar sobre la protección gaseosa para la operación de soldeo, pero por causa del desarrollo del proceso SMAW, se perdió el interés por los procesos con atmosfera protectora de gas.

Entre los años 1930 - 1935 las operaciones con el proceso SMAW alcanzaron las áreas de infraestructura pesada; fue en aquellos tiempos que se construyeron los primeros barcos totalmente soldados tanto en USA como en Alemania.

Simultáneamente (año 1932) comenzaban a hacerse experimentos con electrodos continuos protegidos por fundentes granulados, a partir del año 1935 se consolido el proceso SAW en la construcción de barcos y la fabricación de tuberías; fue también en aquel año (1935) que se introdujo la utilización de la Corriente Alterna, la cual frente a sus ventajas estaban sus dificultades en cuanto a estabilidad del arco, causas que fomentaron la creación de mejores revestimientos para los electrodos SMAW.

El primer proceso con protección gaseosa fue llamado HELIARC, denominado así por causa de que el primer gas de protección fue el Helio, y es el proceso conocido como GTAW, en principio se utilizaba con CC(corriente continua), se fue optimizando al utilizarlo con CA(corriente alterna), y posteriormente con la implementación de las unidades de Alta Frecuencia con lo cual se logro mayor estabilidad del arco así como la posibilidad de soldar metales con alta conductividad térmica y de reducidos espesores. Ya para el comienzo de la década de los 40's, se consolidó el uso del Argón como gas protector del arco.

Entre los años 1938 - 1940, se descubrió que por causa de las altas temperaturas del centro del arco, los elementos del recubrimiento (fundente) al descomponerse atómicamente, producían oxígeno+carbono; de tal manera que resulto en un gas de excelentes cualidades como agente protector del arco eléctrico en los procesos de soldadura.

El proceso GTAW se consolido en la producción de soldaduras sobre metales muy reactivos, y de limitados espesores; de tal manera que aun existía una falencia en cuanto a procesos productivos, es por esto que para el año 1948 se creo el proceso GMAW partiendo del anterior; al imitar el Wolframio con un electrodo de alambre continuo. El proceso inicialmente utilizo gases activos tales como (He, Ar) y posteriormente gas inerte (CO₂), los cuales hasta hoy se siguen utilizando.

Hoy día encontramos gran variedad de electrodos para diferentes aplicaciones tanto para construcción como también para reparación y recubrimientos duros, para utilizarse con o sin gas. El avance tecnológico ha llevado a optimizar y a derivar procesos, mas que a crear nuevos, tenemos por ejemplo las aplicaciones láser, electro escoria, y hasta la creación de piezas completamente por soldadura, sin ningún tipo de maquinado.

Es indudable que de los procesos productivos existentes; sean el FCAW, TIG y el GMAW los de mayor trascendencia, estos se utilizan en la construcción de líneas de tuberías, estructuras, tanques de almacenamiento; así como también en la fabricación de elementos metálicos industriales.

El vigente proyecto, se basa en soldadura TIG, con Helio y Argón como gases de protección, véase la siguiente figura:



Figura 2.2 - Ejemplo del proceso de soldadura de arco a TIG con su correspondiente radiación de plasma generado.

2.3 Estado del Arte en la monitorización en línea de procesos de soldadura

2.3.1. Introducción

En el capítulo anterior, concretamente en el Apartado 1.3, se introdujo la motivación que origina el presente trabajo. Se comentó entonces la disponibilidad de poseer un sistema de monitorización en línea fiable, eficiente y capaz de identificar en tiempo real la aparición de defectos de soldadura, sería de gran relevancia para los diferentes sectores industriales en los que la calidad de la soldadura juega un papel de gran valor.

Es necesario resaltar en este punto que los sistemas sensores y de inspección objeto de análisis en esta revisión del Estado del Arte, así como a lo largo del presente trabajo, son aquéllos específicamente orientados al aseguramiento de la calidad en línea y por extensión a la detección de defectos de soldadura mediante un procesado de la imagen en este caso. Los sistemas sensores cuyo objetivo es diferente del anteriormente expuesto, como aquéllos de seguimiento del cordón de soldadura (*seam tracking*), quedan fuera del ámbito de este estudio.

Aunque tradicionalmente la soldadura de arco ha sido empleada extensivamente como método de calidad para la fabricación de componentes con materiales metálicos, gran parte del esfuerzo investigador plasmado en la literatura científica se ha centrado en la soldadura láser, la cual está experimentando un gran auge en los últimos años en cuanto a su implantación en diferentes sectores industriales, como por ejemplo, el naval, el automovilístico o el aeroespacial.

2.3.2. Técnicas de monitorización

Las técnicas propuestas para el monitorizado del proceso de soldadura láser o de arco se pueden clasificar en diferentes tipos.

En primer lugar, los transductores eléctricos son capaces de ofrecer información significativa del proceso de soldadura. En la soldadura de arco, se ha propuesto la medida de la impedancia eléctrica entre la pieza y el electrodo, del voltaje inducido en la boquilla de la antorcha de soldadura o bien de la corriente suministrada por el electrodo.

Un análisis de Fourier de este tipo de señales proporciona información sobre la profundidad de penetración e imperfecciones superficiales en los cordones, pero no parece adecuado para piezas de medio y gran espesor.

Un factor relevante a tener en cuenta es la fuerte interferencia electromagnética (EMI, *ElectroMagnetic Interference*) generada como consecuencia del arco, especialmente en los primeros instantes del proceso. Esta problemática no existe ni en la espectroscopía óptica del plasma ni en la monitorización visual que se presenta en este proyecto, se convierte en una gran ventaja de estos sistemas sensores respecto al resto de técnicas que sí que les afecta seriamente tanto a los elementos sensores como a la electrónica situada en las cercanías de la antorcha o pistola de soldadura [1].

Otra gran alternativa, pasa por la medida de la emisión acústica que se genera durante el proceso, y que se debe a las fluctuaciones de alta frecuencia del plasma y al proceso de solidificación de la pieza.

Las soluciones acústicas pueden basarse, en el estudio de las señales sonoras tanto en el rango audible como en el ultrasónico [2].

El análisis de Fourier de las emisiones acústicas ha demostrado ser capaz de detectar varios defectos comunes en soldadura láser y de arco, ya que un cordón bien soldado emite una radiación acústica estable; un buen soldador o un soldador experimentado solo con el simple hecho de escuchar el sonido producido durante el proceso de soldadura sabe si ese cordón está bien soldado o no.

La aplicación de esta técnica al proceso de soldadura de arco sumergido (*Submerged Arc Welding, SAW*) resulta interesante, ya que dadas las condiciones especiales de este tipo de soldadura, en el que se emplea polvo en vez de gas de protección para proteger al cordón de posibles fenómenos de oxidación, la aplicación de otras aproximaciones no resulta posible [3].

Este tipo de proceso ha sido también estudiado por medio de soluciones basadas en termografía infrarroja. La termografía del infrarrojo ha sido empleada como solución para la obtención de información en línea del proceso de soldadura, por medio de la obtención de la distribución geométrica de la radiación de cuerpo negro sobre la superficie de la pieza para conseguir la temperatura de la misma.

Mediante este método aplicado a la soldadura de arco es capaz de determinar las dimensiones del “*pool*” (baño o metal fundido) de soldadura y estimar su temperatura, técnicas de tratamiento de imagen. Las fluctuaciones en las distribuciones de temperatura superficial pueden ser asociadas a defectos puntuales o zonas defectuosas producidos durante el proceso.

Citando ahora alguna de las desventajas de esta técnica podrían citarse el elevado coste de algunas de las posibles implementaciones, como las cámaras termográficas, fuentes de luz de alta potencia colimadas, etc.

También es una tarea difícil en muchas ocasiones, separar la radiación infrarroja emitida por el plasma de la que procede de la superficie de la pieza, igual que en las cámaras visibles como veremos más adelante y en ciertas ocasiones los requerimientos computacionales pueden dificultar su implementación en tiempo real. En el caso de la soldadura láser es común encontrar una configuración co-axial de las cámaras, ya sean basadas en tecnología CMOS o CCD.

Dentro del primer grupo pueden encontrarse varios ejemplos aplicados a soldadura láser.

Las regiones espectrales objeto de análisis, en este caso suelen ser las correspondientes al ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. Una problemática a la que se encuentra solución por medio del empleo de fotodiodos es la relativa al control del correcto enfoque del haz láser en la pieza a soldar para conseguir una óptima profundidad de penetración. Al igual que en el siguiente sistema sensor que se verá, la función vital en un sistema sensor de cualquier proceso de soldadura de arco será la captura de la luz que se emite durante su desarrollo, o en el caso de la monitorización visual del proceso de soldadura de arco, obtener imágenes nítidas para su posterior procesado, dependiendo siempre de las necesidades de cada sistema.

Aunque el empleo de técnicas ópticas puede ser típicamente aplicado por igual a los procesos de soldadura de arco y láser, ya que éstos comparten muchas características comunes en relación a la similitud del plasma formado y la correlación de sus parámetros con la calidad del proceso de soldadura.

Existen técnicas basadas en la espectroscopía óptica de plasmas, donde se efectúa un procesado más completo de las informaciones espectrales del plasma generado durante la soldadura, que son aplicables por igual, a procesos láser y de arco. La premisa fundamental en la que se sustenta este tipo de análisis, es el conocimiento de la correlación existente entre ciertos parámetros espectroscópicos, principalmente la temperatura electrónica del plasma T_e y la calidad resultante de los cordones de soldadura. La detección de perturbaciones en los perfiles de T_e es típicamente asociada a la aparición de defectos de soldadura, tanto en soldadura láser como de arco [4].

Una de las ventajas que ofrece la espectroscopía óptica de plasmas es la robustez de sus resultados, dado que diferentes líneas de emisión de un mismo elemento, o incluso diferentes elementos de entre los que participan en el plasma de soldadura, pueden ser empleados para obtener diferentes perfiles de T_e [5].

2.3.3 Enfoque al sistema de visión artificial

Finalmente, en el estudio que se presenta a continuación, se analiza la utilización de un sistema sensor o multi-sensor de cámaras en el rango visible, que deben ir acompañadas de una fuente de luz externa que iluminará una sección del “*pool*” de soldadura, esto es, donde el arco de soldadura incide con las chapas ó piezas a soldar, tratando así de eliminar la fuerte radiación de luz generada por el arco eléctrico durante el proceso, para después poder hacer un buen filtrado espectral de la imagen obteniendo así una buena visión del proceso en tiempo real.

En este estudio se estudiará también, como actúan las diferentes fuentes de luz sobre el baño de soldadura, ya bien sean diodos de baja potencia, láseres de Helio-Neón o bien súper-diodos en diferentes longitudes de onda, todas las fuentes de iluminación trabajando en régimen continuo de funcionamiento.

Estas fuentes de luz citadas anteriormente, engloban los tres colores fundamentales del espectro visible, estos son el Azul, Verde y Rojo, lo que abarca un rango de longitudes de onda de entre [400 – 700]nm.

Hay que tener en cuenta que los súper diodos empleados en este estudio requerirán de una óptica de enfoque en algunas ocasiones para poder colimar la máxima emisión de luz en el baño de soldadura.

Igualmente, también se estudiará en este proyecto el procesado de la imagen obtenida con el fin de detectar la aparición de defectos que puedan aparecer durante el proceso de soldadura.

2.4 Espectro de Luz

El espectro electromagnético es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas que se encuentran ordenadas de acuerdo a su longitud de onda λ (o a su frecuencia). Referido a un objeto se denomina *espectro electromagnético* o simplemente *espectro* a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia o partícula.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, a la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck, mientras que el límite máximo sería el tamaño del Universo, aunque formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo.

Los instrumentos empleados para analizar los espectros son: espectrómetros, espectrógrafos y espectrofotómetros; según sean para observar visualmente el espectro, registrarlo fotográficamente o para medir la intensidad de sus diferentes partes. Para la caracterización de las fuentes de luz de iluminación y de los filtros ópticos que se empleen en este estudio se utilizara el espectrómetro.

En el siglo XIX, los científicos descubrieron que más allá de los extremos violeta y rojo del espectro había unas radiaciones que se denominaron ultravioleta e infrarroja. La radiación ultravioleta, aunque invisible al ojo humano, poseía una notable acción fotoquímica. Igualmente, la radiación infrarroja, también invisible al ojo humano, transmitía energía, lo que quedaba demostrado al aplicarla a un termómetro.

Desde entonces se han abierto los límites del espectro, y se han ido añadiendo las ondas de radio, más allá del infrarrojo, y los rayos X y rayos gamma más allá del ultravioleta.

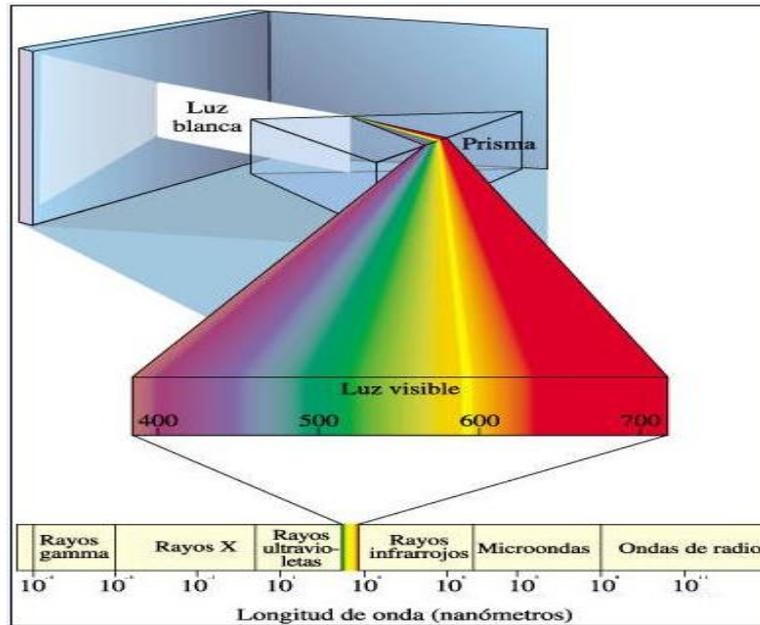


Figura 2.3 - Representación del espectro de luz con sus diferentes zonas de emisión.

Como se ha indicado con anterioridad, el instrumento empleado para estudiar el espectro característico de cada fuente de luz y de cada filtro óptico del sistema sensor, es el espectrómetro CCD que se verá a continuación.

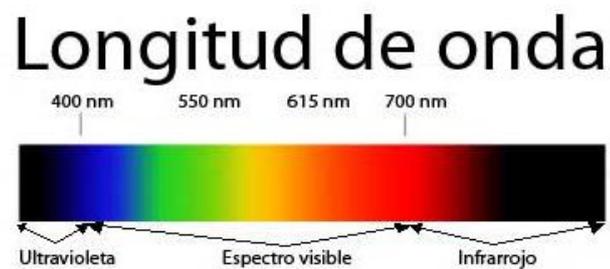


Figura 2.4 - Representación espectral de la zona visible.

2.5 Espectrómetros

Los espectrómetros son los instrumentos capaces de medir las propiedades de la luz en una determinada zona del espectro electromagnético. Con este análisis se puede obtener información sobre un gran número de fenómenos físicos o propiedades de los cuerpos, por lo que, en la actualidad, se emplean en una gran diversidad de áreas y sectores, que incluyen desde la investigación teórica en química o física cuántica hasta en sectores industriales o en medicina.

También existen una gran diversidad de métodos y técnicas relacionadas con la espectroscopía y, como consecuencia de esto, un gran número de diseños de espectrómetros con características muy diferentes entre sí. En este sentido resulta difícil reconocer la existencia de unos fundamentos teóricos comunes para cada tipo de espectrómetro.

En el vigente proyecto es usado el espectrómetro Econic, basado en la técnica CCD (*Charge-Coupled Device*, dispositivo de carga acoplada).

El espectrómetro está formado por una rendija por la que entra la luz procedente de una fuente externa o simplemente del exterior, un conjunto de lentes, un prisma y un ocular.

La luz que se quiere analizar, pasa por una lente colimadora, que la convierte en un haz de luz estrecho y paralelo, y luego por el prisma. Una nueva lente enfoca la luz que sale del prisma sobre una pantalla, reflejándose en ésta las líneas espectrales, cada una de un “color” o longitud de onda diferente.

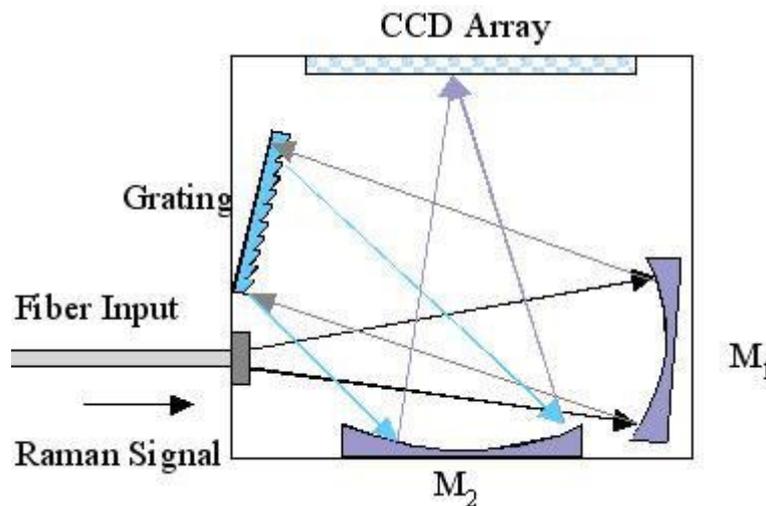


Figura 2.5 - Esquema de funcionamiento de un espectrómetro CCD.

El término captura espectral es empleado para referirse a cada espectro individual de la luz obtenida ya bien sea en el proceso de caracterización o directamente de la luz del plasma que genera el proceso de soldadura, utilizándose en este estudio el espectrómetro para obtener la respuesta espectral de cada fuente de iluminación y de cada filtro óptico; además de los espectros de soldadura durante la realización de los ensayos experimentales.

El uso de espectrómetros basados en CCD es típico hoy en día en aplicaciones espectroscópicas. Los primeros dispositivos CCD fueron inventados por Willard Boyle y George Smith en 1969 en los Laboratorios Bell.

Los detectores CCD, al igual que las células fotovoltaicas, se basan en el efecto fotoeléctrico: la conversión espontánea en algunos materiales de luz recibida en corriente eléctrica. La sensibilidad del detector CCD depende de la eficiencia cuántica del chip, siendo el número de electrones producido proporcional a la cantidad de luz recibida.



Figura 2.6- Espectrómetro BWTEK CCD (*Charge-Coupled Device*, dispositivo de carga acoplada).

En el caso particular del espectrómetro *Econic* de la marca *BWTEK*, que será el empleado durante todos los experimentos realizados en el laboratorio, tanto para las caracterizaciones de las fuentes de luz como de los filtros ópticos, piezas fundamentales en el sistema de visión artificial del proceso de soldadura de arco TIG.

Dicho espectrómetro, se compone de un array CCD que está formado por 2048 detectores lineales que son sensibles desde los 200 hasta los 950 nm aprox., con lo cuál, usando este espectrómetro se dispone de 2048 pixeles con unas dimensiones de 14 x 200 micras cada uno, ofreciendo una resolución óptica entre 0.3 y 10 nm.

2.6 Estudio comparativo de cámaras de video empleadas

En este apartado, se va a presentar las diferentes características de las cámaras de visión de las que se han dispuesto en el vigente estudio de este proyecto; una cámara PixelINK PL-A740 y una cámara Guppy F033C, ambas instaladas y probadas en el laboratorio con el fin de obtener la mejor visión posible del proceso de soldadura. Tras esta breve introducción se exponen las características de la primera cámara de visión instalada.

Cálculo de frame para cámara **PixelINK PL-A740**:

PixelINK PL-A740 Frame Rate Calculations											
Fill in the green cells.											
Rolling Shutter			Global Shutter (Free running)				Global Shutter (Hardware trigger)				
ROI Width	640	pixels	ROI Width	640	pixels	ROI Width	640	pixels	ROI Height	480	pixels
ROI Height	480	pixels	ROI Height	480	pixels	ROI Height	480	pixels	Exposure time	20	ms
Exposure time	20	ms	Exposure time	20	ms	Exposure time	20	ms	Trigger Delay	22	microsec
Trigger Delay	N/A		Trigger Delay	N/A		Trigger Delay	22	microsec	Decimation On?	0	Y/N
Decimation On?	Y/N		Decimation On?	0	Y/N	Decimation On?	0	Y/N	Bits per pixel (8 or 10)	8	bpp
Bits per pixel (8 or 10)	8	bpp	Bits per pixel (8 or 10)	8	bpp	Bits per pixel (8 or 10)	8	bpp	Pixel Clock	40,00	MHz
Pixel Clock	40,00	MHz	Pixel Clock	40,00	MHz	Pixel Clock	40,00	MHz	Frame reset time	-	
Frame reset time	-		Frame reset time	13,70	microsec	Frame reset time	13,70	microsec	Row blanking time	3,50	microsec
Row blanking time	3,50	microsec	Row blanking time	3,50	microsec	Row blanking time	3,50	microsec	Extra pixels/row	10	pixels
Extra pixels/row	10	pixels	Extra pixels/row	10	pixels	Extra pixels/row	10	pixels	Effective Columns	640	pixels
Effective Columns	640	pixels	Effective Columns	640	pixels	Effective Columns	640	pixels	Effective Rows	480	pixels
Effective Rows	480	pixels	Effective Rows	480	pixels	Effective Rows	480	pixels	Total Pixels	312.000	pixels
Total Pixels	312.000	pixels	Total Pixels	312.000	pixels	Total Pixels	312.000	pixels	Pixel clocking time	0,007800	seconds
Pixel clocking time	0,007800	seconds	Pixel clocking time	0,007800	seconds	Pixel clocking time	0,007800	seconds	Row delay time	0,001680	seconds
Row delay time	0,001680	seconds	Row delay time	0,001680	seconds	Row delay time	0,001680	seconds	Total time/frame readout	0,009480	seconds
Total time/frame readout	0,009480	seconds	Exposure time	0,020000	seconds	Exposure time	0,020000	seconds	Exposure time	0,020000	seconds
Exposure time	0,020000	seconds	Total time/frame	0,029494	seconds	Total time/frame	0,029516	seconds	Max Frame Rate	50,00	fps
Max Frame Rate	50,00	fps	Max Frame Rate	33,91	fps	Max Frame Rate	33,88	fps	Bandwidth required	2,4960	mb/frame
Bandwidth required	2,4960	mb/frame	Bandwidth required	2,4960	mb/frame	Bandwidth required	2,4960	mb/frame	Max Iso rate	50,00	fps
Max Iso rate	50,00	fps	Max Iso rate	33,91	fps	Max Iso rate	33,88	fps	Max Asynch rate	50,00	fps
Max Asynch rate	50,00	fps	Max Asynch rate	33,91	fps	Max Asynch rate	33,88	fps			

Todo el software y Kit. de *set up* para su instalación y correcto funcionamiento será incluido en los anexos al final del presente documento.



Figura 2.7 - Cámara de vídeo Pixelink.

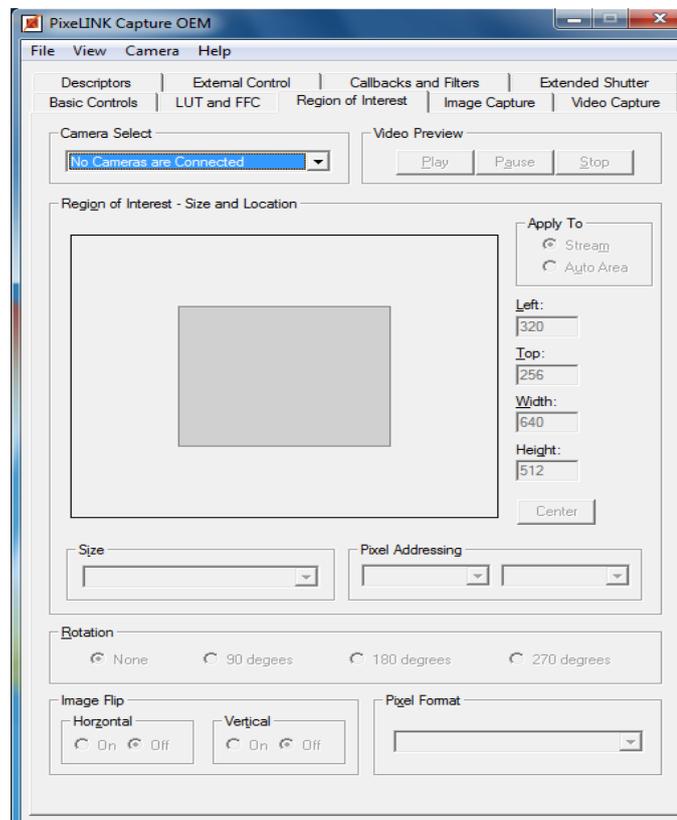


Figura 2.8 - Entorno gráfico de la cámara Pixelink.

Seguidamente, se han estudiado las imágenes obtenidas mediante la otra opción de que se dispone, el modelo Guppy F033C de Allied Vision Technologies, que ha dado como resultado su verificación para realizar todo el estudio de visión artificial de este proyecto.

Se han cuantificado y examinado las muestras de prueba decidiendo la utilización de la cámara Guppy como sensor visual del sistema sensor, ya que las imágenes obtenidas mediante ésta eran de mayor calidad.

Referente al entorno gráfico de trabajo, ambas cámaras poseen similares características de trabajo y parámetros a controlar para su correcto funcionamiento.



Figura 2.9 - Cámara de video visible Guppy.

La cámara de visión, ya bien sea la Pixelink, la Guppy, o cualquier otra que se utilice para montar el siguiente sistema basado en visión artificial que se propondrá, debe ir acompañada de una óptica de entrada enroscada en una montura con rosca C, con el fin de obtener imágenes óptimas para su posterior procesamiento



Figura 2.10 – Cámara F033C con óptica de entrada integrada.

Como ya se ha comentado anteriormente, el arco eléctrico generado en un proceso de soldadura, en este caso a TIG, genera una intensa radiación óptica que no deja ver la imagen deseada del baño de soldadura. Por ello, delante de la óptica de entrada se necesita colocar un filtro óptico adecuado a la longitud de onda de la fuente externa que estará iluminando el proceso de soldadura, con el fin de filtrar la para así obtener una mejor calidad de visión del proceso en tiempo real.

Los filtros de los que se dispone en este proyecto presentan un ancho de banda de 10nm, lo que quiere decir que si el filtro está centrado a una longitud de onda de 633nm, éste va a permitir pasar las longitudes de onda entre [628 – 638]nm.

2.7 Caracterización de las distintas fuentes de iluminación

En este apartado se va a realizar un estudio de las distintas fuentes de luz de que se disponen en este proyecto, con el objetivo de tener caracterizada su respuesta espectral mediante el espectrómetro CCD visto en el capítulo 2.5.

