

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**Procesado masivo de datos
espectroscópicos para la monitorización
de la calidad en procesos de soldadura**

**(Massive spectroscopic data processing for
quality monitoring of welding processes)**

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Alejandro Diego Herbosa

Abril - 2013

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Alejandro Diego Herbosa

Director del PFC: Jesús Mirapeix Serrano

Título: “Procesado masivo de datos espectroscópicos para la monitorización de la calidad en procesos de soldadura”

Title: “Massive spectroscopic data processing for quality monitoring of welding processes”

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús

Vocal (Apellidos, Nombre): Muñoz Gutiérrez, Luis

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

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

INDICE DE CONTENIDOS

CONTEXTO Y OBJETIVOS.....	6
1.1 Contexto	6
1.2 Objetivos	7
INTRODUCCIÓN TEÓRICA	10
2.1 La soldadura.....	10
2.1.1 Importancia.....	10
2.1.2 Sectores industriales	10
2.1.3 Tipos de soldadura	11
2.2 Complejidad de la soldadura	14
2.3 Monitorización en tiempo real	15
2.3.1 Técnicas de emisión acústicas	15
2.3.2 Técnicas de emisión ópticas.....	16
2.3.3 Técnicas de emisión infrarroja	16
2.3.4 Sensores eléctricos	16
2.3.5 Técnicas de visión artificial	16
2.4 Monitorización en tiempo real con tecnología óptica.....	17
2.4.1 Fotodiodos.....	17
2.4.2 Espectrómetros	17
HERRAMIENTA SOFTWARE.....	20
3.1 Programa Principal	21
3.2 Cálculo de umbrales	22
3.3 Listar Carpeta	26
3.4 Entorno Gráfico	28
3.5 Entorno de programación	28
3.6 Interfaz de usuario	29
EXPERIMENTOS	