La primera fuente que fue caracterizada, se corresponde con un súper diodo de luz blanca: posee una alimentación de 3V y una potencia de 0,78W, su respuesta espectral es la siguiente, en la que se puede observar lo descrito con anterioridad, ya que el color blanco es la suma de todos los colores, el espectro abarcará gran parte de la banda espectral asociada al rango visible:

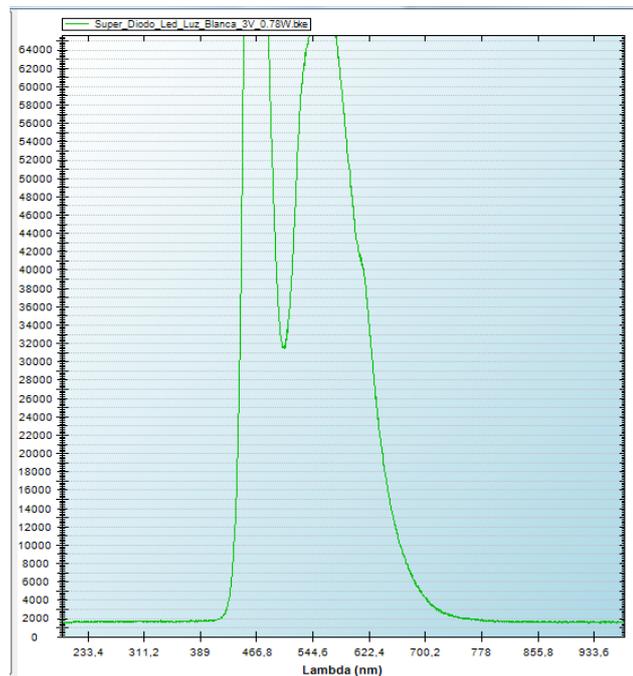


Figura 2.12 - Espectro de super diodo de luz blanca.

- Se puede observar que la respuesta del diodo, tiene una anchura espectral entre [368 – 700]nm, zona donde se encuentran los colores visibles al ojo humano.

La segunda fuente de luz se corresponde a una fuente de luz blanca profesional, consta de dos tipos de fuentes alternativas: de deuterio o halógena. Esta fuente es usada para todas las caracterizaciones de los filtros que se mostrarán en el siguiente capítulo.



Figura 2.13 - Fuente de luz Blanca profesional DH2000.

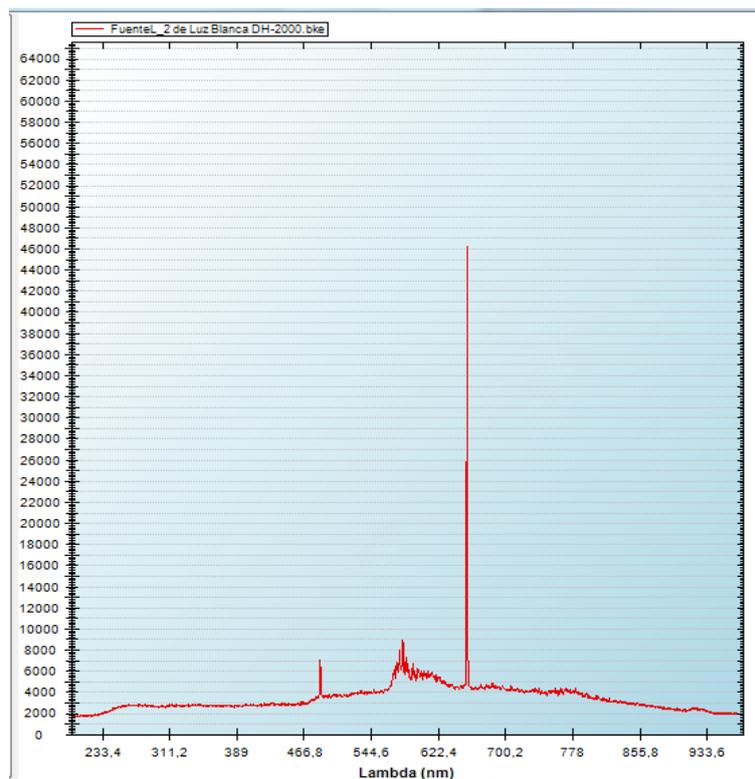


Figura 2.14 – Espectro de luz blanca.

La tercera fuente de luz que se caracteriza, es un láser de 1mW de potencia y de alimentación propia, que es usado para la detección de fallos en fibra óptica, ofreciendo la siguiente respuesta espectral:

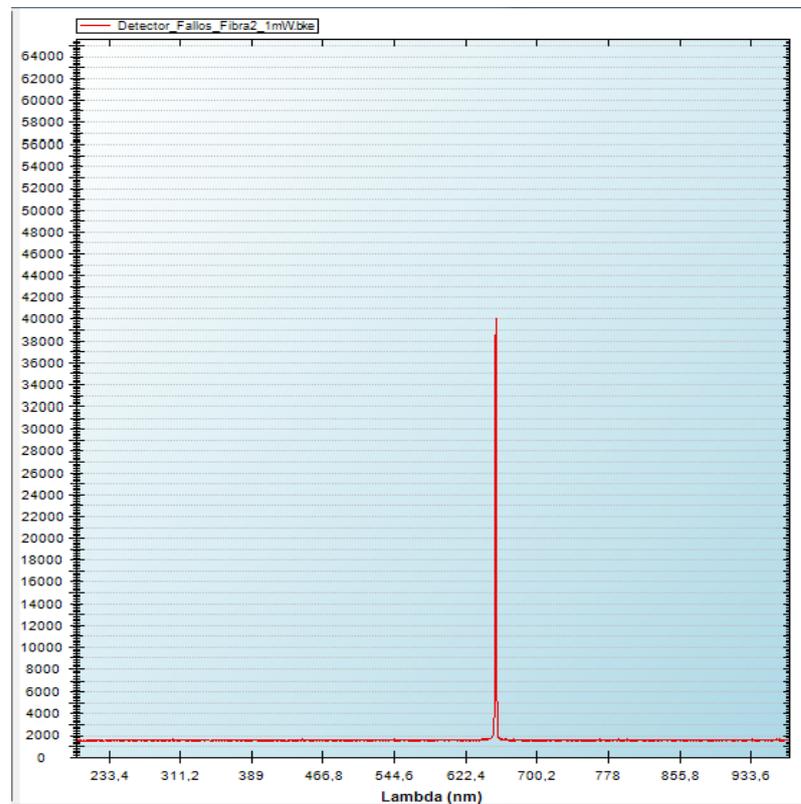


Figura 2.15 - Espectro de emisión del detector de fallos en fibra.

- En esta imagen, se puede apreciar un pico de emisión considerable y muy estrecho entorno a 648nm. El que su espectro se encuentre entorno a los 650nm indica que la fuente de luz genera un color rojo.

La cuarta fuente de luz, corresponde con un láser generador de patrón de líneas, que tiene como alimentación una tensión de 5V y una potencia de 5mW.

Su respuesta espectral es la siguiente:

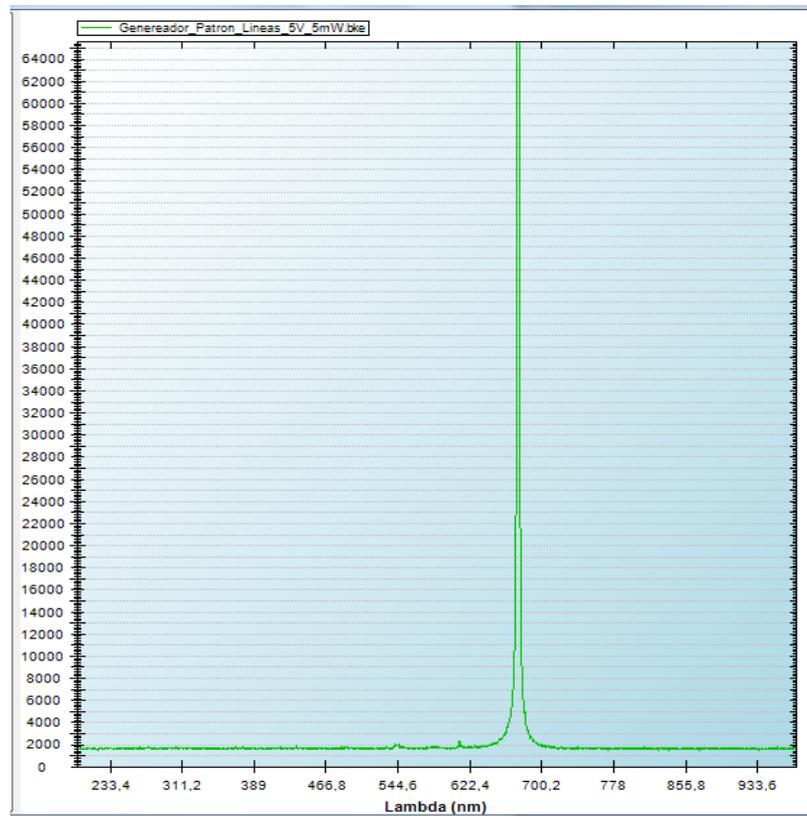


Figura 2.16 - Espectro de emisión del patrón de líneas.

- Observando la respuesta, se aprecia como su espectro también se encuentra alrededor de los 670nm, estando también en la región espectral asociado al rojo.

La quinta fuente de luz caracterizada, es la correspondiente al súper diodo de luz azul, alimentada con una tensión de 12V y con una potencia de hasta 7W. Es una de las fuentes de luz con la que se realiza gran parte del estudio de este proyecto, se compone de un array de 5x5 LEDs insertados en una placa base, junto con la electrónica necesaria para su correcto funcionamiento. La información técnica se presenta en el anexo, la respuesta espectral es la siguiente:

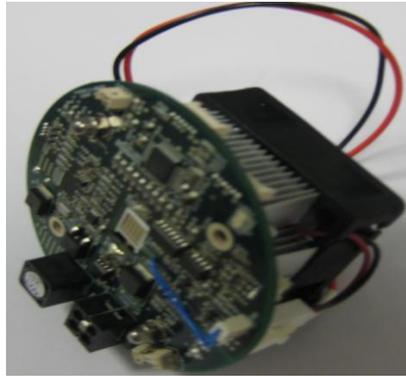


Figura 2.17 - Super diodo con luz en azul.

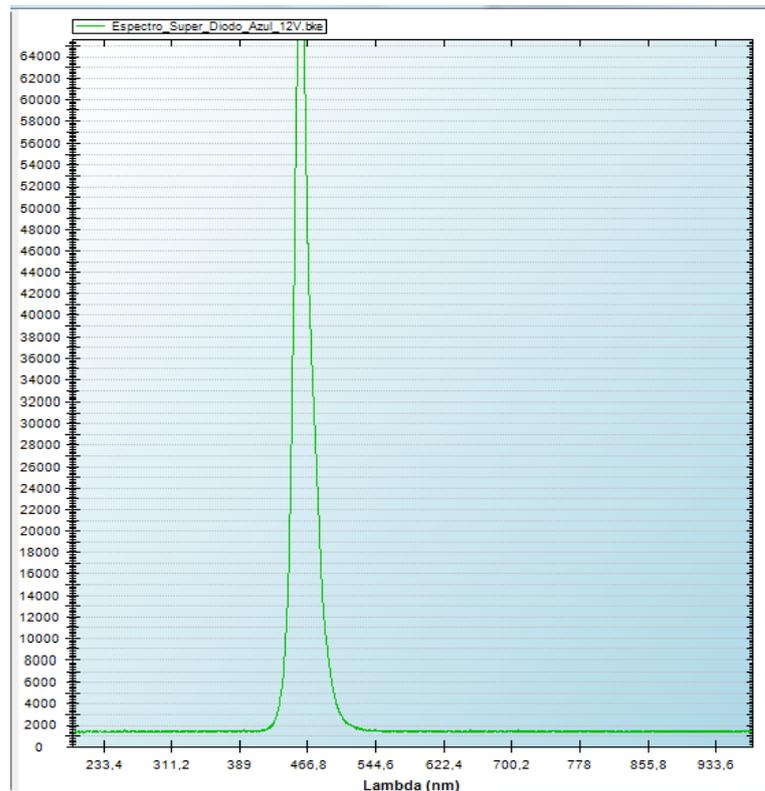


Figura 2.18 - Espectro de emisión del súper diodo azul.

- Ahora bien, a diferencia de las anteriores respuestas, el centro de la repuesta del pico de emisión se centra entorno a 465nm, con lo que se puede afirmar que, la fuente de luz es de color azul.

La sexta y última fuente de luz caracterizada, es la del súper diodo en rojo, la cuál tiene una tensión de entrada de 9V y también llega a los 7W de potencia inclusive más, la respuesta espectral es la siguiente:

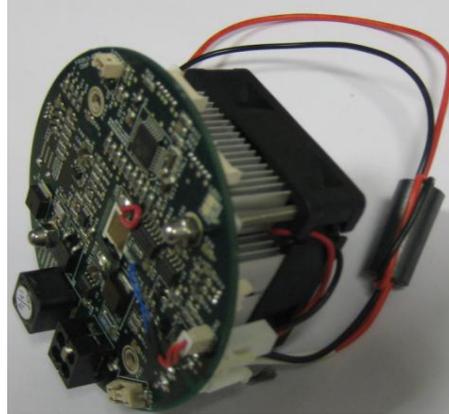


Figura 2.19 - Super diodo con luz en rojo.

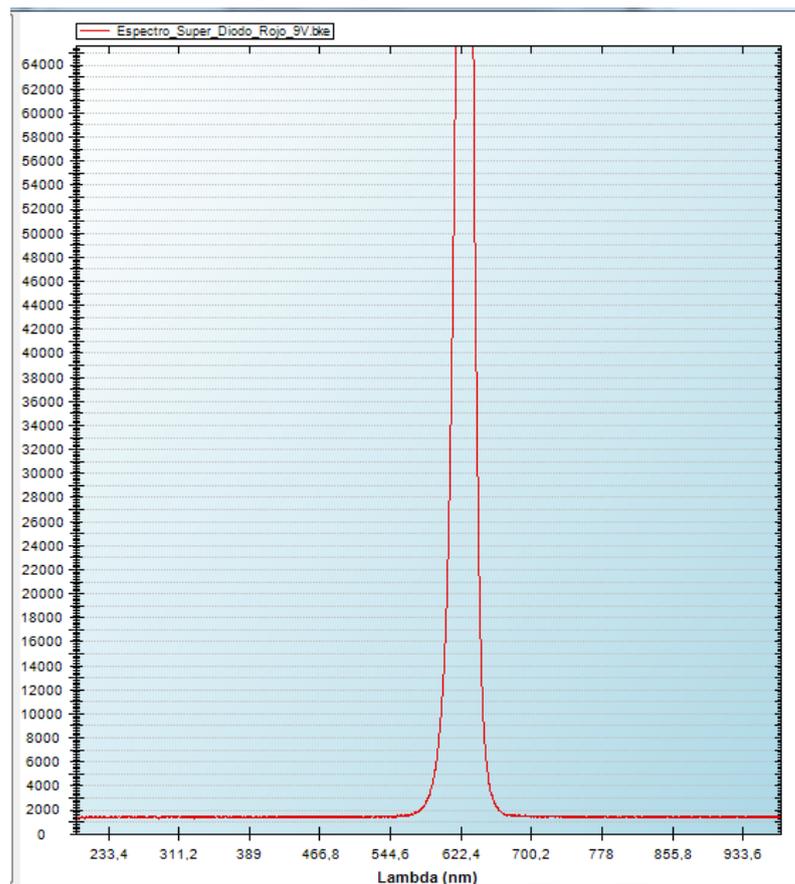


Figura 2.20 - Espectro de emisión del super diodo en rojo.

2.8 Caracterización de filtros ópticos mediante fuente de luz blanca

En este apartado se van a caracterizar los diferentes filtros ópticos utilizados a lo largo de este proyecto. Estos filtros son los encargados de filtrar las longitudes de onda que van a pasar por el objetivo de nuestro sensor.

Dependiendo de la longitud de onda que posea la fuente de luz con la que se ilumina la zona de soldadura, se incorporará su filtro asociado a dicha longitud de onda.

Los filtros ópticos utilizados a lo largo de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio, se muestran a continuación:

Filtro CWL532-FH10



Figura 2.21 - Filtro óptico en 532nm.

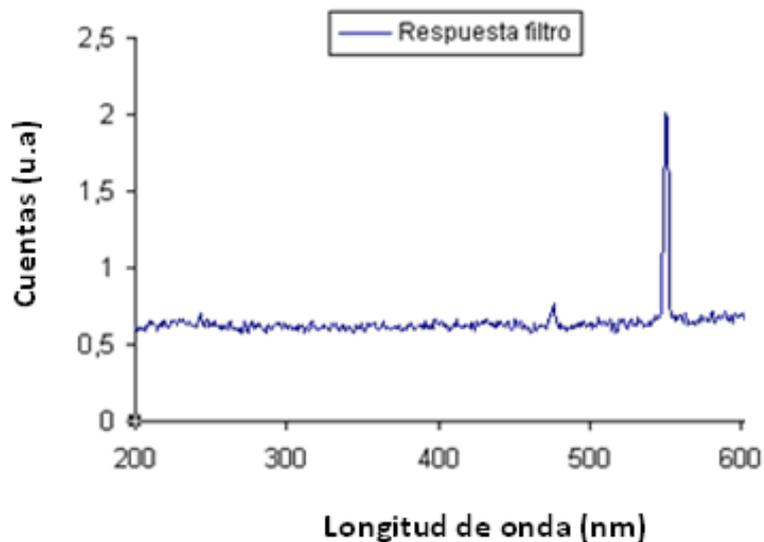


Figura 2.22 - Espectro de la respuesta del filtro en verde.

Se puede apreciar la longitud de onda de este filtro fijándose en la gráfica, ya que entorno a los 560nm aparece un pico significativo, correspondiéndose con el final del color verde y llegando casi a la longitud de onda del color amarillo.

Filtro NB1J14:



Figura 2.23 - Filtro óptico en 632nm.

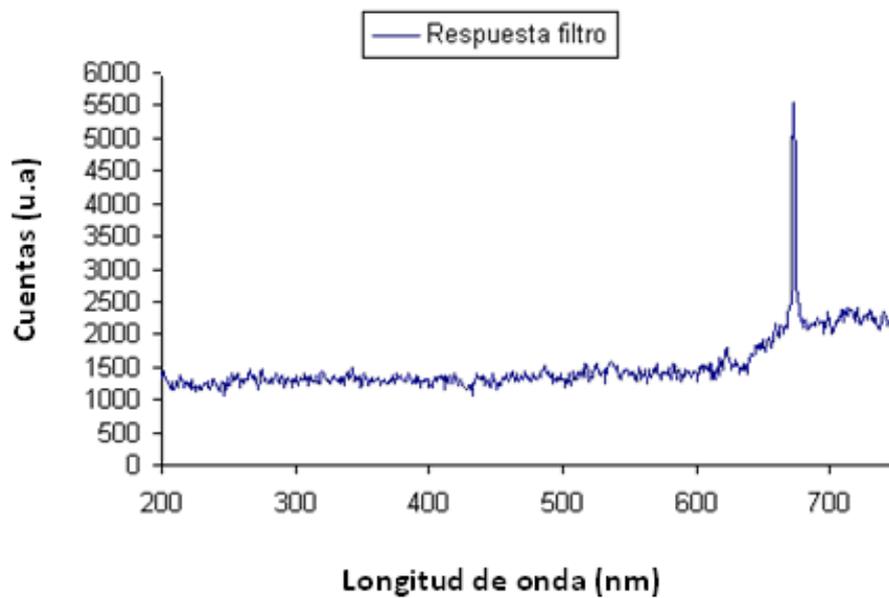


Figura 2.24 - Espectro de visión del filtro en rojo.

En la respuesta espectral del filtro, se obtiene su pico de emisión entorno a los 670nm, indicandonos que va ha permitir traspasar las longitudes de onda de su entorno, las cuáles pertenecen con el color rojo.

Caracterización de luz blanca con filtro en Azul:

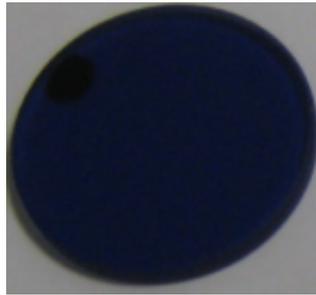


Figura 2.25 - Filtro óptico en 428nm.

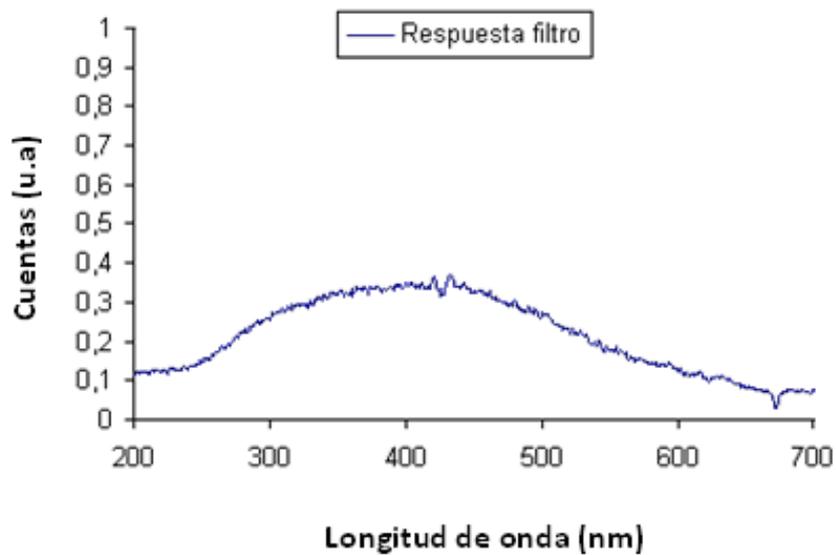


Figura 2.26 - Espectro de luz del filtro en azul.

Se puede apreciar como este filtro óptico, tiene una conversión entorno a los 400nm que es donde se sitúa el color azul, dejando pasar la mayor cantidad de luz en función de sus características entorno a esa longitud de onda, se puede ver como el ancho de banda es muy grande, con lo que este filtro óptico, no es muy selectivo y deja pasar varias longitudes de onda.

Caracterización de luz blanca con filtro en Verde:

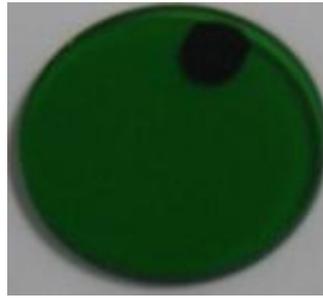


Figura 2.27 - Filtro óptico en 532nm.

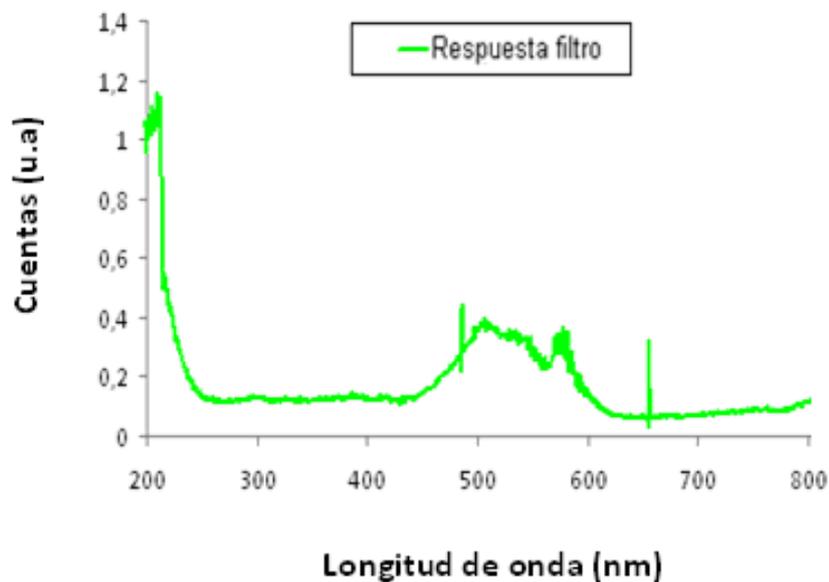


Figura 2.28 - Espectro del filtro en color verde.

En la respuesta espectral de este filtro, se puede apreciar como la region donde traspasa la mayor cantidad de luz es entorno a los 500nm, la cuál, corresponde con el color verde de este filtro óptico.

También se puede observar como este filtro no es muy selectivo, ya que, deja pasar un rango de longitudes de onda de entre [500 – 600]nm, como se aprecia en su respuesta espectral representada en la anterior gráfica.

Caracterización de luz blanca con filtro en Rojo:



Figura 2.29 - Filtro óptico en 632nm.

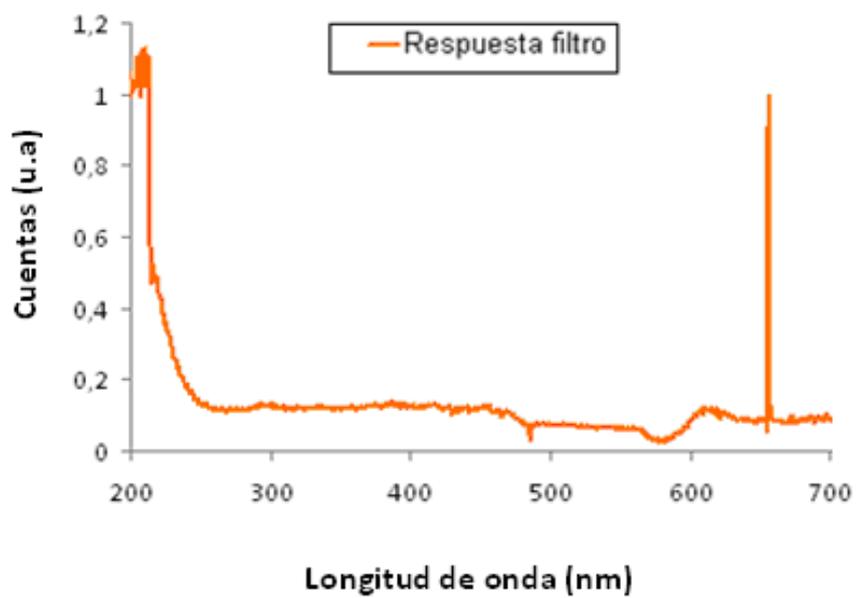


Figura 2.30 - Espectro de emisión de filtro en rojo.

En la respuesta espectral de este filtro, se puede observar como solo deja pasar la luz entorno a los 660nm, que corresponde con el color rojo vivo, apreciando también que este filtro es muy selectivo ya que dicho pico es muy estrecho, traspasa el 100% de la luz ,pero sólo, en esa longitud de onda, o lo que es lo mismo en ese tono del color rojo.

3. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

3.1 Introducción

Con el estudio de este proyecto se ha querido desarrollar en profundidad la monitorización mediante visión artificial del proceso de soldadura TIG, empleando para ello técnicas de iluminación, filtrado y procesado de las imágenes obtenidas en tiempo real.

Se ha iluminado el baño o “*pool*” de soldadura mediante diferentes fuentes de luz centradas en distintas longitudes de onda, diferentes potencias, cambios de intensidad, geometrías, etc. Muchos han sido los aspectos de todos los parámetros estudiados, con el fin de obtener la mayor cantidad de información respecto a la monitorización mediante la técnica tratada.

El *setup* realizado para este proyecto consta de dos partes bien diferenciadas. La primera es la correspondiente a todo el sistema de soldadura, esto es, todos los elementos necesarios para poder realizar soldaduras de arco TIG.

La segunda parte es la que se desarrolla en este proyecto en profundidad, el sistema óptico basado en visión artificial, iluminando el proceso de soldadura de arco TIG con fuentes de luz externas, con el fin de monitorizar el proceso en tiempo real.

3.2 Set up de soldadura

La primera parte, es la correspondiente a la realización de las soldaduras, que a su vez se divide en tres partes:

La primera corresponde con el control del movimiento de los motores y de la antorcha de soldadura en sus diferentes ejes. El montaje se puede controlar tanto en el eje vertical como en el horizontal, respecto a la base donde irán colocadas las chapas a soldar. El movimiento en los ejes se realiza mediante el controlador de los motores MM4005 de la marca *Newport*, que es el encargado de dirigir a los motores MTM100PP, también de la marca *Newport*, encargados de que ejecuten con exactitud el movimiento y trayectoria deseados.

Ese control de los motores se puede realizar de una forma manual mediante los botones incorporados en el panel frontal o de manera remota a través de una interfaz mediante el ordenador.

La segunda parte del montaje, es el control de los gases (Ar y He) de protección del arco, que es utilizado durante el proceso de soldadura. Este gas es conducido hasta las cercanías de la antorcha, se utiliza una mezcla de Argón y Helio (80%-20%) aprox., para la eliminación de posibles procesos de oxidación que se pueden generar durante el proceso.



Figura 3.1 – Sistema del gas de protección.

Por último, la tercera parte necesaria, es la correspondiente con la máquina de soldar o fuente de alimentación Mastertig 2200 de Kemppi, que le proporciona la corriente y voltaje necesarios a la antorcha de soldadura TTC 200, también de Kemppi, para que el electrodo de tungsteno (material no consumible) colocado en el centro de la antorcha pueda realizar las soldaduras de una manera eficiente.

El control de esta parte, también está totalmente automatizado a través del programa *WeldStorm*, desarrollado en el departamento de soldadura, como se comentó con antelación. Tanto el setup para la realización de las soldaduras, como la instrumentación y software para su control han sido realizados por José Julián Valdiande, del departamento de soldadura, Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria [6],

Visión general de la zona de trabajo de este proyecto:

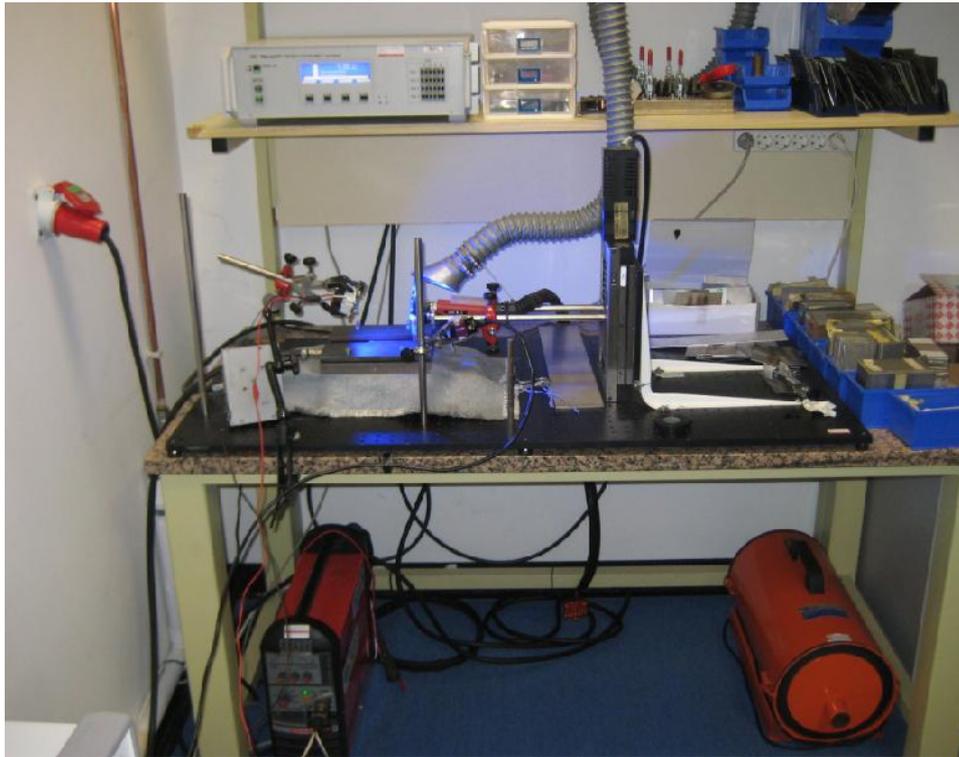


Figura 3.2 *Set up* de soldadura.

La segunda parte de este proyecto, es la correspondiente con el sistema óptico basado en visión artificial del proceso de soldadura de arco en tiempo real, y se sirve de referencia de los trabajos realizados por B. M. Abdullah y J. S. Smith entre otros, de las universidades de King Fahd University of Petroleum and Minerals (KFUPM), Dhahran, Saudi Arabia y University of Liverpool, Liverpool, U.K respectivamente [7].

En este artículo se propone iluminar la zona donde se produce la soldadura TIG con diferentes fuentes de iluminación externas a distintas longitudes de onda y geometrías, añadiendo su debido filtrado y procesado de imagen.

3.3 Set up del sistema de visión

En este capítulo se pretende exponer el montaje dedicado a la captación visual del proceso de soldadura, iluminando el proceso mediante fuentes de luz láser y súper diodos fundamentalmente.

El sistema de basa en una fuente de iluminación externa, una cámara de video industrial (visible), un filtro óptico, una lente de enfoque y fibra óptica empleada en ocasiones. También se emplean un software de visión para el control de la cámara, una fuente de alimentación para las fuentes de luz externa, una tarjeta adquisidora de datos USB de National Instruments, y un PC de control.

Las fuentes de iluminación externas y los filtros ópticos que han sido expuestos con anterioridad, son la premisa fundamental de este sistema, las piezas claves junto con el sensor de imagen.

La fuente de luz es la encargada de iluminar la zona donde el electrodo incide con la chapa, la zona del “pool” de soldadura, donde se alcanzan grandes temperaturas ya que es donde se forma el arco eléctrico que produce la soldadura en las chapas a soldar. Esta fuente de luz requerirá de una gran potencia para poder compensar la radiación luminosa producida por el arco durante la soldadura.

La cámara de video visible, el sensor, también juega un papel importante en este sistema, ya que es la encargada de recoger las imágenes de todo el proceso. Hay que considerar tres parámetros fundamentales a caracterizar en cada soldadura, estos son: la apertura de luz “Shutter”, la ganancia “Gain” y el brillo “Brightness”, dispuestos para su configuración de la siguiente manera:

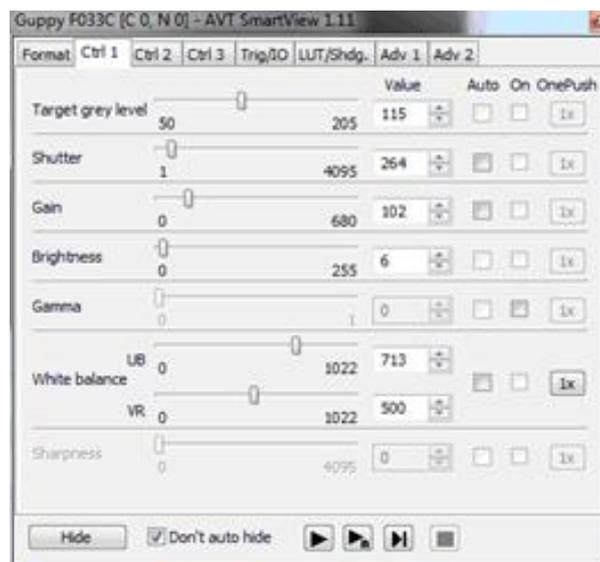


Figura 3.3 - Interfaz de control de parámetros de imagen.

Los filtros ópticos son los encargados de filtrar la luz que va a recoger el sensor del sistema, dejando pasar las longitudes de onda seleccionadas, las cuáles serán captadas por la cámara de video. Éstos se colocan justo en la entrada del objetivo de la cámara, con el fin de que la cámara recoja con la mayor selectividad posible las imágenes del proceso, permitiendo entrar al objetivo del sensor sólo las longitudes de onda deseadas.

La lente de enfoque es de vital importancia en este proyecto, ya que las fuentes de iluminación con mas potencia son los súper diodos y su salida de luz es bastante divergente, al estar formada por 25 LEDs en forma de matriz. Por tanto, colimar ese array de LEDs justo en la zona del cordón de soldadura es fundamental para que las imágenes del proceso adquieran una calidad de imagen satisfactoria.

El software de control de imagen, es el que presenta Allied Vision, para la cámara de video Guppy F033C.

Por último, también se dispone de un ordenador de mesa o PC, siendo necesario para todo el desarrollo y correcto funcionamiento de los sistemas que intervienen en este proyecto.

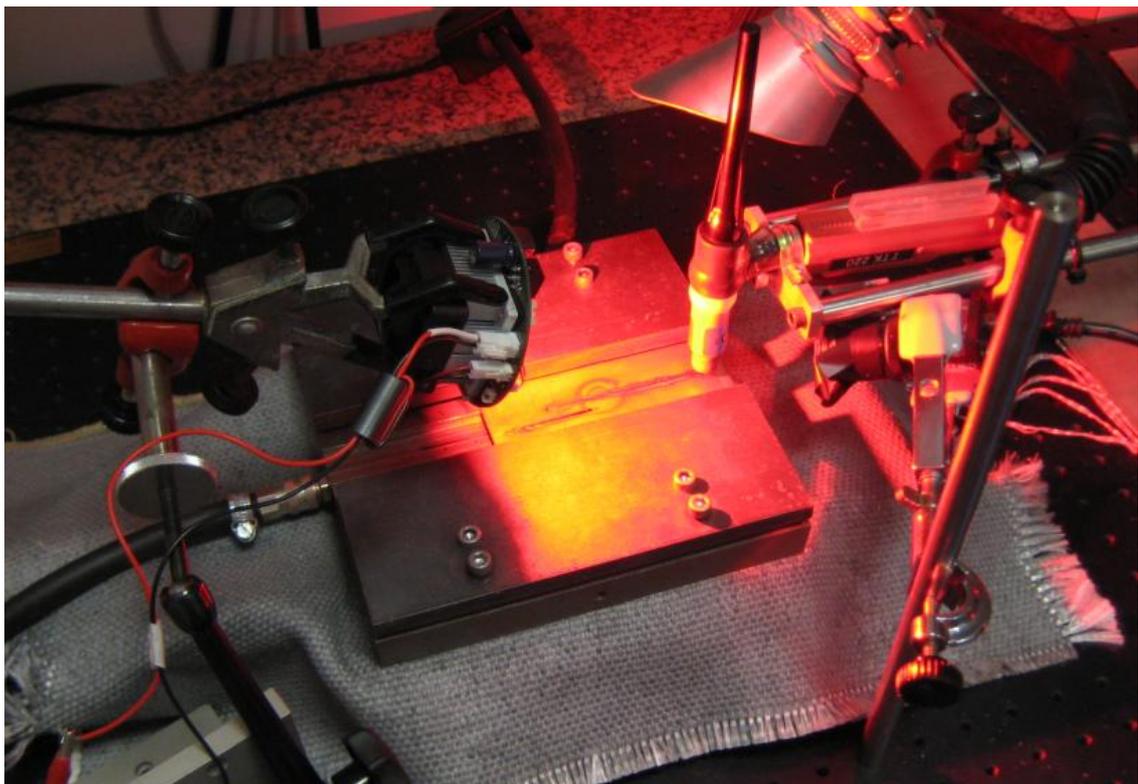


Figura 3.4 – *Set up* del sistema de visión artificial del proceso de soldadura de arco TIG.

El primer problema que surge en el montaje del sistema de visión es el correcto posicionamiento de los elementos que lo componen. La cámara requiere de una óptica integrada más un filtro óptico a su entrada para la captación de la imagen que serán transferidas al PC para su posterior procesado.

En este trabajo se ha estudiado el posicionamiento del sensor en todas las zonas posibles del montaje, deduciendo que la recepción óptima de la imagen se consigue al colocar la cámara justo enfrente de la fuente de luz, como se verá a continuación.

La fuente de luz que iluminará la sección del “*pool*”, tiene que tener un ángulo de incidencia de su haz respecto a la base de 45º, mientras que la cámara de video, de unos 40º con la horizontal.

3.4 Experimentos

A continuación, se expondrán todos los casos implementados con el fin de validar el correcto funcionamiento del sistema sensor propuesto.

El siguiente estudio y análisis se centrará en la obtención de una visión del proceso de soldadura de arco TIG en tiempo real mediante la iluminación de la sección a soldar con un láser en verde, con un láser de helio neón (rojo) y con dos súper diodos, uno con luz azul y otro con luz roja.

También se realizará con estos dos súper-diodos un enfoque con una óptica colimadora de sus haces de luz, focalizando así la máxima radiación de luz de los mismos en la zona del baño de soldadura.

Todos los análisis realizados en el laboratorio han sido con chapas metálicas de acero inoxidable (AISI-314) de [1,5 - 3] mm de espesor.

Los primeros análisis de esta parte tendrán los siguientes parámetros comunes que son fijados en el entorno gráfico proporcionado por el software ALLIED VISION de la cámara de vídeo Guppy.

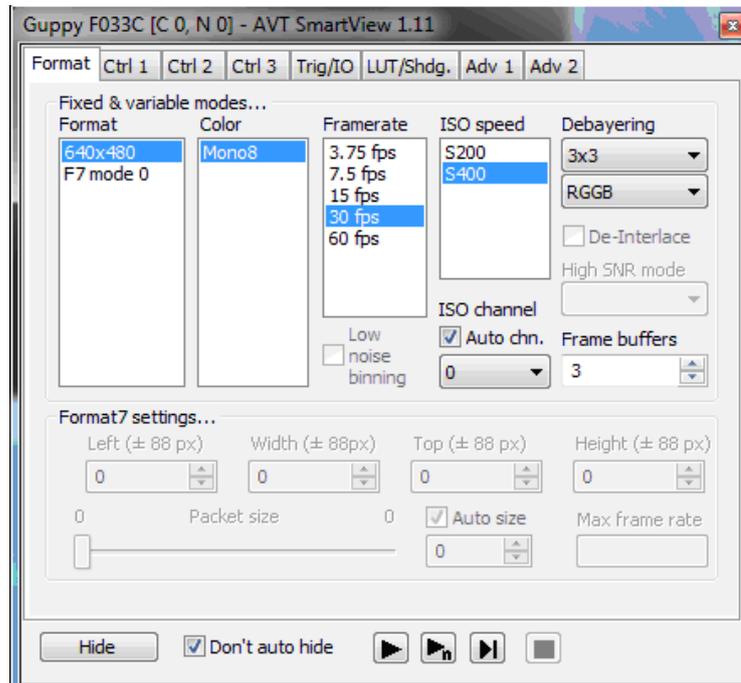


Figura 3.5 - Parámetros comunes de las imágenes.

Estos parámetros indican que el tamaño del formato de las imágenes recogidas es de 640x480 píxeles, con un color monocromático en base al formato RGGB (colores fundamentales “Red, Green, Blue”) y con una captura de imágenes en regimen de 30 frames por segundo.

TABLA RESUMEN DE PRUEBAS REALIZADAS

Pruebas Realizadas	Fuente de Luz	Filtro óptico	Lente de enfoque
Prueba 1	Sin Iluminación	No	No
Prueba 1.1	Sin Iluminación	Si	No
Prueba 2	Láser verde	----	---
Prueba 2.1	Láser verde	No	No
Prueba 2.2	Láser verde	Si	No
Prueba 3	Láser Helio-Neón	Si	No
Prueba 4	Súper diodo "Rojo"	----	----
Prueba 4.1	Súper diodo "Rojo"	Si	"Lupa"
Prueba 4.2	Súper diodo "Rojo"	Si	"Lupa"
Prueba 4.3	Súper diodo "Rojo"	Si	No
Prueba 4.4	Súper diodo "Rojo"	Si	No
Prueba 4.5	Súper diodo "Rojo"	Si	No
Prueba 4.6	Súper diodo "Rojo"	Si	No
Prueba 4.7	Súper diodo "Rojo"	Si	Si
Prueba 5	Súper diodo "Azul"	----	----
Prueba 5.1	Súper diodo "Azul"	Si	No
Prueba 5.2	Súper diodo "Azul"	Si	No
Prueba 5.3	Súper diodo "Azul"	Si	Si

Prueba 1: Sistema de visión, sin iluminación externa y sin filtrado

A continuación, se muestra la interfaz gráfica del software *WeldStorm*, donde se introducen los valores requeridos para cada soldadura al inicio del proceso. También aquí se pueden definir los defectos más comunes con el fin de detectarlos mediante el procesado, como se verá en el siguiente capítulo:

Valores de parámetros de *Distancia de soldadura a realizar*, *Intensidad*, *Frecuencia*, *Velocidad* y *Duración del Ciclo de Trabajo*; serán ajustados en la maquina de soldadura.

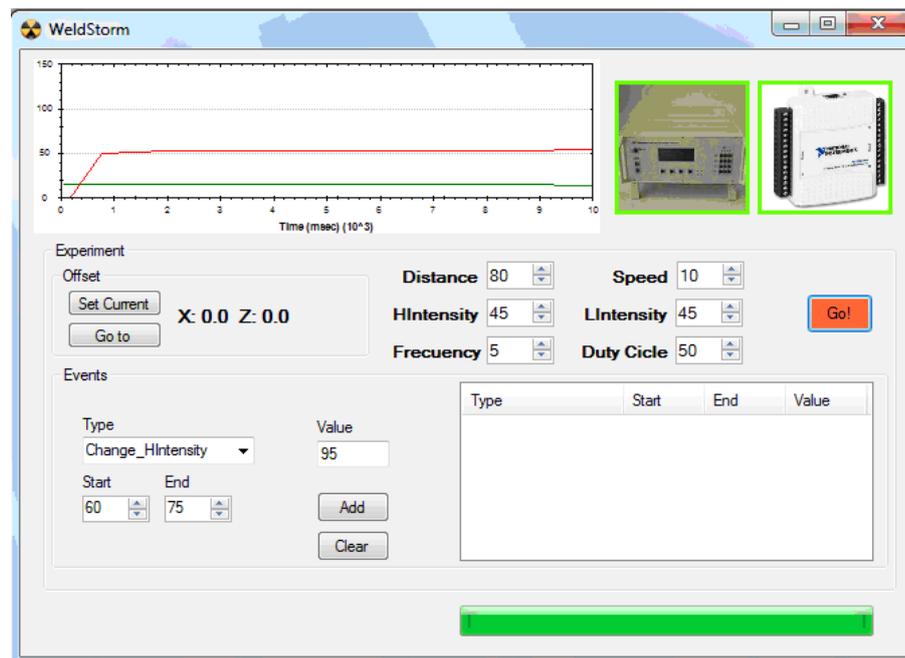


Figura 3.6 - Parámetros de soldadura.

Este primer experimento se ha realizado sin ningún tipo de fuente de iluminación externa ni filtro óptico. Se pretende mostrar la cantidad de luz que se genera durante la ejecución del proceso de soldadura de arco. El sensor se coloca a una distancia (a) que es de 25cm entre antorcha y cámara, con 25cm de altura entre base y cámara (b), con lo que al hacer la arcotag (b/a), se obtiene el ángulo de visión de la cámara, que es 45°.

Los parámetros configurables de la imagen toman los siguientes valores: *Shutter: 60*; *Gain: 1*; *Brightness: 2*; aunque, en esta prueba, no son de gran relevancia ya que no se ilumina con ninguna fuente de luz externa.

Los resultados obtenidos se exponen a continuación:

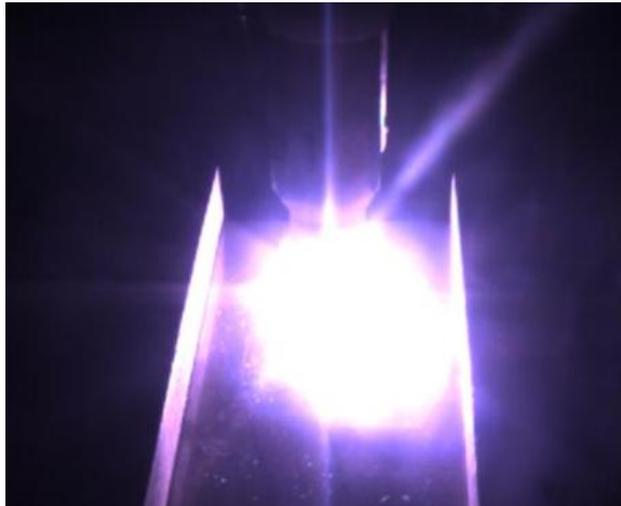


Figura 3.7 – Visión obtenida sin iluminación externa.

Conclusión: La imagen que se recoge con el sensor está saturada de luz, el arco eléctrico genera una intensidad luminosa muy fuerte entorno a la antorcha de soldadura, con lo que es evidente que se necesita disminuir al máximo esa radiación luminosa con una fuente de luz externa para poder adquirir imágenes del proceso con claridad.

La imagen original, tras finalizar el proceso de soldadura es la siguiente:

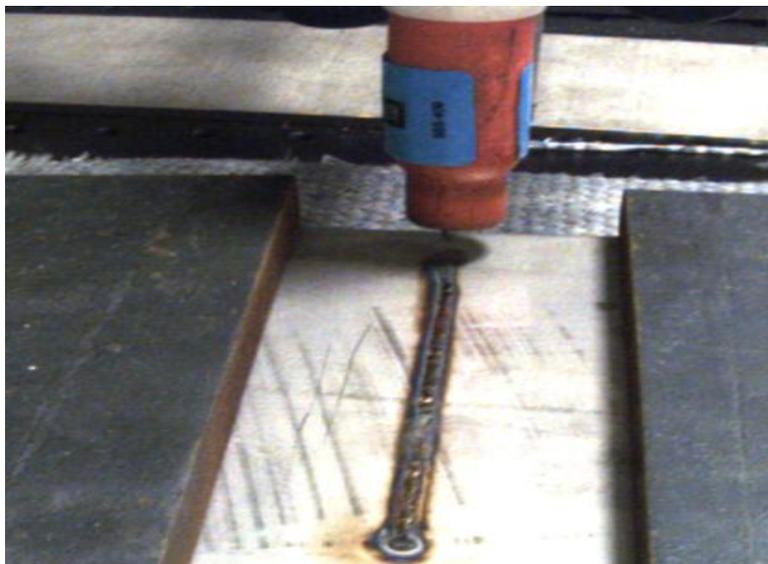


Figura 3.8 - Visión finalizo el proceso.

Conclusión: En esta imagen, no hay ningún tipo de problema, ya que el proceso ha finalizado y se podría realizar un correcto procesado de la misma.

Prueba 1.1: Visión artificial con filtro CWL532-FH10

En esta ocasión se mantendrán las distancias y ángulo de inclinación con respecto a la prueba 1. Para este supuesto se ha colocado un filtro óptico, justo delante de la cámara, con lo que dejará pasar la luz entorno a su longitud de onda característica (532nm).

La visión obtenida es la siguiente:



Figura 3.9 – Visión del proceso con filtrado de imagen.

Conclusión: se puede ver como mejora ligeramente la imagen, pudiendo obtener en cierta medida el cordón de soldadura realizado, pero con cierto retardo ya que no se va viendo la imagen del baño de soldadura justo en el momento de paso del arco, sino que se puede apreciar cuando la intensidad del campo va disminuyendo.

Prueba 2: Puntero láser en verde

Estas pruebas, han sido realizadas con los parámetros detallados en la prueba 1.

Esta fuente de luz, se corresponde con un puntero láser de pequeñas dimensiones, que es alimentado con una tensión de 3.1V a su entrada y su salida es conectada a una fibra óptica de 600um de núcleo para enfocar su haz a la sección de soldadura.

Prueba 2.1: Visión y captura frontal sin filtro

Las primeras pruebas se realizan colocando la salida de la fibra enfocando mediante su haz de luz, justo en frente de la cámara, manteniendo las distancias de 25x25cm en el lado de la cámara y 4cm entre antorcha y salida de luz, con un ángulo de inclinación de 20° respecto a la horizontal.

El sistema de visión corresponde con la siguiente fotografía:

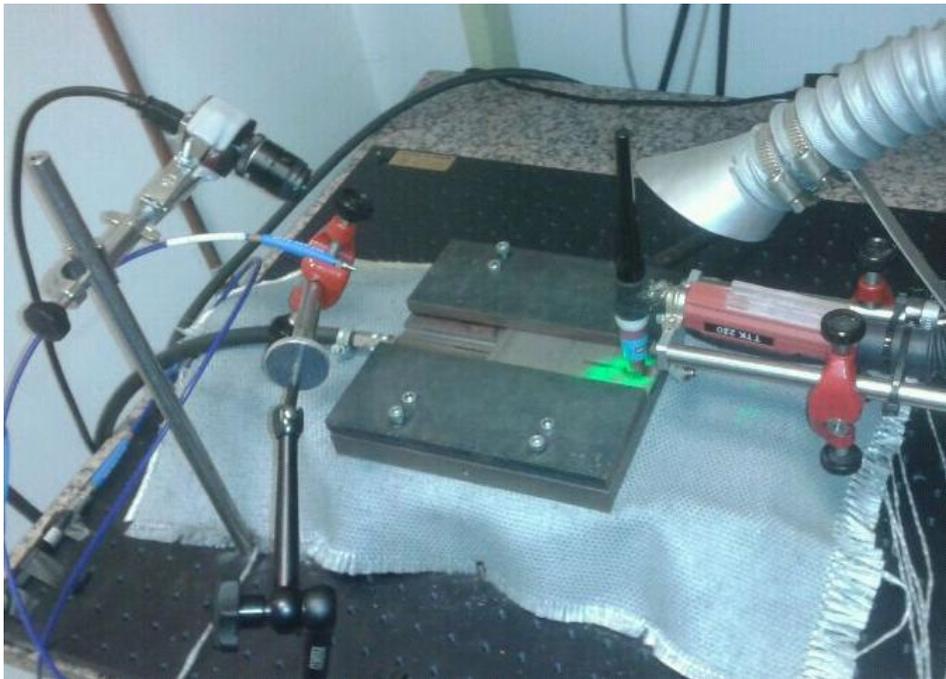


Figura 3.10 – Set up experimental con láser en verde.

Seguidamente, se cambia la posición del haz de salida de la luz, posicionándola en el lateral izquierdo de la antorcha, a unos 12cm de altura desde la mesa y a unos 8cm respecto de la antorcha, con lo que se consigue un ángulo de incidencia del haz luminoso de $33^\circ = (\arctg 8/12)$.

Mediante un continuo ajuste de los parámetros de control de la cámara se obtuvo una visión general un tanto oscura de la zona de trabajo.

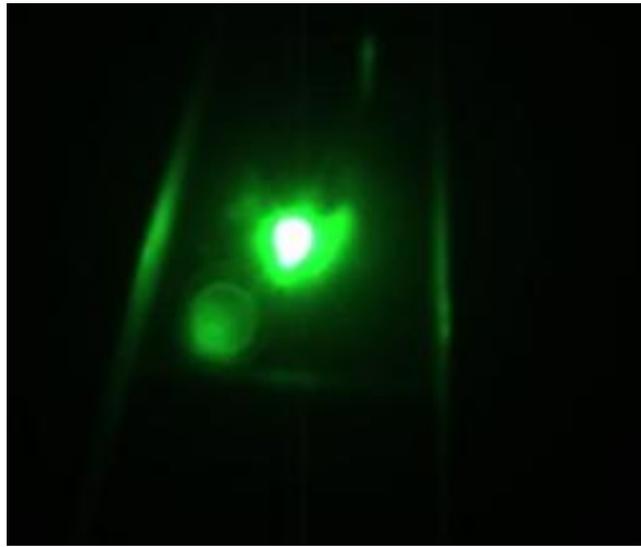


Figura 3.11 - Visión frontal obtenida con láser en verde.

Conclusión: esta configuración no es lo suficientemente adecuada como para obtener una imagen nítida del proceso.

Prueba 2.2: Visión y captura frontal con filtro en verde

Los valores de los parámetros empleados varían en esta ocasión, de tal modo que el *Shutter*= 227; *Gain*=102 y el *Brightness*=7.

Se conecta la fuente de luz, que sigue siendo el láser en verde a unos 532nm, se mantiene la cámara Guppy con su filtro óptico correspondiente a esa longitud de onda y el resto de componentes del sistema de visión.

La imagen obtenida es la siguiente:

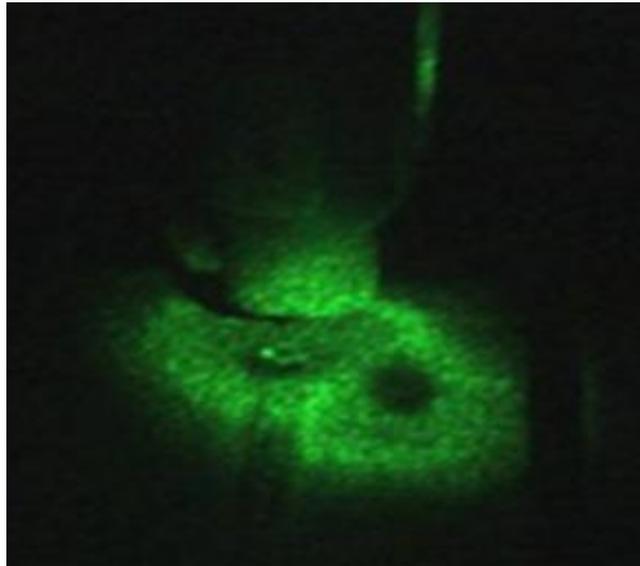


Figura 3.12 - Visión filtrada obtenida con puntero láser en verde.

Conclusión: La imagen obtenida está demasiado pixelada, se sigue sin obtener una imagen correcta de la pieza a soldar y del baño de soldadura. El láser no tiene la suficiente potencia como para iluminar de una manera correcta la zona deseada.

A partir de este punto se cambiará la fuente de tensión que alimenta la fuente de luz externa, que será utilizada en todas las pruebas posteriores.

El cambio de fuente de alimentación fue debido a que las fuentes de luz que se utilizan en las siguientes pruebas requieren de una gran potencia para mantener su funcionamiento en régimen continuo.

Esta fuente se corresponde con una DC Power Supply E3634A de Agilent, que proporciona hasta 7A, 25V o 4A, 50V.

Prueba 3: Visión con láser de Helio-Neón

En la vigente prueba se dispone de una fuente de luz láser de Helio Neón de 5mW de potencia y con una longitud de onda caracterizada entorno a los 632nm (rojo). Se trata de un láser que tiene una salida de luz muy puntual con un “spot”, que no llega a 1cm de diámetro.

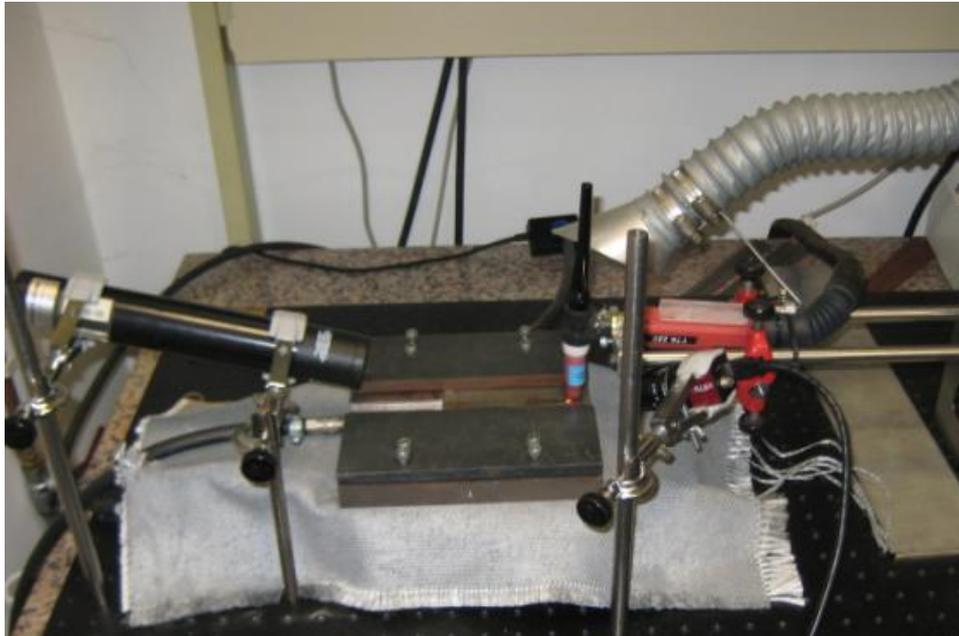


Figura 3.13 - Set up experimental con láser de Helio Neón.

Los resultados obtenidos mediante esta configuración del sistema sensor, se pueden apreciar en la siguiente imagen:

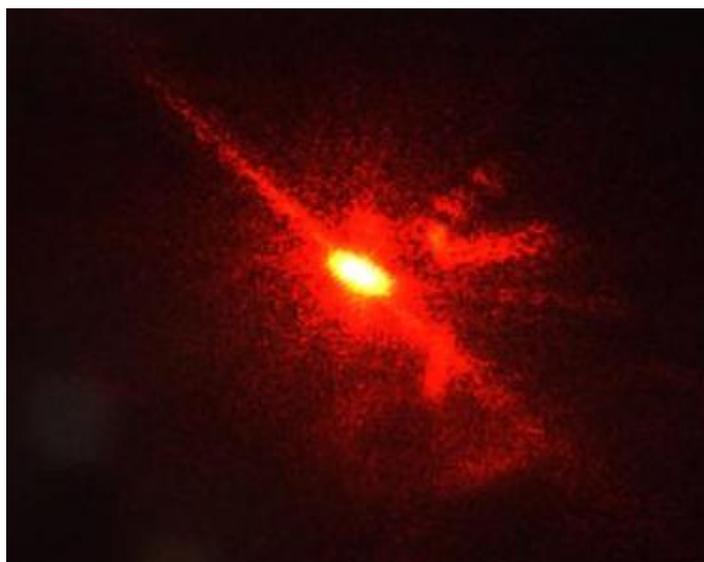


Figura 3.14 - Visión obtenida con el láser de Helio Neón

Conclusión: A la vista de la imagen escogida de este proceso, se aprecia como esta fuente de luz no posee la suficiente potencia como para iluminar adecuadamente el baño de soldadura, para monitorizarlo de una manera adecuada, la imagen no debería quedar tan píxelada y se debería apreciar con claridad la geometría sobre la que se trabaja.

Solución: La primera medida que se debe tomar, es colocar una fuente de luz de mayor potencia para poder iluminar la zona donde se crea la soldadura de manera adecuada, para posteriormente poder monitorizarla con algún resultado viable.

Prueba 4: Visión con súper diodo en Rojo

Para la siguiente prueba realizada, se ha cambiado la posición de la fuente de luz, ahora la iluminación se hace justo debajo de la cámara de visión, teniendo en cuenta que ésta todavía se encuentra justo delante de la antorcha de soldadura.

Con esta disposición el ángulo de la cámara ha variado ya que ha aumentado su altura a 28cm y la lente baja hasta los 25cm, con lo que el ángulo de inclinación de la lente está aproximadamente ahora, en unos 47º más o menos, desde el punto central de la lente, unos 45º.

Se ha cambiado también la fuente de luz en el sistema de visión, ahora se tiene un súper diodo que se compone de un array de 25 LEDs, que emiten en una longitud de onda de unos 632nm (rojo).

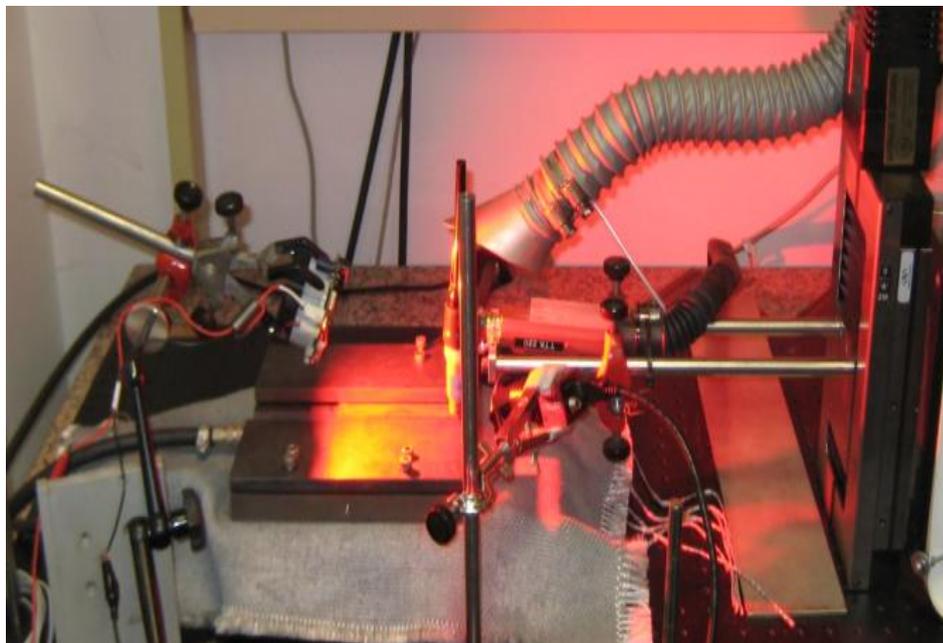


Figura 3.15 - Set up experimental con súper diodo en rojo.

Los parámetros configurables de *Shutter*, *Gain* y *Brightness* toman los siguientes valores:

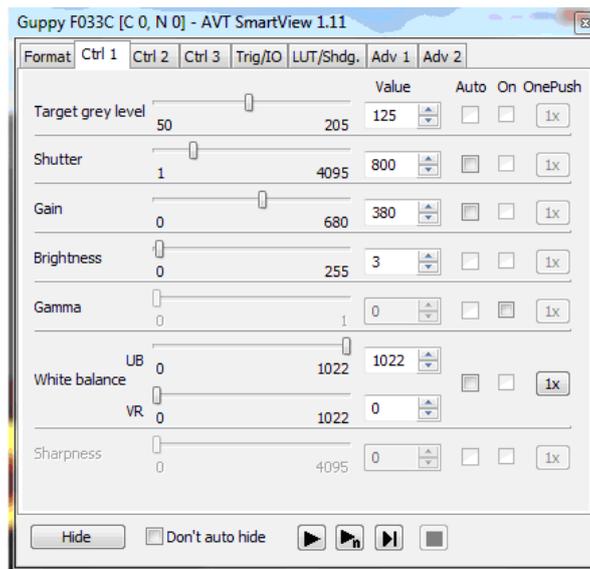


Figura 3.16 – Parámetros de imagen de prueba 4.

La imagen obtenida es la siguiente:

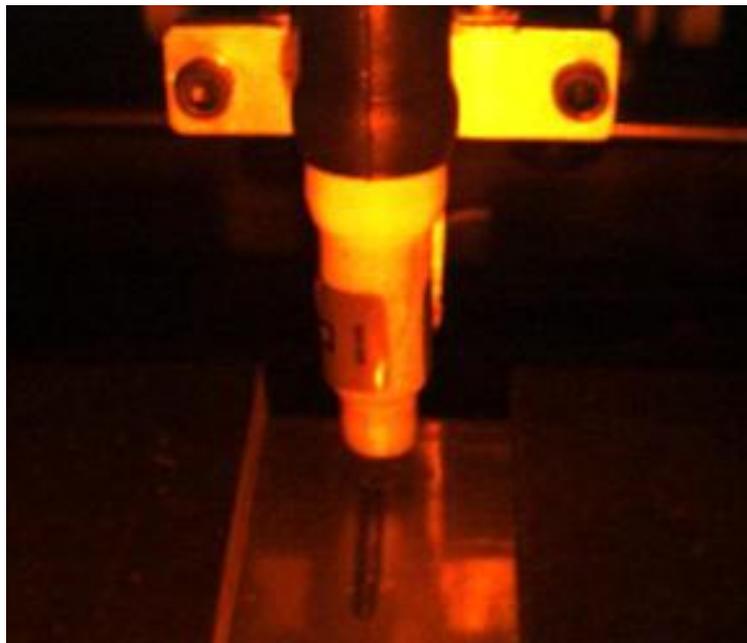


Figura 3.17 – Visión obtenida con súper diodo en rojo.

Prueba 4.1: Iluminación por encima de la cámara, con una lente en el borde de su salida y con filtro NB1J14.

Ahora, se ha colocado una lente justo delante de la fuente de luz, se trata de una lente tipo lupa, con el fin de mejorar los resultados, también se ha cambiado su enfoque a unos 12cm por encima de la cámara, con lo que su ángulo de visión ha sido modificado de tal manera que $\arctg(35/22) = 57.84^\circ$ con la horizontal.

La imagen obtenida es la siguiente:

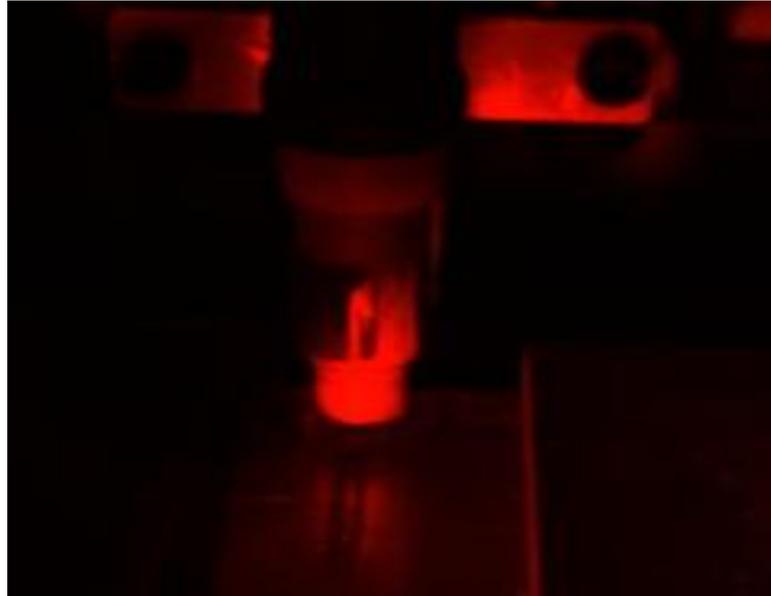


Figura 3.18 - Visión con lente formato "lupa" y súper diodo en rojo.

Conclusión: Se puede apreciar como la imagen adquiere un color más rojizo y tenue que la anterior imagen, pero la geometría del cordón de soldadura sigue sin apreciarse de manera correcta.

Nota: se puede apreciar como el proceso de soldadura ya ha finalizado, con lo que no existe saturación de luz en el proceso.

Solución: Se mejoraría la visión del cordón realizado, teniendo en este caso, una óptica de mayor enfoque colocada en la salida de nuestra cámara, con el fin de obtener una mayor claridad en la geometría del baño soldadura.

Prueba 4.2: Iluminación por debajo de la cámara y con filtro NB1J14.

Se cambia de nuevo la fuente de luz, colocándola por debajo de la cámara de visión, también con la lupa dispuesta a 12cm de distancia para colimar la emisión de la fuente en el entorno del baño de soldadura.

El ángulo de incidencia de la fuente de luz ahora es de aproximadamente $\arctg(16/22)=36^\circ$ respecto a la horizontal, se ha ido ajustando la posición de la lupa respecto a la fuente, para poder adquirir una mayor calidad de imagen, obteniendo así el siguiente resultado.

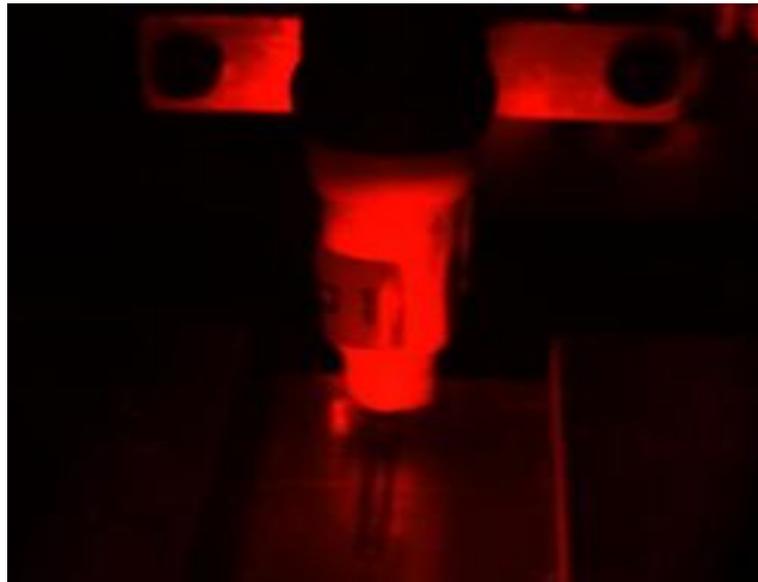


Figura 3.19 - Vision obtenida con iluminación + lupa, con grabación frontal.

Conclusión: Se puede apreciar como la imagen tiene demasiadas sombras, con lo que no tiene buena calidad.

Esto es debido al posicionamiento de la lente respecto a la fuente de luz, aclarando también que la lente de enfoque es una lupa de baja calidad para esta finalidad, no posee el suficiente enfoque para dicha distancia.

En estas últimas pruebas, no se ha comentado una posible solución a cada propuesta debido a que se han estudiado tras finalizar el proceso de soldadura TIG.

Prueba 4.3: Variando su ángulo de inclinación y debidamente filtrada.

En esta ocasión se quita la lupa de delante de la fuente de iluminación, con lo que se sigue manteniendo el mismo ángulo de enfoque de 36° con la horizontal.

Se gira levemente la cámara hacia arriba unos 4° , llegando a los 40° con la horizontal y hasta los 50° , con el fin de mejorar la visión de la zona de soldadura, se podrá apreciar el ángulo de inclinación del sensor en las siguientes imágenes:

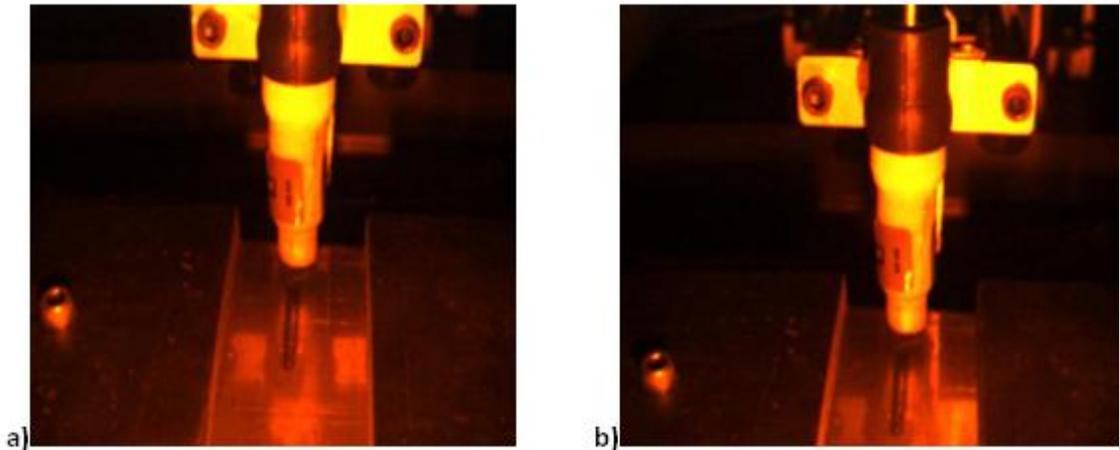


Figura 3.20 – Visión obtenida con súper-diodo en rojo, variando el ángulo de inclinación de la cámara respecto a la horizontal: a) Visión a 40° b) Visión a 50° .

Conclusiones: Se aprecia como el ángulo de inclinación de la cámara en la figura b) resulta excesivo, con lo que la zona donde se produce el cordón de soldadura se aprecia más estrecha y lo que se pretende es lo contrario, obtener la mejor visión posible de la zona a soldar.

En este sentido la distancia de captura de la cámara respecto a la chapa o pieza a soldar es uno de los parámetros que juega también un papel importante a la hora de obtener una visión de calidad del cordón de soldadura.

Prueba 4.4: Enfoque lateral y filtro NB1J14.

Para esta prueba se ha cambiado totalmente de situación la fuente de luz, colocándola en el lateral derecho de la antorcha, con el fin de que su haz luminoso incida sobre el baño de soldadura.

El montaje experimental es el siguiente:

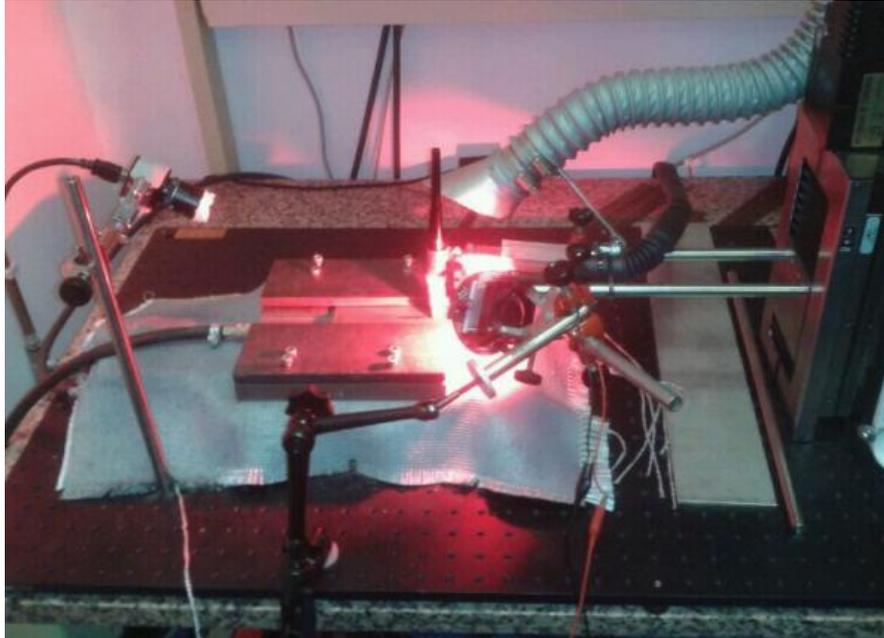


Figura 3.21 - Visión obtenida con enfoque lateral de luz con súper diodo en rojo.

El resultado de esta configuración es la siguiente:



Figura 3.22 – Visión con enfoque lateral con súper diodo en rojo.

Conclusión: La fuente de luz dispersa demasiado su energía en un rango de direcciones demasiado amplio, con lo que no focaliza bien en el baño de soldadura y la visión se satura en la parte derecha de la imagen, sumándose los reflejos del acero.

Solución: Se debería colimar la salida de luz de la fuente en el baño de soldadura y tener una óptica en la cámara con mayor enfoque, ya que, a esta distancia la imagen no es de muy buena calidad.

Visión en directo:

En este caso se va a monitorizar el proceso de soldadura de arco en tiempo real, todos los datos correspondientes a los elementos que componen este sistema en cualquiera de sus variantes están debidamente caracterizados en los apartados finales del capítulo 2.

La visión obtenida con el enfoque de luz lateral y enfoque de cámara frontal es:

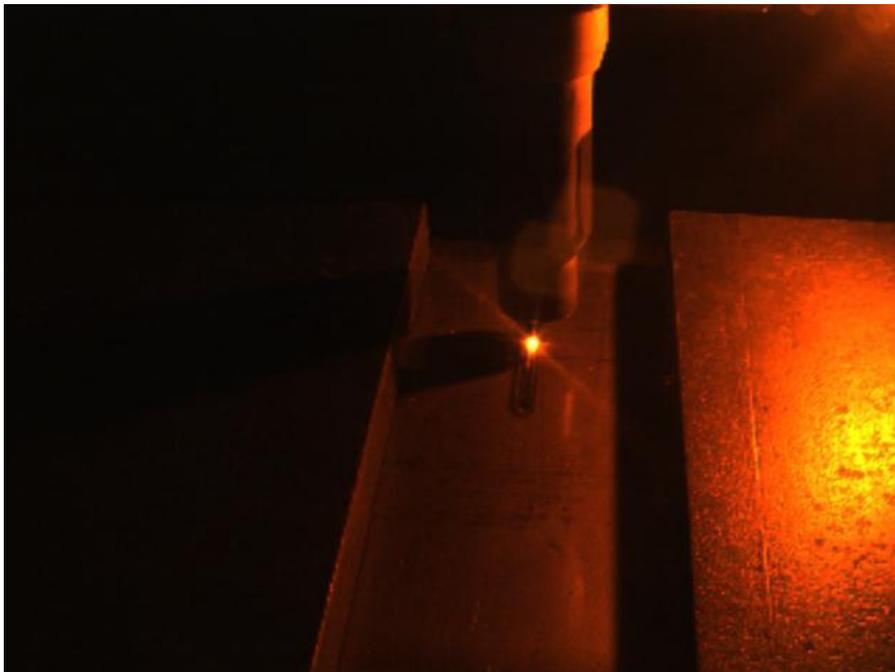


Figura 3.23 – Visión frontal con enfoque de súper diodo en rojo lateral.

Conclusión: Con esta implementación se ha conseguido reducir al máximo el arco de luz generado durante el proceso, obteniendo una visión en tiempo real del baño de soldadura con buena calidad.

Solución: Una posible mejora de esta configuración sería poseer una óptica de entrada de la cámara con mayor resolución a esta distancia, se mejoraría la percepción de la geometría del cordón que se está realizando, obteniendo así una mejor calidad de imagen del proceso de soldadura de arco TIG.

Prueba 4.5: Enfoque de luz frontal y la cámara en el lateral

En la siguiente prueba se han cambiado los elementos de posición de nuevo, de tal manera que:

La posición de la fuente de luz es de nuevo ahora justo enfrente de la antorcha, como antes pero variando el ángulo de tal manera que sea $\arctg(10/16) = 32^\circ$ y colocando la cámara en un lateral, a muy poca distancia de la zona del baño de soldadura y a muy poca distancia de la antorcha de soldadura, con un ángulo de $\arctg(4/7) = 29.7^\circ$.

Se ha colocado en este lugar, ya que, después de varias pruebas se ha obtenido el mejor enfoque desde esta posición, la distancia entre el objetivo y la antorcha es el adecuado para la óptica de la cámara seleccionada.

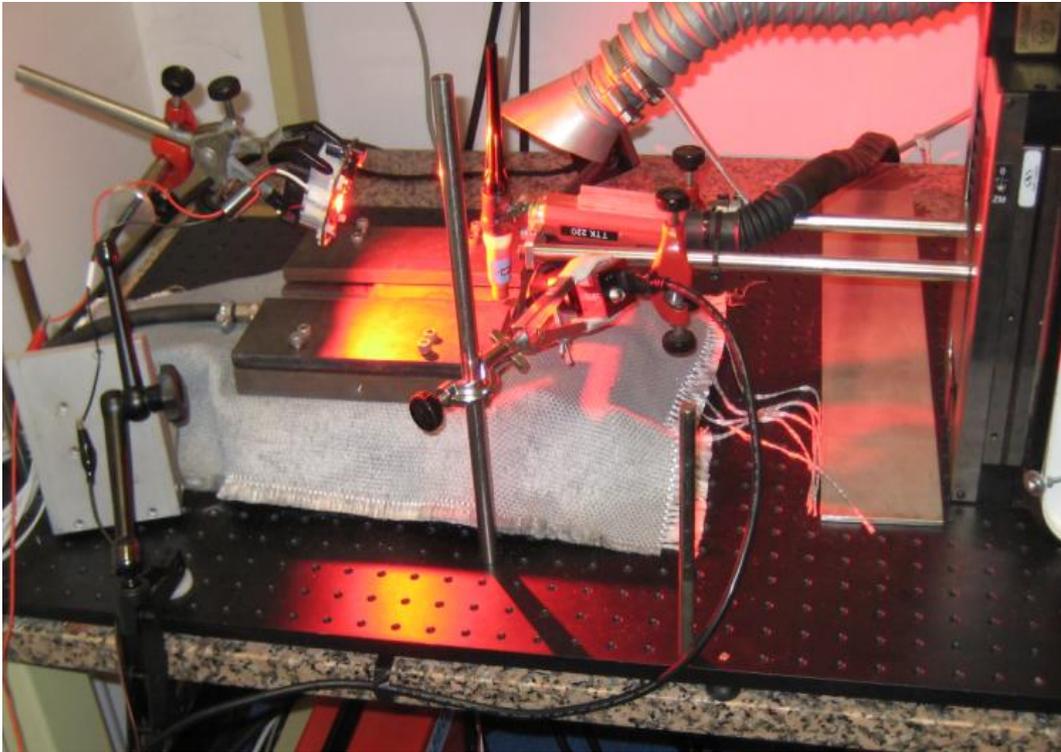


Figura 3.24 – Set up experimental con súper diodo en rojo y sensor en el lateral.

La primera imagen obtenida es la siguiente:

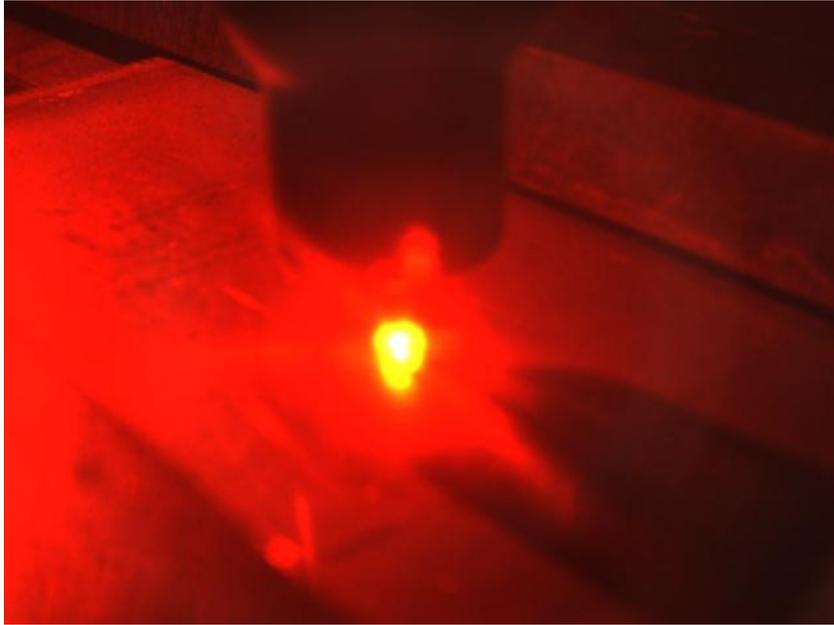


Figura 3.25 – Visión lateral con super diodo en rojo, saturada.

Conclusion: En esta imagen no se puede apreciar nada más que la iluminación de la antorcha, ya que está saturada completamente. Esto es debido a que la cantidad de luz que incide en la cámara es excesiva para la configuración seleccionada.

Solución: La solución en este caso, sería escoger un filtro óptico en esta misma longitud de onda (632nm), pero con una anchura espectral menor, además se debe rebajar el *shutter* de nuestra cámara lo máximo posible, para que, en la medida de lo posible, la imagen no se sature y se pueda obtener una imagen satisfactoria del proceso.

Prueba 4.6: Secuencia de visión con enfoque y captura frontal

Los parámetros de la imagen empleados en las siguientes pruebas, son:

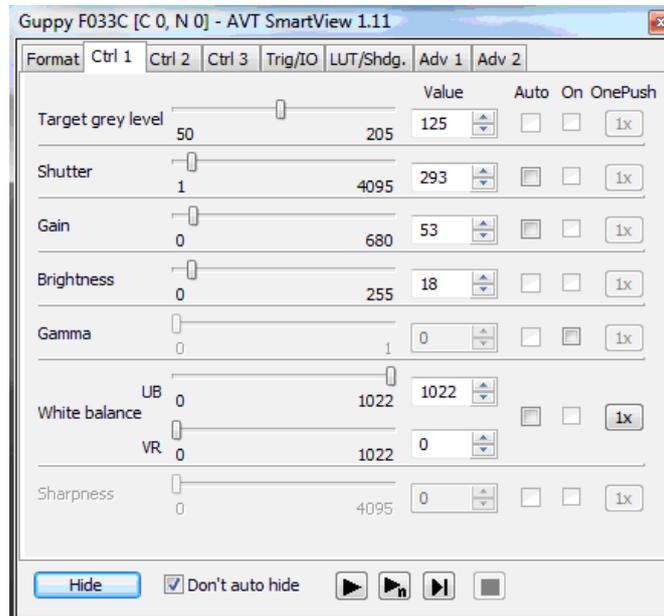


Figura 3.26 – Parámetros de imagen con captura y enfoque frontal.

Resultados obtenidos mediante el software que controla los motores, maquina de soldadura, tiempo, velocidad, etc. “WeldStorm”, descrito en el primer apartado de este capítulo:

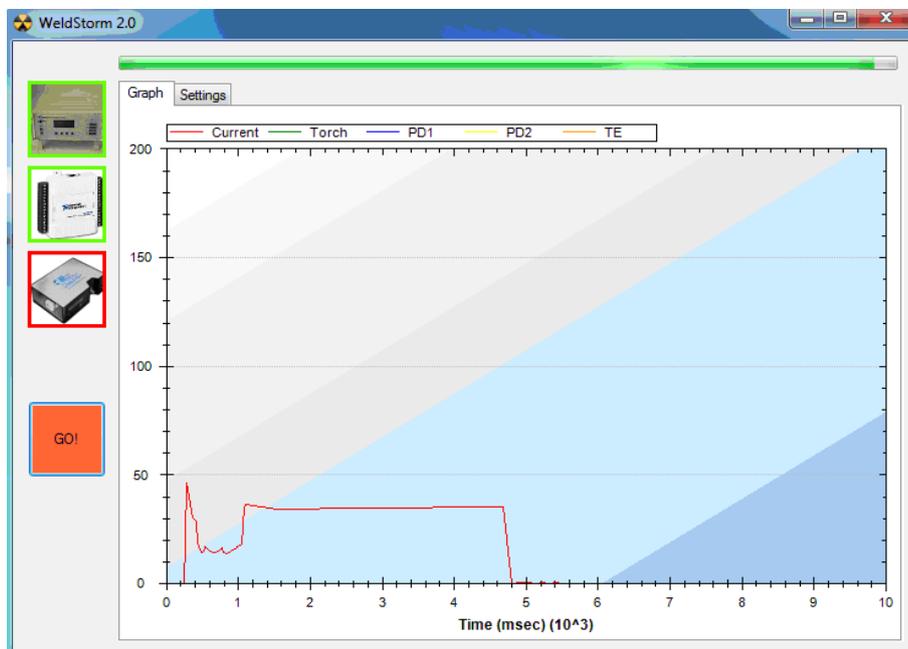


Figura 3.27 – Resultados de WeldStorm con visión y enfoque frontal.

Conclusión: Se puede apreciar, como la intensidad crea un intervalo de un segundo, donde disminuye su intensidad a la mitad, esto es debido a que la maquina da un chispazo al comienzo del proceso para poder generar el arco electrico y comenzar la soldadura, al

principio no existen las suficientes condiciones de voltaje y corriente entre el electrodo y la chapa, como para que la soldadura sea correcta y siempre se deja un margen al comienzo de un proceso de soldadura.

Solución: Siempre que se vaya a soldar, se debería colocar la chapa con un poco de margen antes, para que, llegado el punto de union de inicio requerido, las condiciones sean óptimas y se forme un buen cordon de soldadura, a partir de donde se precisa.

Proceso de soldadura:

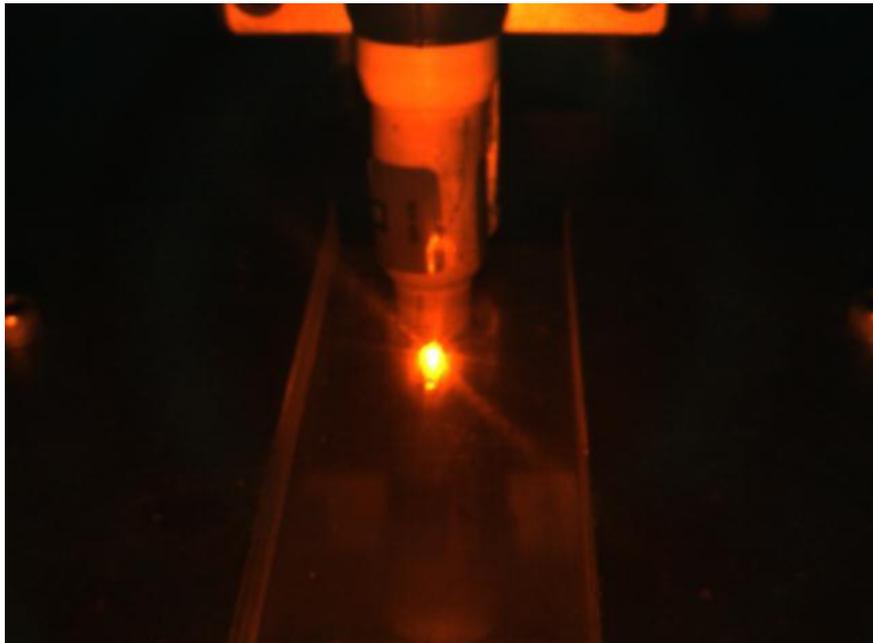
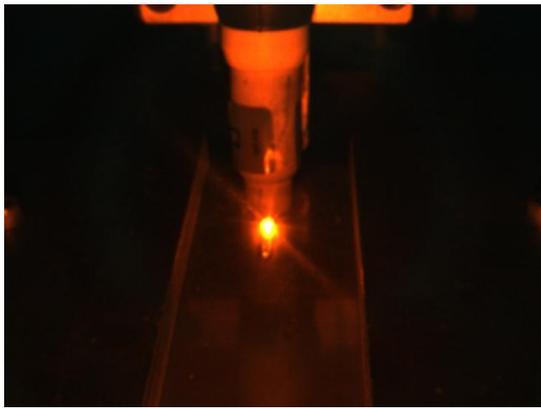


Figura 3.28 – Visión al comienzo del cordon.

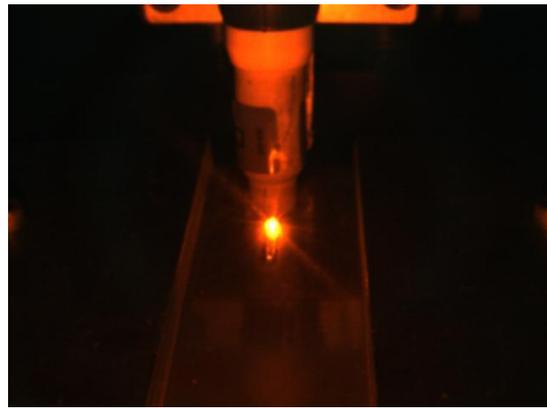
Conclusión: A la vista de la imagen, y sabiendo que al principio de la soldadura, el arco es mas intenso, se obtiene una visión de bastante calidad del proceso. La unica pega que existe en esta configuración del sistema sensor, es que la geometria no se aprecia con demasiada resolución, se ve algo alejada.

Solución: En este caso, se podria incorporar una óptica de mayor enfoque a nuestra cámara, con el fin de, obtener un mayor resolución de la geometría del cordón que se está realizando y tener así una visión del proceso con alta calidad.

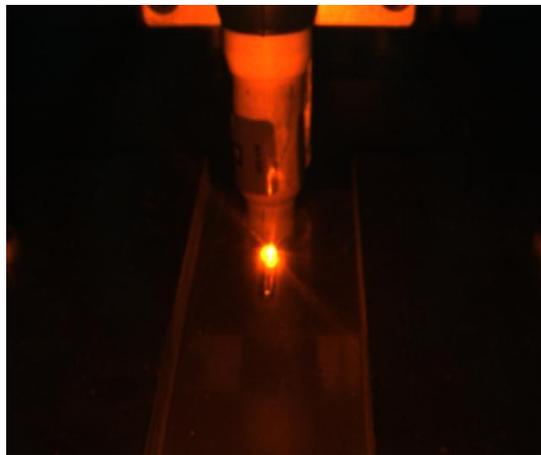
Desarrollo del proceso:



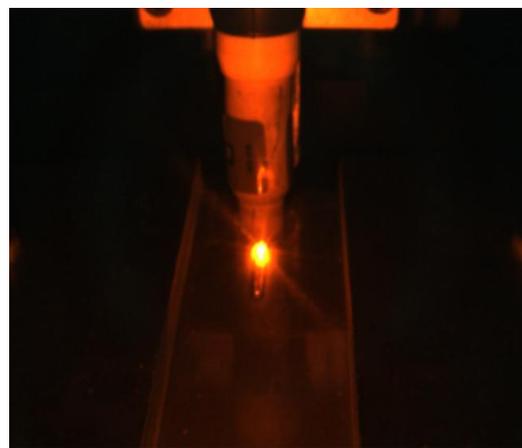
a)



b)



c)



d)

Figura 3.29 – Visión obtenida durante el proceso de soldadura, con captura y enfoque frontal en consecutivos instantes de tiempo: a) $t=1.2\text{seg}$. b) $t= 1.6\text{seg}$. c) $t=2\text{seg}$. d) $t=2.4\text{seg}$.

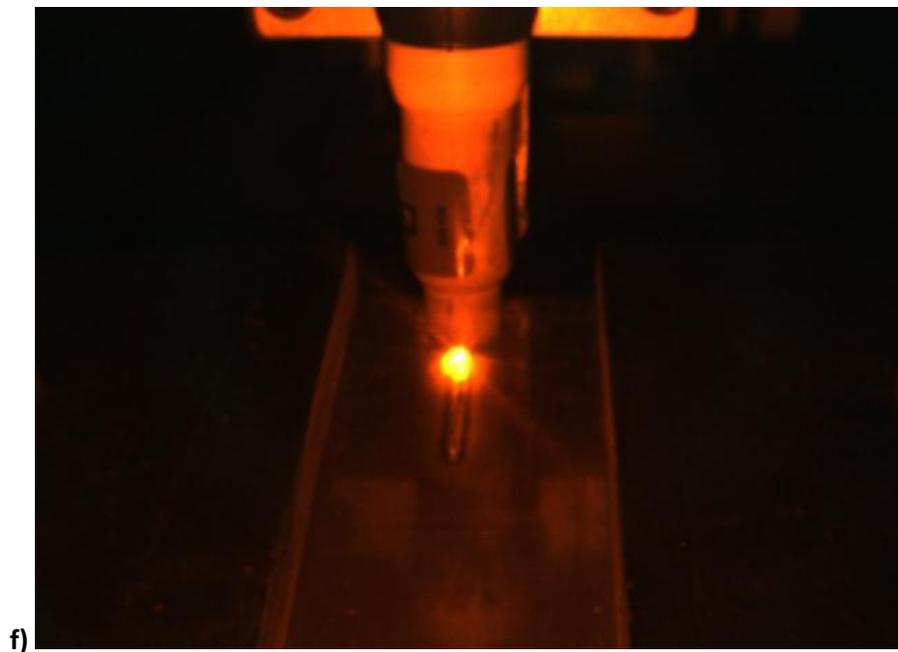
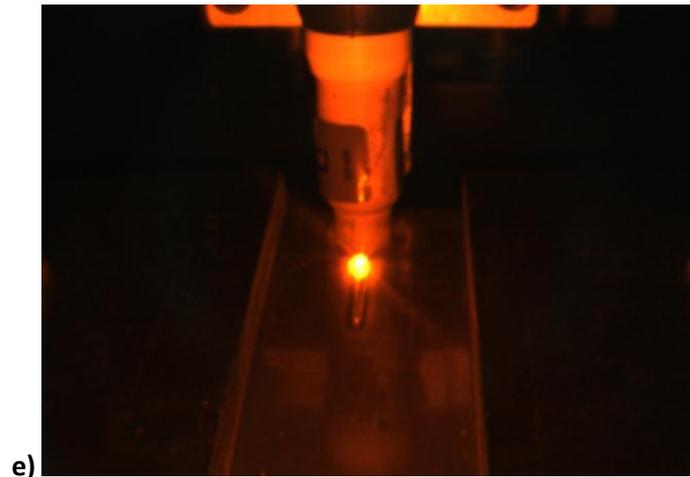


Figura 3.30 - Visión del cordón de soldadura con súper diodo en rojo, en diferentes instantes de tiempo: e) $t=2.8\text{seg}$. f) $t=3.2\text{seg}$.

Conclusión: Se ha intentado resumir todo el proceso de soldadura con las anteriores imágenes dispuestas en serie, estas imágenes son de las mejores que se han conseguido hasta el momento, así todo, todavía hay una pequeña iluminación entorno a la antorcha de soldadura.

Solución: Un aporte a esta configuración, sería iluminar la sección de soldadura mediante una fuente de iluminación de más potencia y bien colimada su haz en la punta del electrodo, con el fin de, eliminar por completo la radiación luminosa producida por el arco. Sin olvidarse de la necesidad de incorporar un objetivo de entrada del sensor con mayor ganancia, si se desea tener una alta calidad en la visión del proceso en tiempo real.

Los parámetros empleados son los mismos que en la anterior prueba realizada.

Las imágenes obtenidas son debidamente filtradas, obteniendo así, la siguiente imagen del proceso in situ (en tiempo real) que mejor representa la serie de todo el proceso.

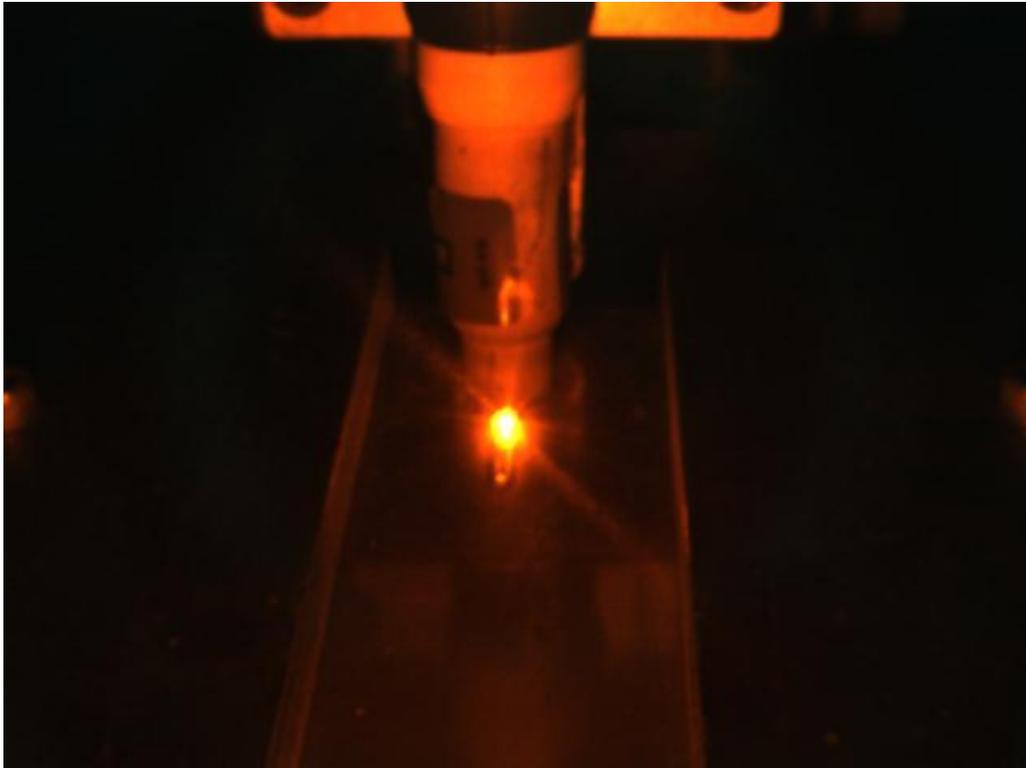


Figura 3.31 – Visión obtenida durante el proceso.

Conclusión: Tras una serie de pruebas, se aprecia como el arco producido por el proceso se ha disminuido al máximo con las características que nos ofrecen nuestros elementos del sistema, se puede apreciar el cordón de soldadura que se realiza con bastante claridad.

Solución: Esta imagen se mejoraría con una fuente de luz colimada al baño de soldadura, como se ha indicado en el anterior proceso, y con una óptica de entrada de la cámara, que a la distancia de 25cm que esta situada, recoga con mayor exactitud la geometría del cordón realizado, como se comentó con anterioridad también.

Prueba 4.7: Visión con lente de enfoque en la fuente de luz

En esta prueba, se ha dispuesto de una lente de enfoque, que se ha comentado anteriormente, esta lente se coloca a la salida de las fuentes de luz de los dos súper diodos, colimando en lo posible sus 25 haces que componen su matriz, en la zona del baño de soldadura.



Figura 3.32 - Lente de enfoque para las fuentes de luz.

En la vigente prueba de visión que se esta realizando, también se puede apreciar como se dispone de un sistema multisensor, ya que existen dos sistemas simultáneos. Por un lado, se aprecia el sistema de monitorización visual con su óptica de enfoque de luz, y por otro lado, se puede apreciar un micrófono que será el encargado de recoger la señal acústica generada durante el proceso.

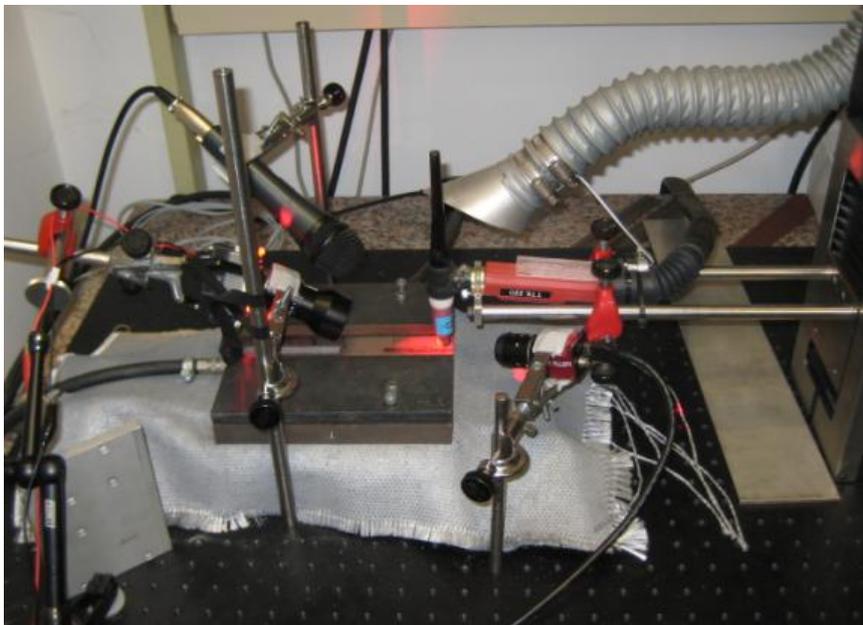


Figura 3.33 - Set up experimental con lente de enfoque integrada.

Los resultados de esta configuración del sistema de monitorización visual son los siguientes:

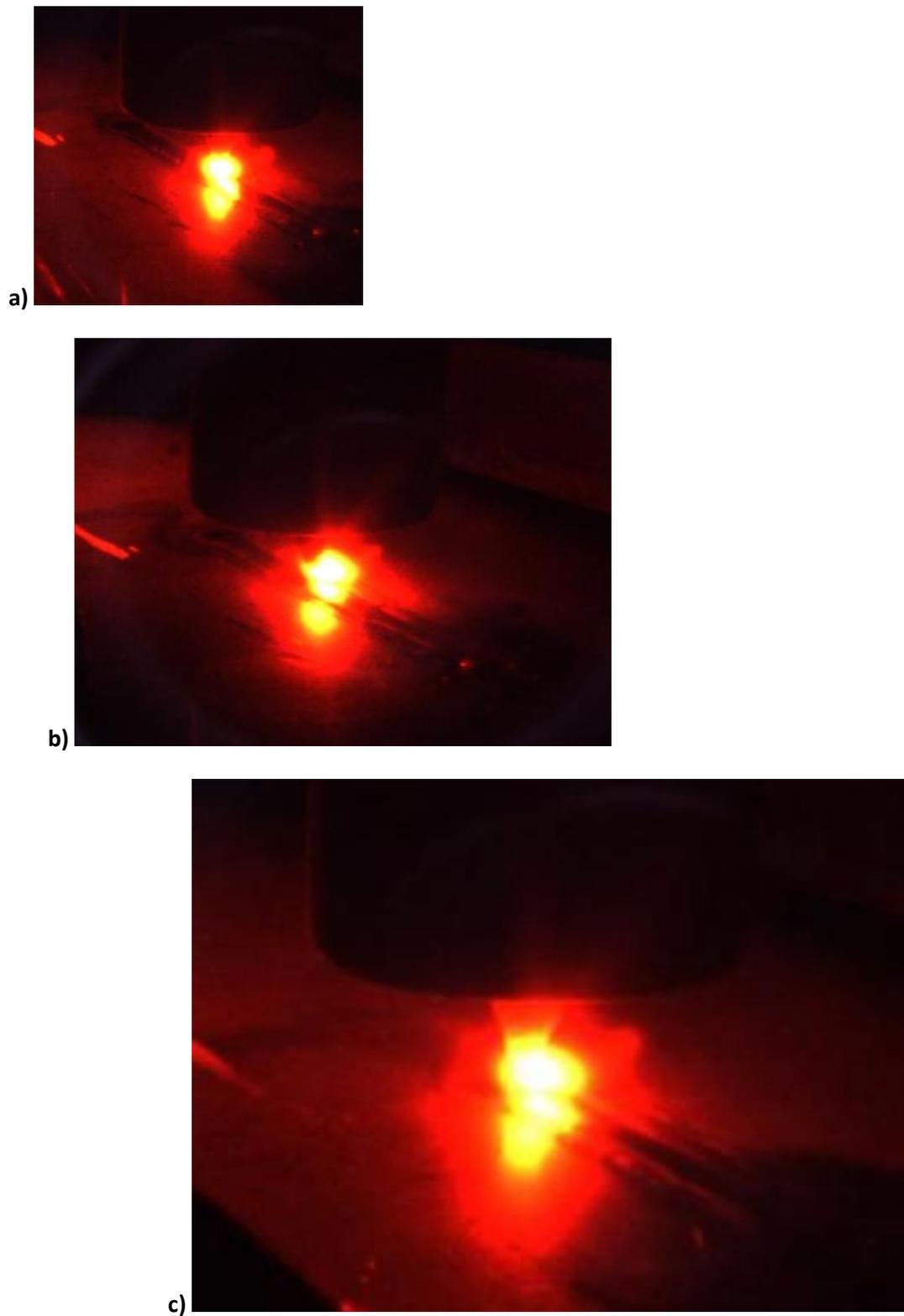


Figura 3.34 - Visión del proceso de soldadura con óptica de enfoque durante el proceso:

a) t=2seg. b) t=3seg. c) t= 4seg.

Visión obtenida tras finalizar el proceso de soldadura, donde la antorcha está retornando a su posición original, para estar dispuesta a realizar la siguiente soldadura:

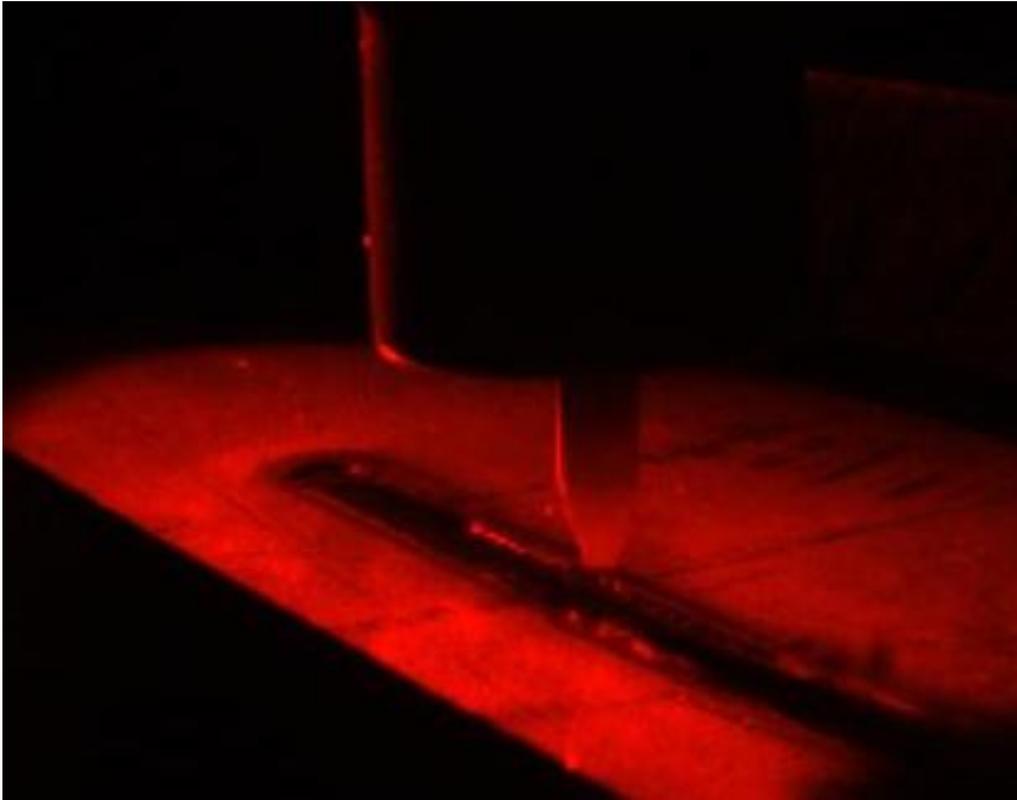


Figura 3.35 - Visión lateral obtenida tras finalizar el proceso de soldadura.

Prueba 5: Visión con súper diodo en Azul.

En estas otras pruebas que se presentan a continuación, la fuente de luz se corresponde con otro súper diodo, pero ahora, emitiendo con menor longitud de onda, ya que corresponde con luz azul, teniendo en cuenta que debe filtrarse la imagen adecuadamente, esto quiere decir que, su filtro óptico debe estar en la misma longitud de onda

Cada fuente de luz, debe llevar incorporado su correspondiente filtro óptico en su misma longitud de onda, en este caso es de 470nm, debidamente caracterizado, para trabajar con exactitud y poder sacar la eficiencia a la visión que estamos obteniendo en dichas pruebas.

Prueba 5.1: Enfoque frontal y captura lateral con filtro CWL532-FH10

La disposición de los elementos del sistema es la siguiente:

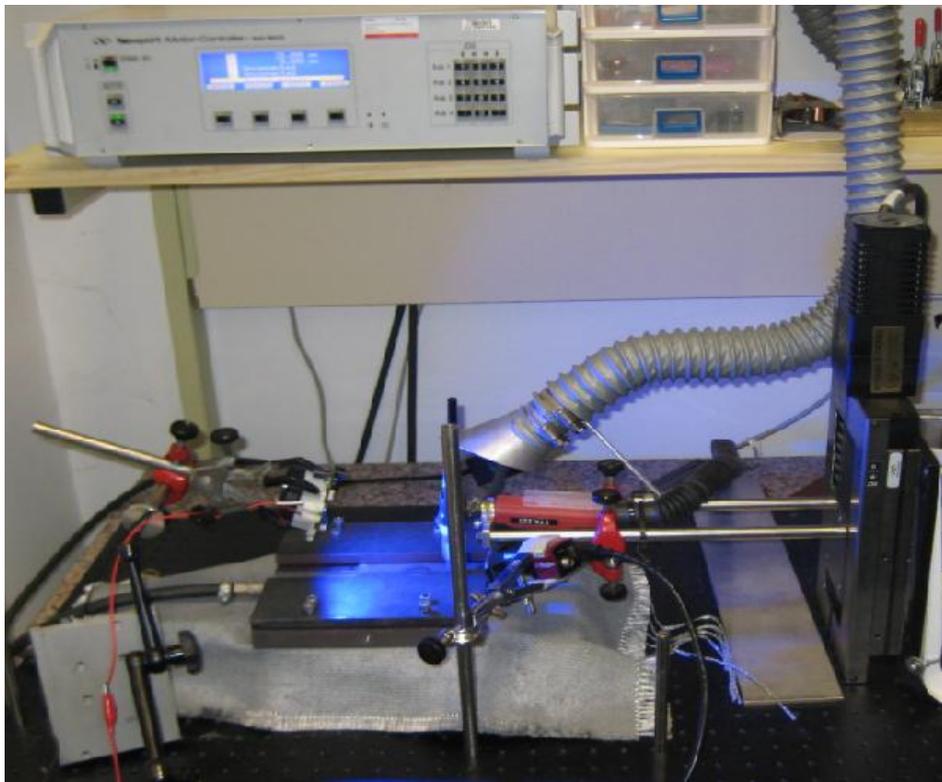


Figura 3.36 - *Set up* experimental con súper diodo en azul.

Los parámetros introducidos para la captación de la siguiente imagen son los siguientes:

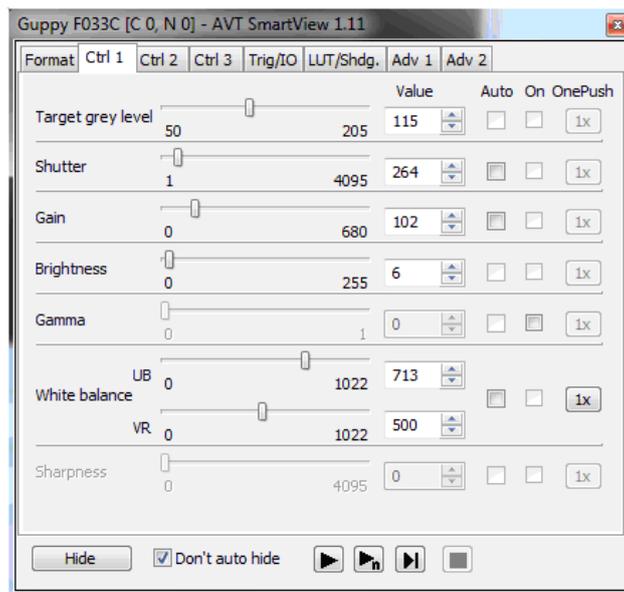


Figura 3.37 – Parámetros de imagen con super diodo en azul.

Visión obtenida tras finalizar el proceso de soldadura y el motor con la antorcha posicionado en situación de inicio para realizar un nuevo cordón.

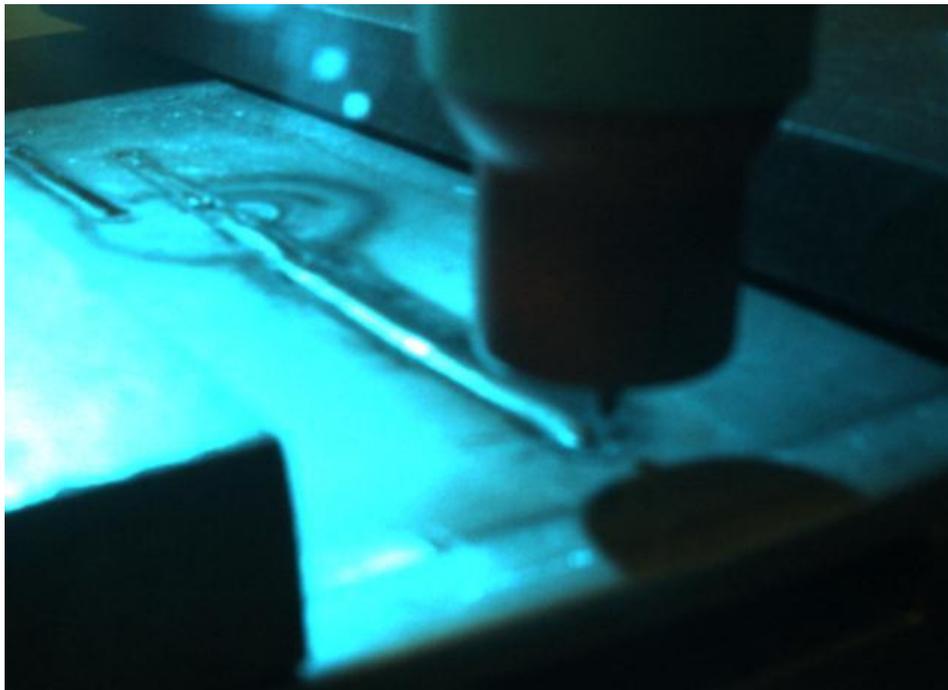


Figura 3.38 – Visión lateral con super diodo en azul tras finalizar el proceso.

Conclusión: La imagen tiene bastante reflexión de luz incidente en la chapa proveniente de la fuente de luz, esto es debido a que, la fuente de luz ilumina gran parte de la pieza y la chapa metálica en este caso, refleja gran cantidad de luz sobre la entrada de nuestra cámara.

Solución: Una buena solución sería, colocar una lente a la salida de la fuente de luz, enfocando así la mayor parte de su energía luminosa justo en el entorno de la antorcha, con lo que el arco se reduciría al máximo y los reflejos en la chapa serían mínimos.

Prueba 5.2: Aumento de intensidad

Se sigue con el mismo sistema, pero ahora, se eleva la intensidad a valores más altos, entorno a los 90 amperios, con el fin de ver hasta que nivel de intensidad nos permite esta fuente de luz monitorizar el proceso.



Figura 3.39 – Visión lateral con elevada intensidad de trabajo.

Conclusión: El campo creado es demasiado intenso, la intensidad que se ha introducido provoca una pluma demasiado grande para las características de los elementos del sistema dispuesto, recordando que nuestro sensor ahora esta colocado a una distancia que es mínima, de unos 4cm, con lo que, no se puede filtrar de manera adecuada y la imagen está saturada.

Solución: La solución, sería de nuevo, focalizar la salida de la fuente de luz en el baño de soldadura, para que la radiación que, en este caso es bastante elevada se reduzca, para poder obtener una visión coherente del proceso.

Prueba 5.3: Visión con lente de enfoque y filtro CWL532-FH10

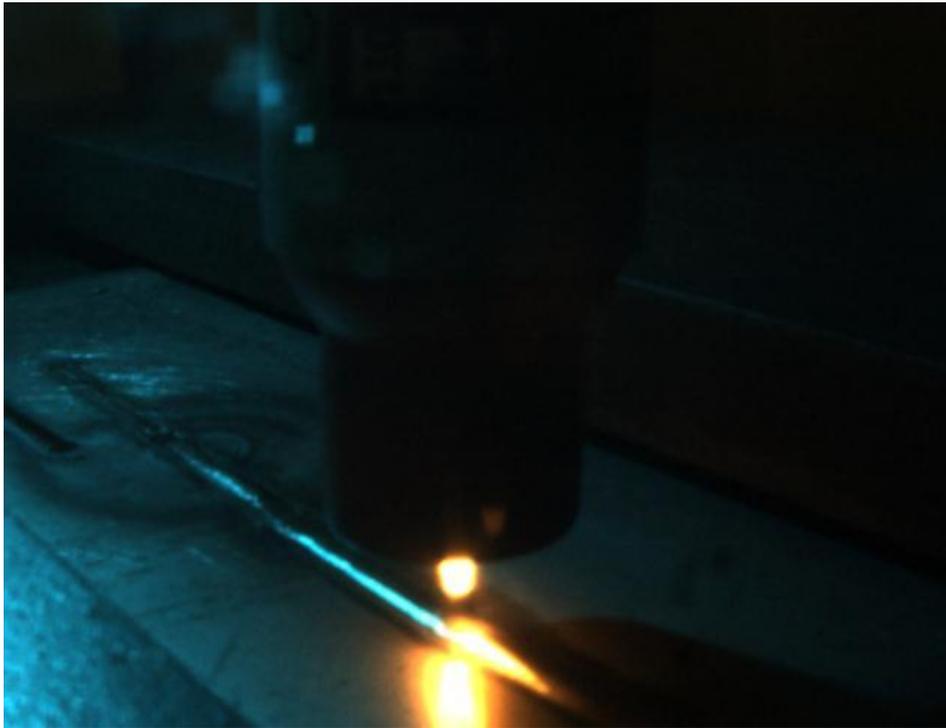


Figura 3.40 – Visión obtenida con súper diodo en azul.

Conclusión: La imagen obtenida es de muy buena calidad, cabe resaltar el reflejo de la pluma en la chapa, cosa muy común con este tipo de chapas metálicas, se obtiene una visión bastante buena del cordón de soldadura realizado y se ve como la antorcha va fundiendo y creando el cordón.

Solución: Cabe resaltar de nuevo, la necesidad que se requiera de este sistema en la empresa, si se requiere de una mejora de calidad de la geometría de la misma, se introducirían una lente de entrada del sensor con mayor resolución.

4. PROCESADO BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL

4.1 Introducción

En los procesos de soldadura, ya bien sean de arco o láser, existen multitud de factores que pueden provocar un defecto en el cordón de soldadura, incluso teniendo gran cuidado al realizarlos.

Un procesamiento de defectos en línea aumenta la eficiencia de cualquier proceso de soldadura, dotándole de una retroalimentación directa, permitiendo así rectificar los parámetros necesarios según el defecto que se origine o verificar la calidad requerida de una manera sencilla y eficaz.

4.2 Sistema de procesamiento

El procesamiento propuesto se realizará mediante el software de *National Instruments NI Vision*. De una manera fácil e ilustrativa se crea el siguiente sistema propuesto, con el fin de detectar los defectos que pudiesen aparecer en los procesos de soldadura de arco TIG automáticamente.



Figura 4.1 - Sistema de procesamiento de imagen, *NI Vision*.

El primer paso de este procesamiento de imágenes es la captura de la imagen, que es recogida por la cámara de video visible CCD. Posteriormente, dentro de esa imagen, se obtiene una región de interés (ROI), que en este caso será la zona donde se produce o crea el cordón de soldadura.

Seguidamente se hace una extracción HSL de luminancia de la región de interés, para, después de tener la imagen deseada en blanco y negro, insertar un umbral o *Threshold* para cuantificar la intensidad lumínica que se produce, con el fin de obtener la geometría de la pluma que se forma cuando se realiza el cordón de soldadura sobre la pieza.

A continuación se inserta una detección de la zona requerida automáticamente: en este sistema se propone una cuantificación de la región de interés (ROI), mediante la aplicación del filtro FFT, que se basa en el truncamiento de la imagen, donde se le introduce un valor de umbral según requiera cada monitorización, aplicando así la transformada a dichos píxeles de interés.

Finalmente, se realiza una cuantificación con valores numéricos de la región que ocupa la pluma, proporcionando los valores del área en (%), los valores cuantificados, los valores estándares, y los valores máximos y mínimos que serán siempre 0 y 1.

Para resumir el esquema de procesamiento propuesto en este estudio se representarán tres filas de imágenes correspondientes con tres de los procesos enmarcados en el sistema expuesto en la figura 4.1.

En ellos, la primera fila se corresponde con la región de interés "ROI", en cada fila se proponen cuatro instantes de tiempo del proceso distintos. La primera nada más empezar el proceso, al cabo de 1 segundo, cuando se produce el defecto y la cuarta imagen, al acabar el proceso.

La segunda fila se corresponde con las imágenes formadas por los píxeles que han superado el umbral o *threshold* establecido (se trabaja con un formato de 8bits que implica un rango de entre [0 - 255] como valores a elegir en cada píxel).

Y en la tercera fila se representan las FFT realizadas para su posterior cuantificación de una manera gráfica.

4.3 Procesado de soldadura sin defectos

Soldadura correcta

Lo primero que se presenta en este capítulo, es la secuencia de un proceso de soldadura de arco TIG realizado correctamente, donde todos sus parámetros siguen un régimen adecuado y la geometría del cordón es la adecuada.



Figura 4.2 - Cordón de soldadura correcta.

La secuencia de procesamiento de imágenes de este proceso es la siguiente:

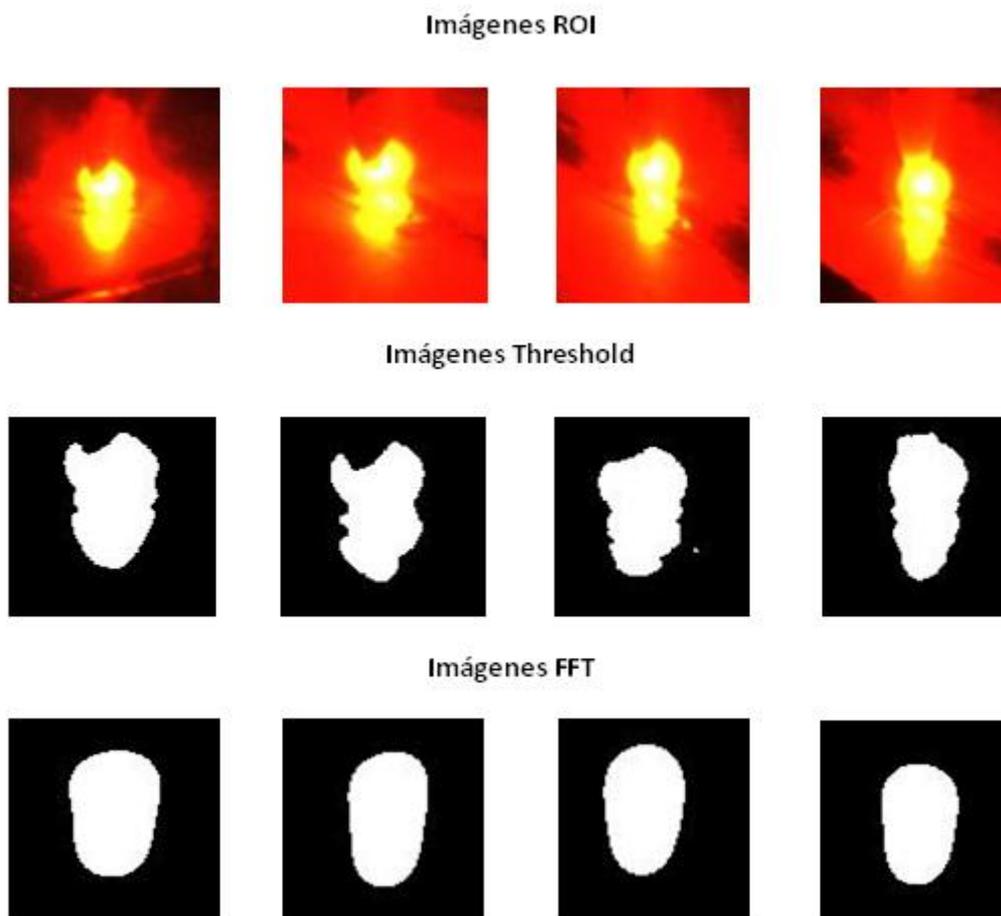


Figura 4.3 – Secuencia del proceso de soldadura bien realizado.

Los resultados del procesado son:

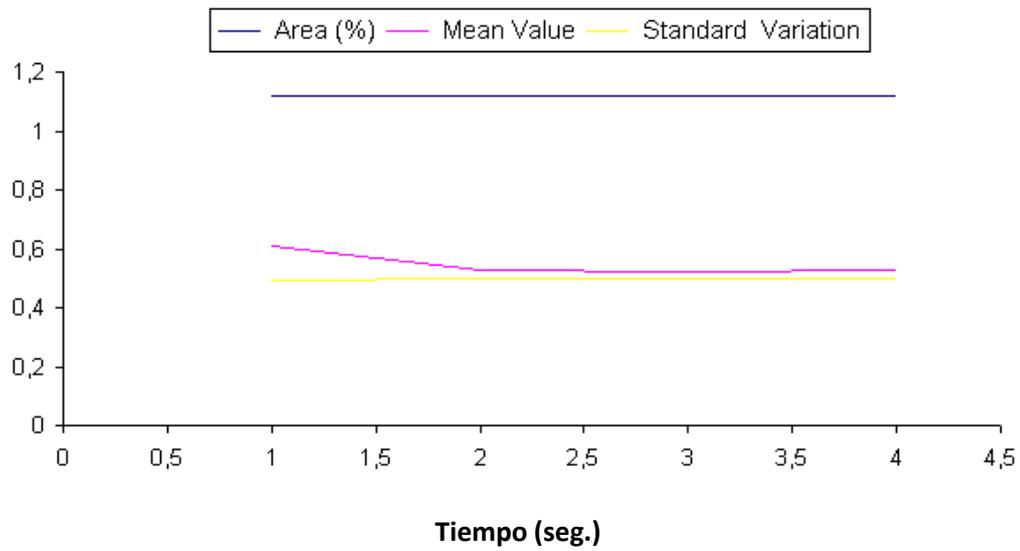


Figura 4.4 - Verificación del correcto proceso de soldadura.

A la vista de los resultados de la anterior gráfica se puede apreciar como la soldadura posee unos valores continuos a lo largo de su trayectoria, lo que indica que el cordón de soldadura es correcto (los defectos están asociados a la aparición de perturbaciones rápidas en el perfil de la señal).

4.4 Procesado de soldadura con defectos

Defectos provocados

Defecto nº 1: Bajada de intensidad

El primer defecto que se procesa es una caída de intensidad de 70 a 40 A en la corriente de soldadura.



Figura 4.5 - Cordón de soldadura con bajada de intensidad.

La secuencia de procesado de imágenes de este proceso es la siguiente:

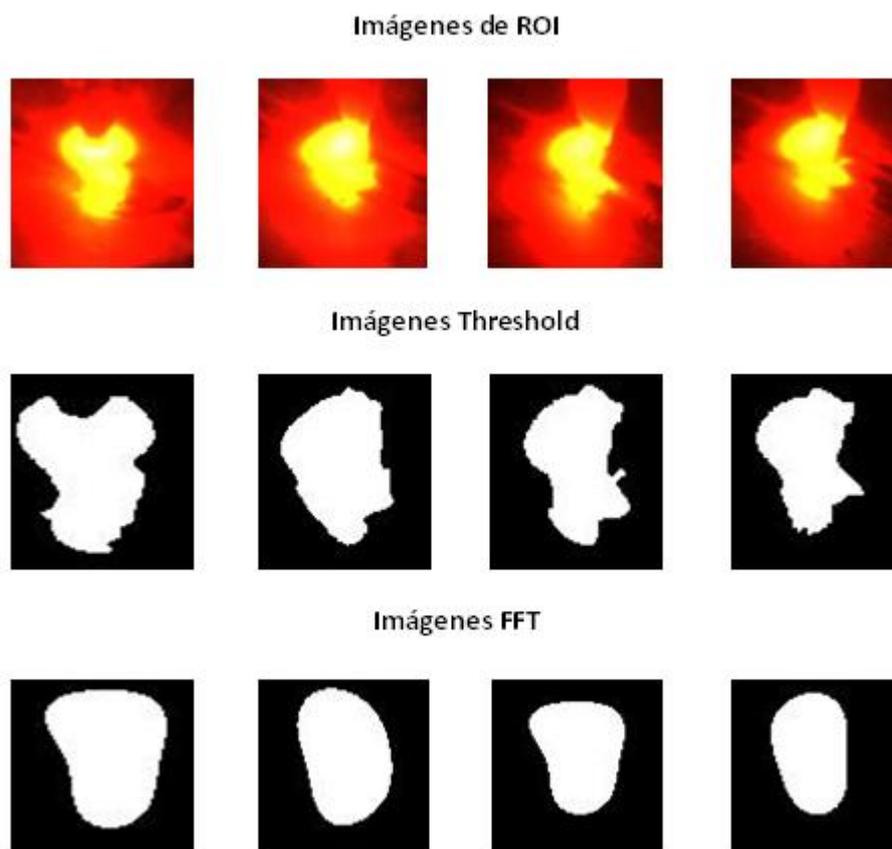


Figura 4.6 – Secuencia del proceso con bajada de intensidad.

Los resultados del procesado son:

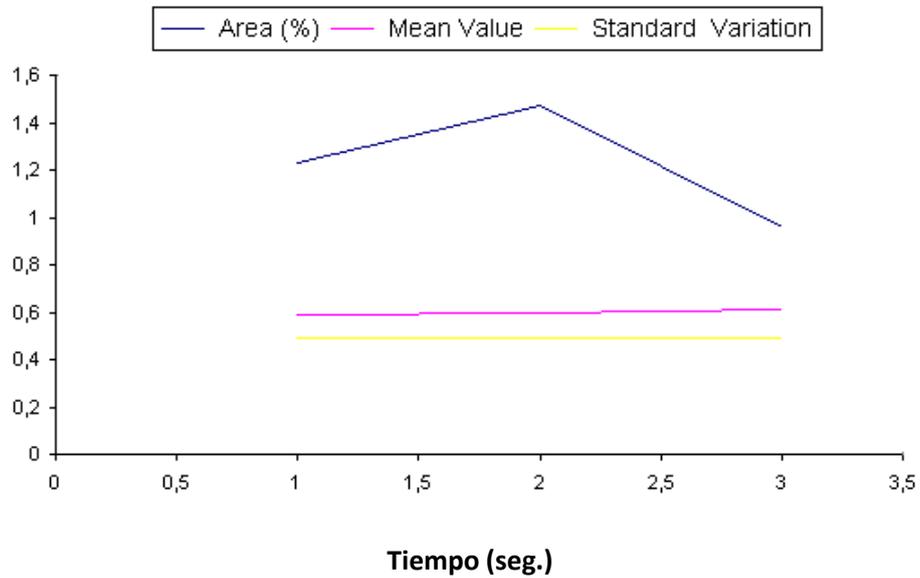


Figura 4.7 - Detección de defecto por bajada de intensidad.

Conclusión: en la gráfica se puede ver claramente como entorno a los 2 segundos del proceso se produce un pico en la gráfica de color azul, lo que nos indica que, la geometría de la pluma se ha visto modificada de valor, con lo que se ha detectado un fallo en el proceso.

Defecto nº 2: Cambio de espesor

Este defecto se ha realizado colocando una pieza con una sección transversal de menor espesor en la zona central de la pieza, con el fin de verificar que mediante este sistema se puede detectar.

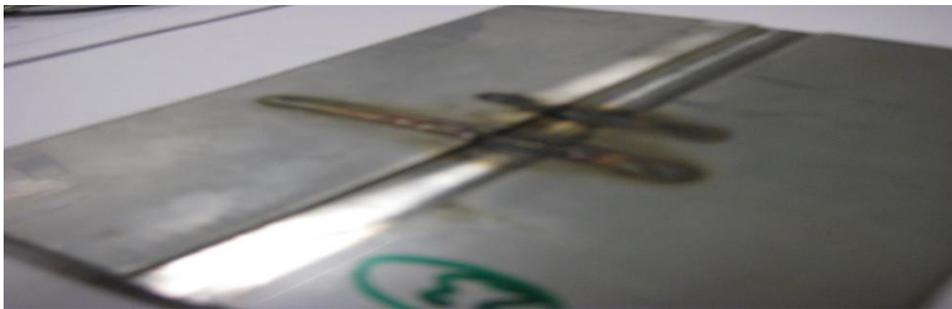


Figura 4.8 - Cordón de soldadura con cambio de espesor.

Visión del cambio de espesor durante la ejecución del proceso:

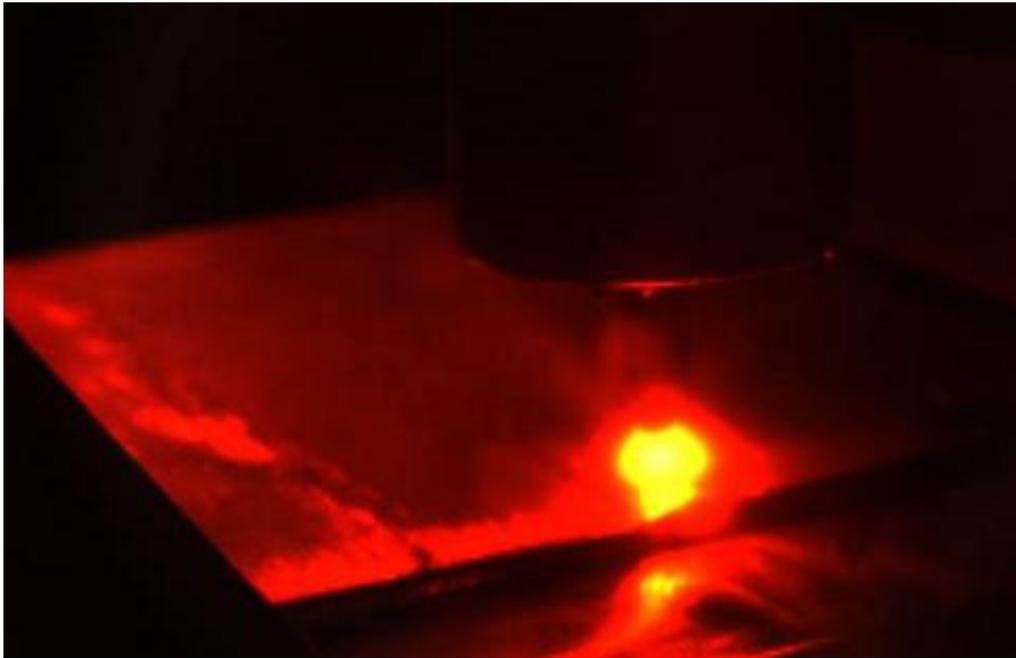


Figura 4.9 – Imagen ilustrativa del defecto.

La secuencia del proceso de soldadura sobre esta chapa con cambio de espesor, es la siguiente:

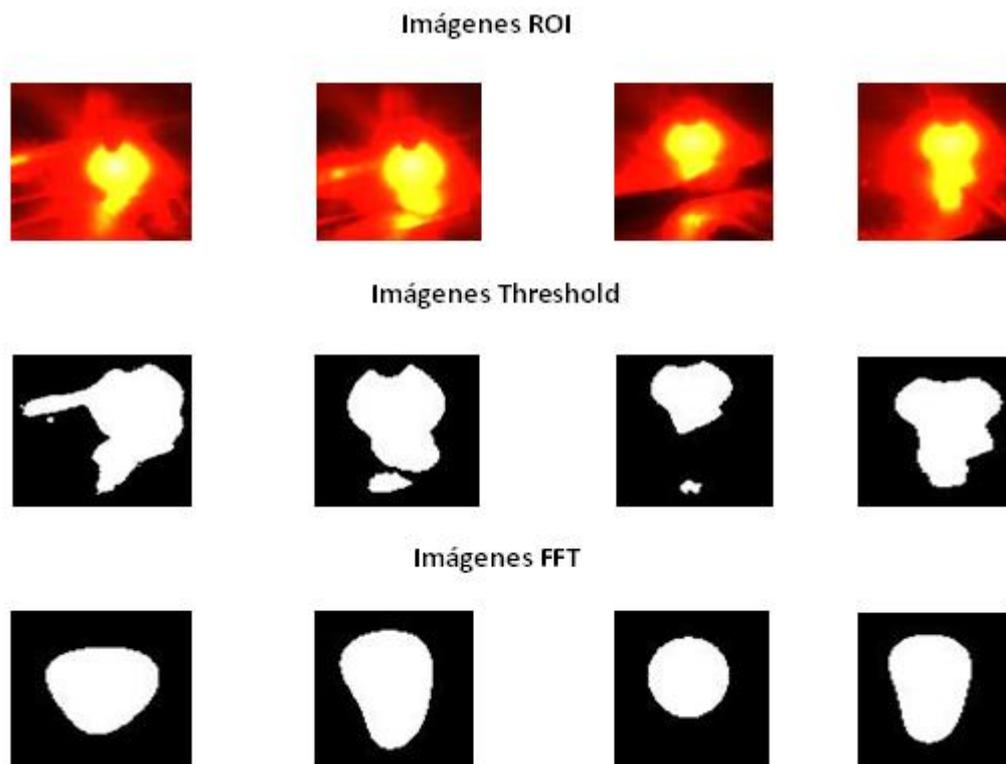


Figura 4.10 – Secuencia del proceso con cambio de espesor.

Los resultados del procesado son:

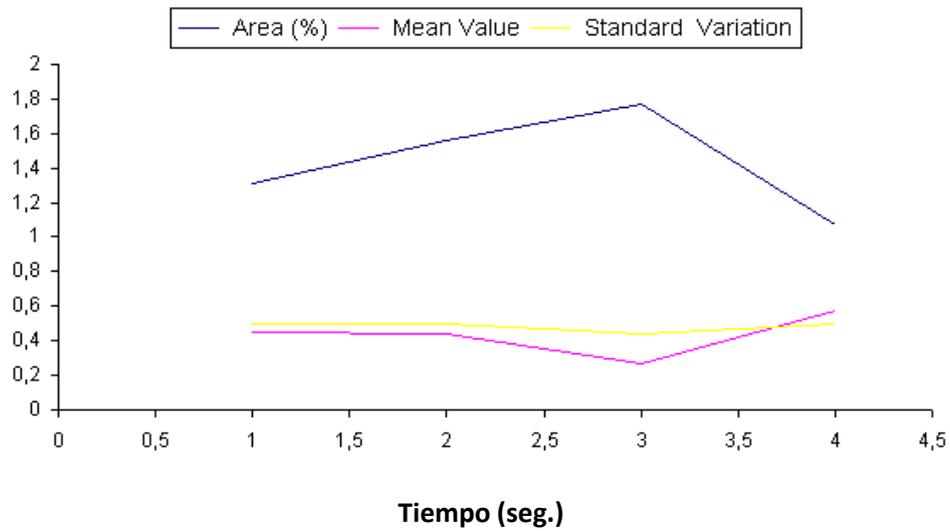


Figura 4.11 - Detección de defecto por cambio de espesor en la chapa.

Conclusión: Observando la secuencia de imágenes se puede apreciar como en la tercera columna de imágenes se detecta un posible defecto, ya que se aprecia como la pluma se divide en dos, cambiando su tamaño al atravesar por el cambio de espesor.

La gráfica también muestra como la soldadura no es correcta del todo, ya que ha sufrido un cambio significativo en el área de la pluma cuando se produce el defecto, reflejando sus valores un ligero ascenso entorno a la tercera columna de imágenes que corresponde en el instante de tiempo de 3 segundos en la gráfica.

Defecto nº 3: Aparición de un poro al final del cordón

Este tercer defecto se trata de un pequeño poro que aparece al final de este cordón, debido a que la maquina de soldadura tiene una trayectoria definida, al finalizar el proceso la antorcha se para retornar a su punto inicial, pero se tarda algún tiempo en completar esta operación, incidiendo el arco en la misma zona de la chapa creando este defecto en múltiples ocasiones.



Figura 4.12 - Cordón de soldadura con aparición de un cráter.

Visión del cráter formado en la zona inferior de la pluma:

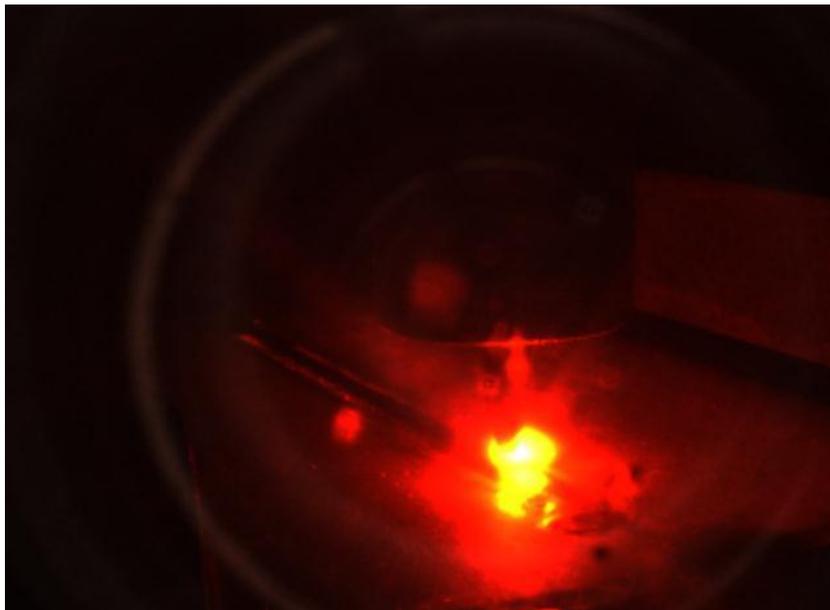


Figura 4.13 – Imagen ilustrativa de la aparición de un poro o cráter de salida.

Simplemente con observar la imagen se puede apreciar como en la parte inferior de la pluma se ha creado un poro en el cordón de soldadura

Este defecto de aparición de un cráter al final del cordón, se ilustrara mediante la siguiente secuencia de tres imágenes.

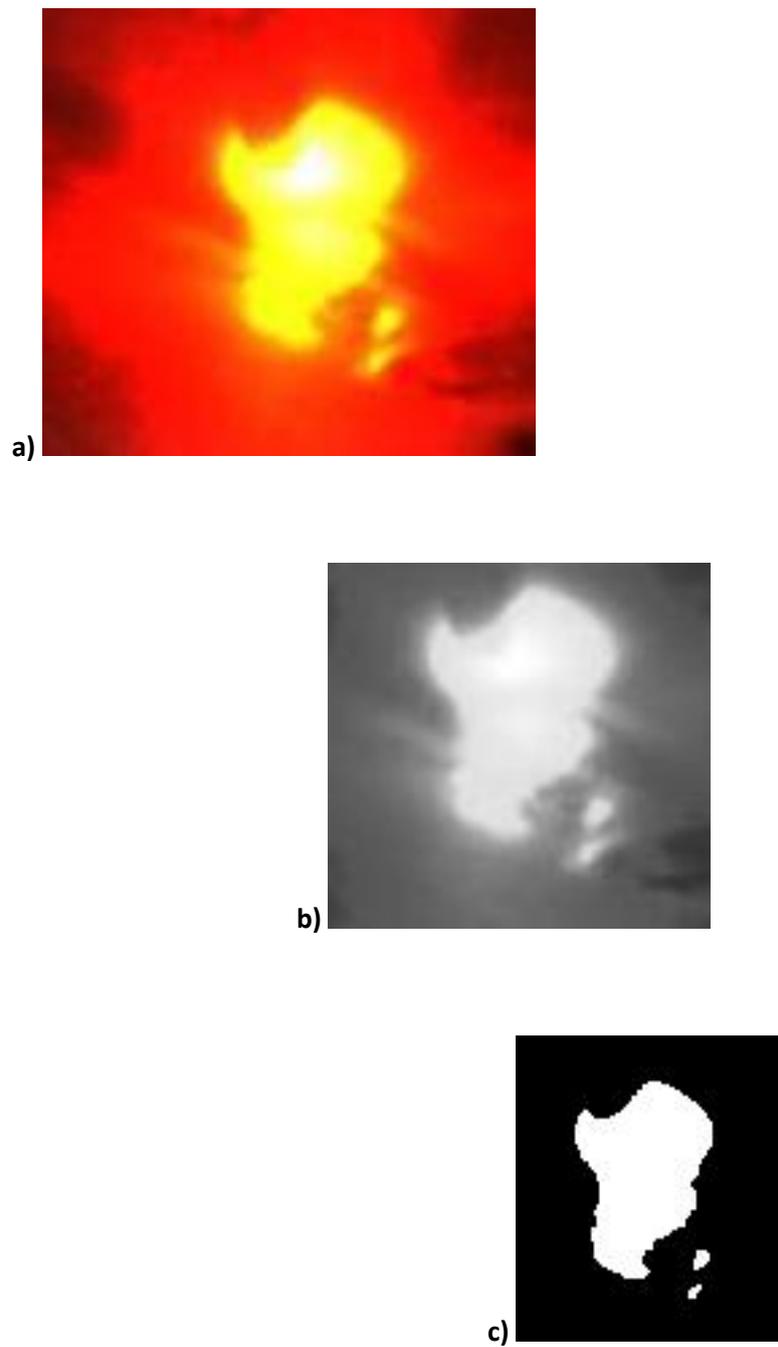


Figura 4.14 – Secuencia ilustrativa del proceso con la aparición de un poro o cráter, a) Región de interés (ROI), b) Píxeles de la imagen que superan el umbral establecido, c) FFT por truncamiento.

Defecto nº 4: Desvío vertical de la antorcha de soldadura

Para este defecto se han seleccionado dos imágenes ilustrativas: en la primera imagen la soldadura mantiene su distancia con la chapa y el proceso no se ve alterado, en cambio, en la imagen de la derecha, la pluma generada aumenta de dimensiones junto con su radiación del plasma al verse modificada la longitud del arco en el proceso para su caracterización.

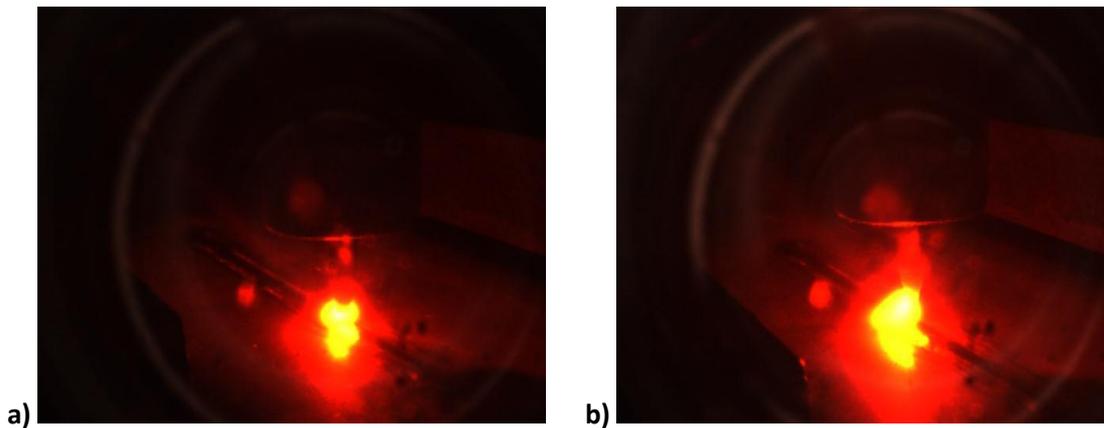


Figura 4.15 – a) Soldadura correcta. b) Desvío vertical de la antorcha.

El desarrollo más en detalle puede apreciarse en la siguiente secuencia de imágenes donde se procesa la región de interés ROI, extrayendo su información de manera que se puede detectar el fallo de desvío de la antorcha de una manera fácil y eficaz en la tercera columna de imágenes.

La secuencia del proceso de desvío de antorcha es la siguiente:

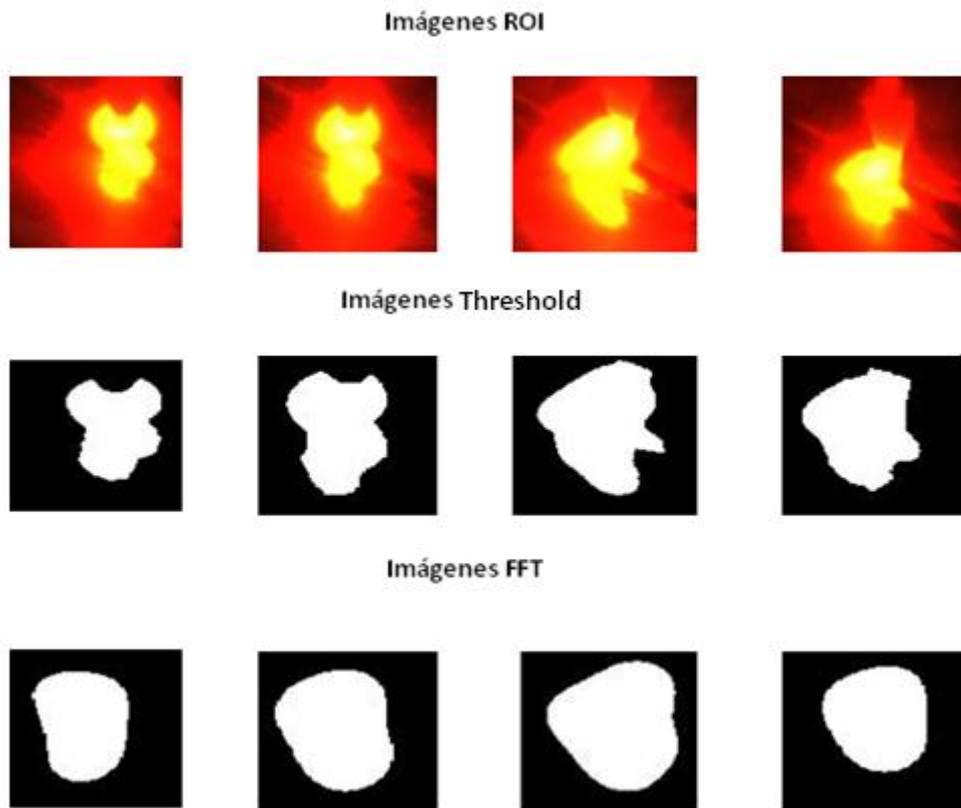


Figura 4.16 – Secuencia del proceso con desvío de antorcha.

Los resultados del procesado son:

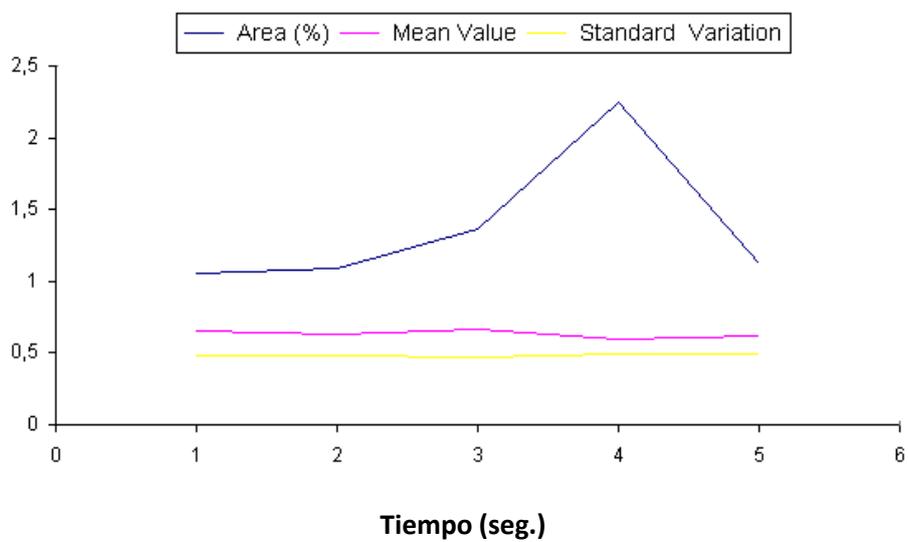


Figura 4.17 - Detección de fallo de desvío de antorcha.

Conclusión: Se puede apreciar como en la tercera columna de imágenes se produce un evento bastante claro, al igual que se sucede en la gráfica en el instante de tiempo $t=4$ seg. En este caso es un desvío vertical de la antorcha de soldadura, haciéndose mayor la pluma, y obteniéndose una mayor área en la pieza. Este evento se refleja claramente en el gráfico que nos muestra el procesado de este defecto.

Defecto nº 5: Falta de aporte de gas

Este quinto defecto caracterizado, se corresponde con la detección de falta de aporte de gas durante un instante del proceso. Se introduce un corte de gas completo al final de la realización del siguiente cordón de soldadura.

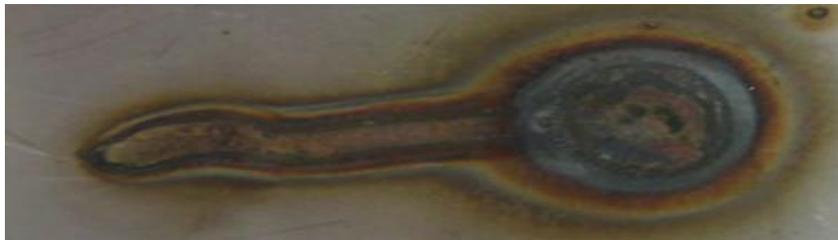


Figura 4.18 - Cordón de soldadura con defecto de aporte de gas.

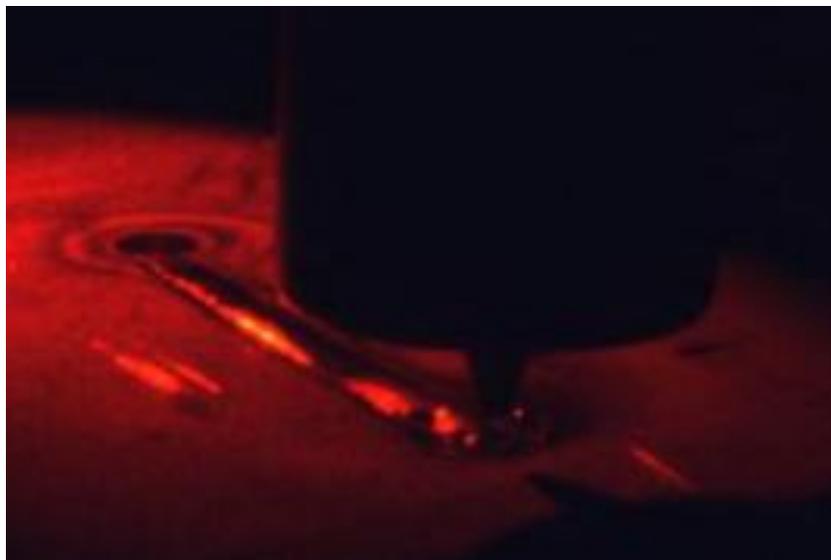


Figura 4.19 - Visión del cordón de soldadura tras finalizar su proceso.

Observando la soldadura se puede apreciar como al final del cordón se crea una geometría circular entorno al baño de soldadura. Esto es debido a que en este punto el gas de protección es cortado con el fin de ver las consecuencias que se producen y poder caracterizar este defecto de soldadura para posteriores procesos.

Seguidamente, se propone el análisis del proceso de este cordón de soldadura en modo secuencia, con el fin de apreciar la falta de aporte de gas en el proceso.

La secuencia del proceso con falta de aporte de gas es la siguiente:

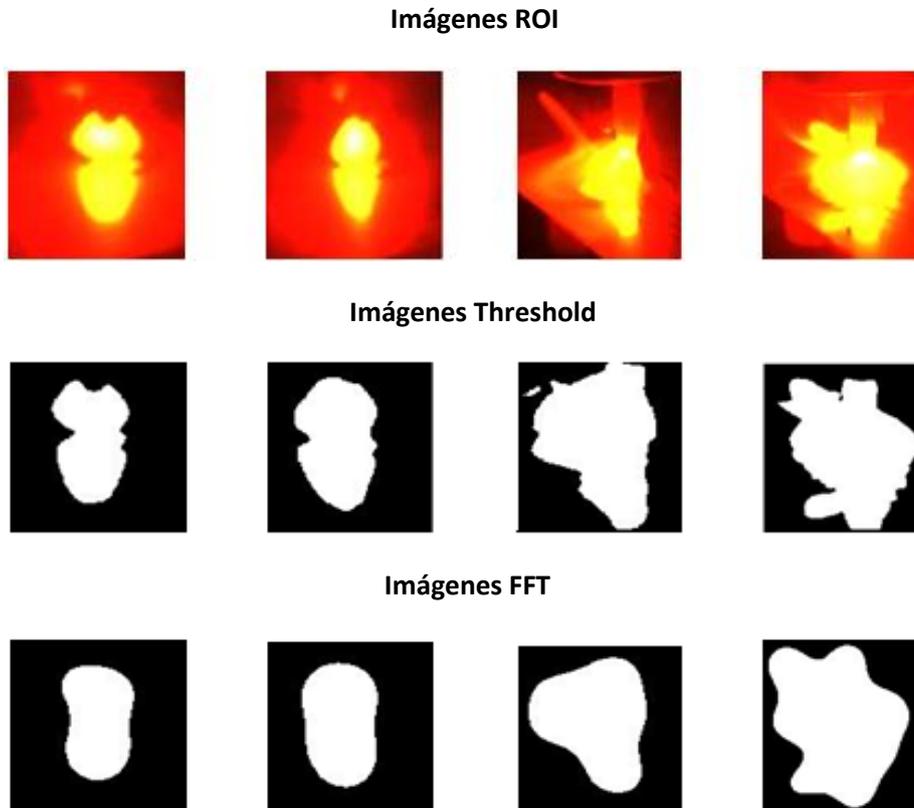


Figura 4.20 – Secuencia del proceso con falta de aporte de gas.

Los resultados del procesado son:

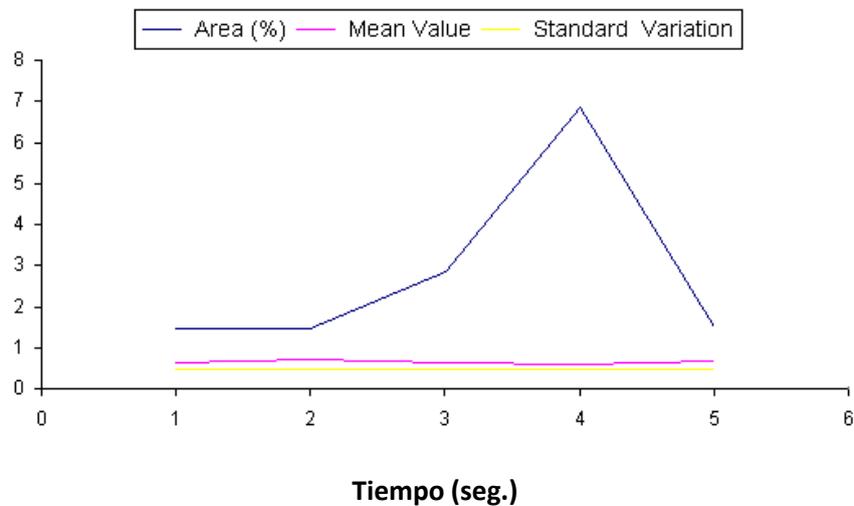


Figura 4.21 - Detección de falta de aporte de gas.

Se puede observar como en el último tramo del proceso se detecta el fallo en la soldadura.

Defecto nº 6: Fallo de suciedad

Esta prueba de suciedad, se ha simulado aportando pegamento especial de soldadura de color gris en la zona donde se va a realizar el cordón de soldadura.

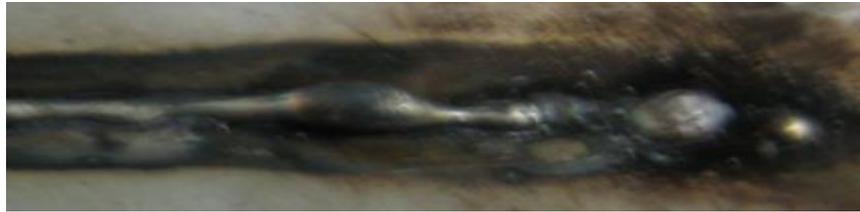


Figura 4.22 – Cordón de soldadura con suciedad.

La secuencia del proceso de soldadura con defecto de suciedad es la siguiente:

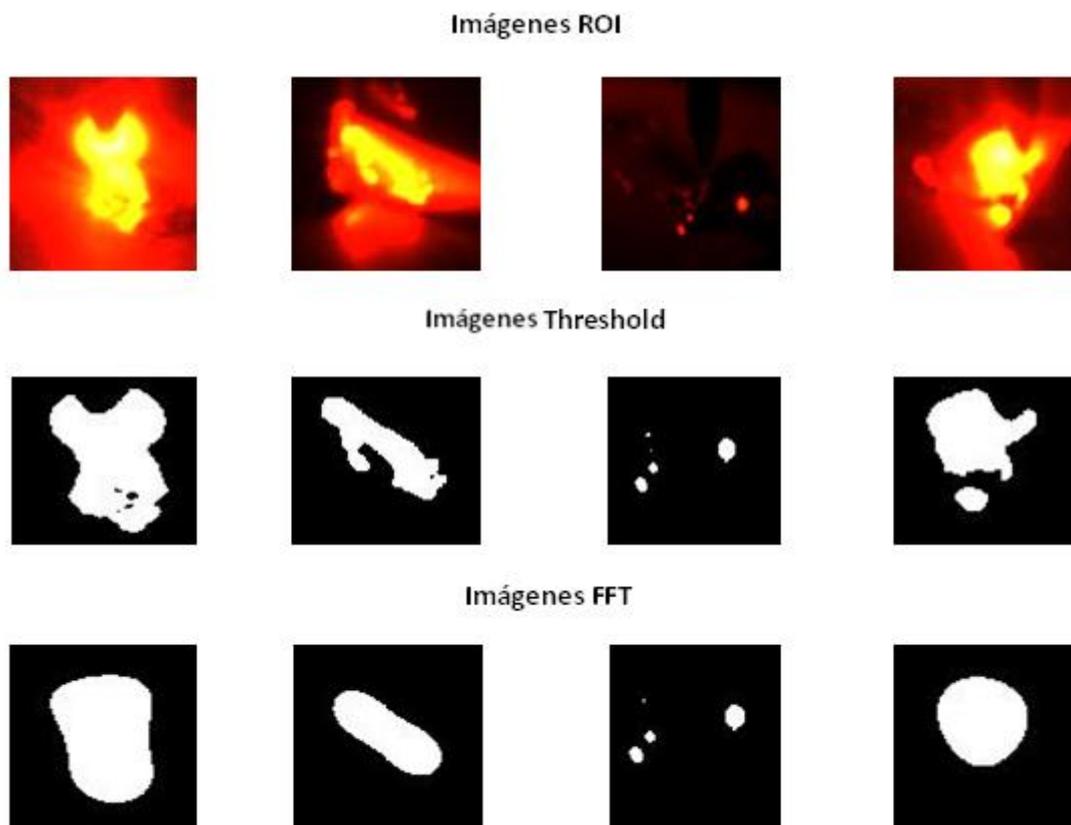


Figura 4.23 – Secuencia del proceso con defecto de suciedad.

En este procesado existe una pequeña diferencia en cuanto al resto de análisis, debido a que la mancha de suciedad que existe en la chapa es demasiado grande.

Este defecto implica que, al realizar el proceso, hay un momento donde la pluma de la antorcha disminuye al máximo y no se aprecia nada más que los puntos donde existe menor suciedad.

Llegado al punto de realizar la FFT, no es realizada en base al truncamiento como el resto de los defectos sino que el filtro FFT se basa en la atenuación de los valores de cada píxel de la región de interés.

Los resultados del procesado son:

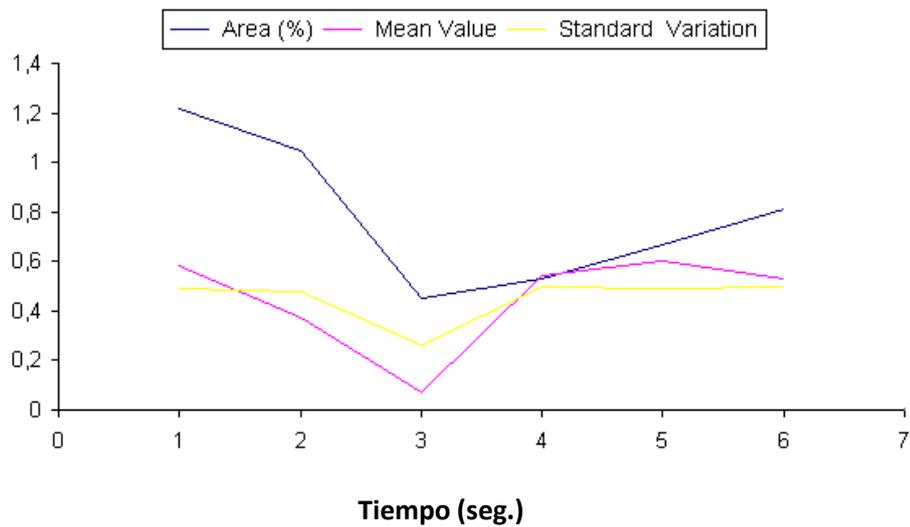


Figura 4.24 - Detección de fallo de suciedad.

A la vista de la gráfica se puede observar como los valores que toma la pluma de soldadura caen hasta un valor inadecuado, con lo que la detección del fallo de suciedad se produce claramente.

Estos valores son tan bajos debido a que la mancha de suciedad que existe en la trayectoria del cordón de soldadura es bastante considerable y existe un punto donde la pluma se hace casi inexistente. Por ello, en este procesado de imagen la FFT tiene que basarse en la atenuación y no en el truncamiento de la imagen.

Defecto nº 7: Múltiples defectos a lo largo del cordón de soldadura



Figura 4.24 - Cordón de soldadura con varios defectos continuos.

Este múltiple defecto, no es de los más usuales que se puedan encontrar en las soldaduras cotidianas, pero pueden ocurrir debido a desvíos continuos de la antorcha, a una mala adherencia de las chapas, zonas a diferentes temperaturas o simplemente a fallos humanos.

La secuencia del proceso de este cordón se muestra a continuación:

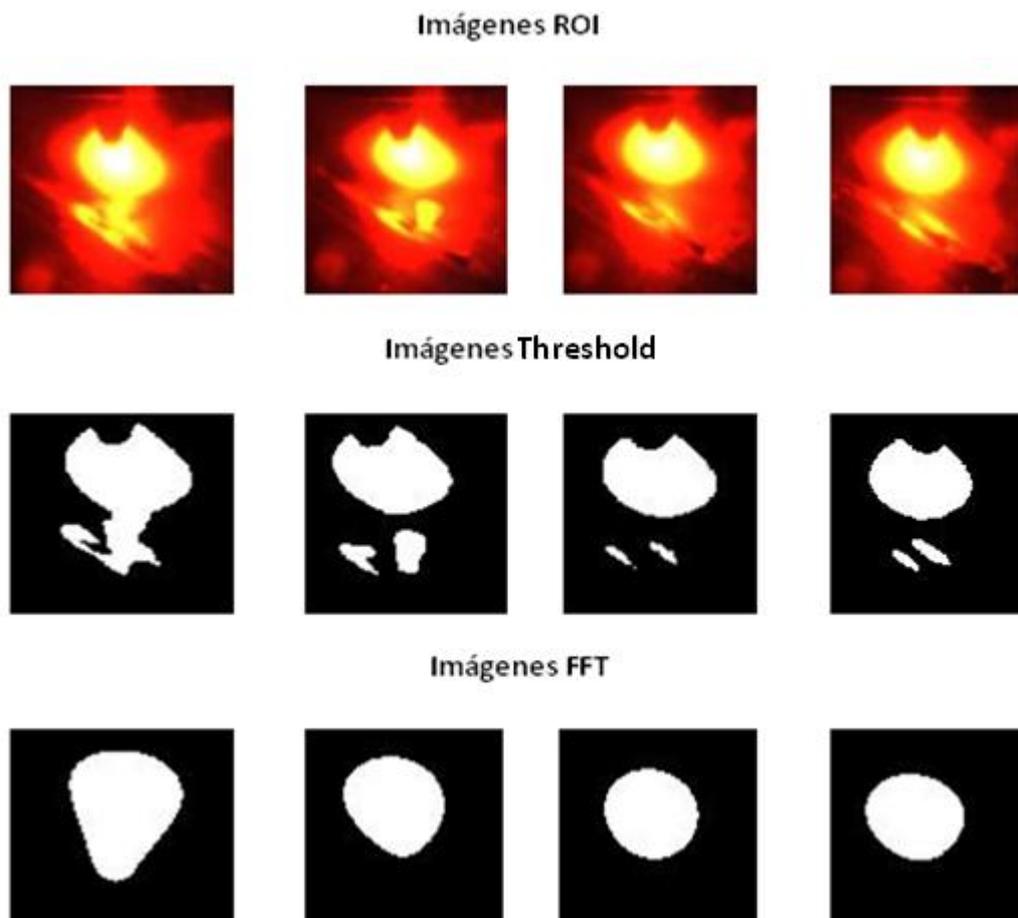


Figura 4.25 – Secuencia de múltiples defectos.

Los resultados del procesado son:

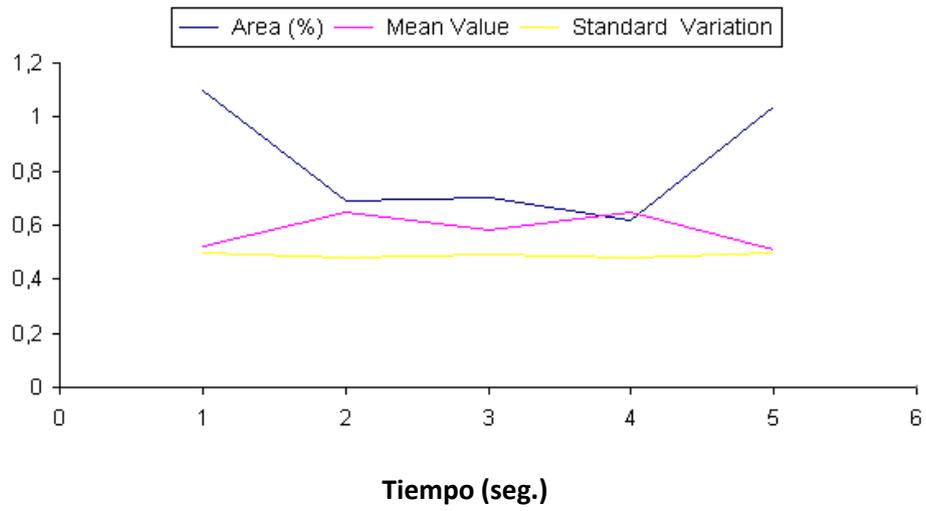


Figura 4.26 - Detección de múltiples defectos en un cordón.

Visualmente se ha podido comprobar como se sucedían los múltiples defectos en la soldadura, la gráfica muestra el procesado de las imágenes, observándose como el área varía considerablemente, indicando por tanto la detección de los mencionados defectos.

CONCLUSIONES

En el vigente proyecto se ha estudiado la monitorización visual del proceso de soldadura TIG, iluminando la zona de soldadura mediante diferentes fuentes de iluminación LED o láser con el fin de solventar la problemática de la intensa radiación óptica proveniente del plasma de soldadura generado durante el transcurso del proceso.

Fundamentalmente se han utilizado tres filtros ópticos en las siguientes longitudes de onda (460nm, 562nm y 640nm), asociadas a los colores del azul, verde y rojo respectivamente, que son fundamentalmente los tres colores asociados a las diferentes fuentes empleadas.

Durante la realización de este proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

La primera conclusión tras la realización de varios experimentos expuestos en el Capítulo 3, es que las dos fuentes de iluminación que mejores resultados aportan son las fuentes LED tanto en azul como en rojo. En este sentido cabe resaltar la importancia de una lente de enfoque a la salida de dichas fuentes de luz para colimar su haz en la sección donde se produce el cordón de soldadura, siempre en función de las necesidades de calidad que se requieran.

Todo ello sin olvidarse de la lente de entrada de la cámara visible, elemento fundamental para obtener imágenes a cierta distancia del proceso de soldadura con buena calidad.

Tras enumerar los componentes básicos del sistema sensor visual del proceso de soldadura, se ha demostrado y verificado que es posible monitorizar el proceso de soldadura de arco TIG en tiempo real con una cierta calidad, iluminando la sección del baño de soldadura mediante fuentes de iluminación externas, filtrando la imagen en su correspondiente longitud de onda referente a dicha fuente de luz externa, recogiendo así el rango de longitudes de onda de cada filtro mediante la cámara de video visible utilizada como sensor del sistema de visión artificial.

La segunda gran conclusión que se ha obtenido en este proyecto ha sido la disposición de los elementos en la zona de trabajo. Para obtener la mayor calidad de imagen, hay que situar la fuente de luz externa con una inclinación de 45º con la horizontal y la cámara de video con 40º, respecto a la inclinación.

Respecto a la posición de los mismos, tanto de la cámara como de la fuente de luz, la situación óptima debe ser uno frente al otro en línea recta.

Finalmente, como tercera conclusión cabe destacar la posibilidad de detectar posibles defectos producidos durante el proceso de soldadura mediante el procesado de imágenes obtenidas del proceso. La información que proporciona el sistema de procesado visto en el Capítulo 4 es de gran relevancia a la hora de realizar cordones de soldadura TIG, ya que, idealmente, se podría llegar a corregir un defecto de soldadura en línea nada más detectarse, pudiendo tomarse medidas en tiempo real del mismo para corregirlo.

5.1 Líneas futuras

El presente proyecto deja abiertas varias líneas futuras como pueden ser las siguientes:

- Iluminación pulsada, sería interesante sincronizar los pulsos de luz generados por la fuente de iluminación con los disparos de recogida de imagen de la cámara de video.
- Emplear algún método para determinar qué bandas espectrales y por lo tanto cuáles son los mejores filtros ópticos para utilizar con fuentes de iluminación en sus distintas longitudes de onda.
- Probar el prototipo resultante mediante el puntero láser verde en pruebas de campo en entornos industriales.
- Probar un prototipo de alta calidad en pruebas de campo en entornos industriales.
- Probar el procesado basado en visión artificial en pruebas de campo en entornos industriales.

ANEXO

A continuación se muestra la instrumentación empleada en la realización de los experimentos realizados en el laboratorio junto a su información técnica.

ESPECTRÓMETRO



BWTEK BRC112

Espectrómetro CCD

Dimensiones: 102 x 67 x 34 mm

Peso: 340 gramos

Detector: Sony ILX511

Nº Píxeles: 2048

Tamaño píxel: 14 x 200 μm

Rango espectral: 200 – 1050 nm

Resolución óptica: 0.5 – 3 nm

Resolución A/D: 16 bits

FIBRA ÓPTICA



Ocean Optics P600-2-UV-VIS

Diámetro núcleo: 600 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$

Espesor cubierta: 35 $\mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$

Material protección: poliamida

Rango temperaturas: -65 – 300 $^{\circ}\text{C}$

Resistente a la solarización

Conectores: SMA-905

Longitud: 2 m

FILTROS ÓPTICOS



Edmund Optics NT430-63; NT430-92; NT430-93

Diámetro: 11.8 mm

Rango espectral bloqueado: 200 – 1200 nm

Rango de temperaturas: -25 – 70 °C

Longitud de onda central: 480 nm; 766 nm; 780 nm

Tolerancia longitud onda: ± 2 nm

Ancho de banda: 10 nm



Edmund Optics NB1J14

Diámetro: 11.8mm

Rango espectral bloqueado: 200 – 1200nm

Rango de temperaturas: -25 – 70 °C

Longitud de onda central: 660nm

Tolerancia longitud onda: 2nm

Ancho de banda: 10nm

FUENTE DE ALIMENTACIÓN TIG



Kemppi Mastertig 2200

Rango: 5 A / 10 V – 220 A / 18.8 V

Ignición: mediante arco voltaje y frecuencia.

Control de rampa y pulsador

Dimensiones: 385 x 152 x 410 mm

Peso: 16 kg

ANTORCHA TIG



Kemppi Mastertig 220
DC: 220 A
Refrigeración por gas.
Diámetro electrodos: 1 a 3.2 mm
Gas / corriente: $\frac{1}{4}$

CONTROLADOR DE MOTORES



Newport MM4005
Dimensiones: 134 x 482 x 395 mm
Peso: 8 Kg.
Capacidad de control de hasta 4 etapas.
Control por panel frontal y remoto vía RS-232 e IEEE-488



MOTORES

Newport MTM100PP1
Soporte acero inoxidable
Recorrido: 100 mm
Resolución máxima: 1 μ m
Velocidad máxima: 20 mm/s

FUENTES DE ILUMINACIÓN – SUPER DIODOS AZUL Y ROJO.



ENFIS UNO Air Cooled Light Engine

Smart, compact, efficient, high power LED spot source - total solution

Features & Benefits

Plug & Play

- Just plug in and go straight from the box!
- Ideal for product development and volume
- Reduces integration time and risk

USB Connection for monitoring input, output and temperature

Neutral White (4250K)

Single colours 365nm to 870nm

Ultra high density array up to 100 LEDs within 0.5cm² aperture

Smart thermal protection system

Optional life-long 100% lumen maintenance

Up to 38W

Long life, low maintenance

System 3-year warranty



Applications & Markets

- ◆ Lighting
 - Entertainment
 - Retail
 - Task
- ◆ Medical
 - Skin treatment
 - Neo-natal
 - Dental applications
- ◆ Industrial
 - Forensics
 - Security and surveillance
 - Non-destructive testing
 - Epoxy/adhesive curing

Outline Specification

Wavelength	Typical Light Output
365nm	600mW
375nm	1150mW
405nm	4900mW
465nm	5750mW
520nm	1850mW
595nm	1150mW
630nm	3890mW
870nm	1750mW
4250°K	1000 lm

Uno Air Cooled Light Engine Rev 5 July 08

ENFIS LIMITED
Technium 2, Kings Road,
Swansea Waterfront,
Swansea, SA18PJ, UK
Tel +44 (0)1792 485660
Fax +44 (0)1792 485537
www.enfis.com
info@enfis.com



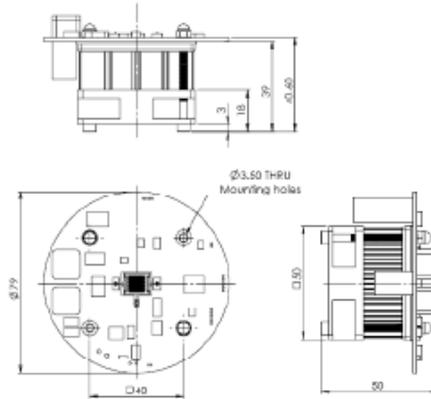
ENFIS UNO Air Cooled Light Engine

Technical Specification

Electro-Optical Characteristics

Colour	Peak Wavelength (nm)	Typ. Light Output (mW)	Typ. Light Output (lm)	Total Electrical Power (W)
SUVA	365	600	-	18
UVA	375	1150	-	18
Violet	405	4900	-	38
Blue	465	5750	330	38
Green	520	1850	860	38
Amber	595	1150	520	30
Red	630	3890	615	30
NIR	870	1750	-	16
Neutral White	3900-4600K	-	1000	38

Please contact Enfis Ltd for further information
Amber, Red and NIR Power is limited by driver power supply



Ambient temperature = 25°C

Electronics:

Technical Specification

Operating temperature -10°C to +45°C
Storage temperature -20°C to +85°C
Typical Driver Efficiency > 90%

Input To Driver

Input voltage
Blue / Green / Violet / UVA / White 12V <5A DC
Red / Amber 9V <5A DC
NIR 5V <5A DC

LED Driver PCB

Efficient LED driver based on switch mode technology
Temperature monitoring and control
USB/Serial PC interface

Connectivity

TTL interface with USB convertor (USB connector head provided)

Thermal Management

Composite metal heatsink with integrated low noise DC fan
Low thermal resistance <1°C/W

Handling LED Array

Contact with the encapsulation on the surface of the LED array must be avoided to prevent damage. Do not apply pressure to the encapsulation or allow it to come into contact with sharp objects. During operation the encapsulation will be hot and contact should be avoided.

Static Electricity

Care must be taken when handling, these products are sensitive to static electricity .
Observe static handling precautions.



Cleaning

Avoid touching the LED array surface.
To clean—BLOW surface with either dry air or nitrogen gas

Eye Safety Precautions

The light output of the products may cause injuries to human eyes in circumstances where the products are viewed directly with unshielded eyes for more than a few seconds.

Please refer to IEC 60825-1:2001 for further information



ENFIS LIMITED
Technium 2, Kings Road,
Swansea Waterfront,
Swansea, SA1 8P1, UK
Tel +44 (0)1792 485660
Fax +44 (0)1792 485537
www.enfis.com
info@enfis.com



Uno Air Cooled Light Engine Rev 5 July 08

BIBLIOGRAFÍA

[1] Spectroscopic Sensor System for Quality Assurance of the Tube-To-Tube sheet Welding Process in Nuclear Steam Generators.

Adolfo Cobo, *Member, IEEE*, Jesús Mirapeix, Fernando Linares, José Antonio Piney, David Solana, and José Miguel López-Higuera, *Senior Member, IEEE*

Photonics Engineering Group, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander, Spain.

[2] Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding.

Ladislav Grad a, Janez Grumb, Ivan Polajnar b, Janez Marko Slabe b a Fotona d.d. Stegne 7, Ljubljana, Slovenia

Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Asˇkercˇeva 6, P.O.B. 394, Ljubljana, Slovenia

[3] Arc Welding Process Control based on Back Face Thermography: Application to the Manufacturing of Nuclear Steam Generators

A. Cobo, J. Mirapeix, O. M Conde, P.B. García-Allende, F. J. Madruga, J.M. López-Higuera

Photonics Engineering Group, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander, Spain.

[4] Sensor for the Detection of Protective Coating Traces on Boron Steel With Aluminium–Silicon Covering by Means of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Support Vector Machines

Francisco Anabitarte, Jesus Mirapeix, Olga Maria Conde Portilla, José Miguel Lopez-Higuera, *Senior Member, IEEE*, and Adolfo Cobo, *Member, IEEE*

Photonics Engineering Group, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander, Spain.

[5] Spectroscopic analysis of the plasma continuum radiation for on-line arc-welding defect detection. *J. Phys. D* 2006, 41, 135202-10.

Mirapeix, J.; Cobo, A.; Fernandez, S.; Cardoso, R.; López-Higuera, J.M.

Photonics Engineering Group, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander, Spain.

[6] Approaches based on plasma optical spectroscopy for real-time quality analysis of welding processes

José Julián Valdiande Gutiérrez. Departamento de Fotónica, Universidad de Cantabria.

[7] Monitoring of TIG Welding using Laser and Diode Illumination Sources: a Comparison Study, 2008.

B. M. Abdullah¹, J. S. Smith², W. Lucas³, J. Lucas² and F. Malek⁴.

1-King Fahd University of Petroleum and Minerals (KFUPM), Dhahran, Saudi Arabia.

2-University of Liverpool, Liverpool, U.K. 3-TWI, Cambridge, UK. 4-University Malaysia Perlis, Perlis, Malaysia.

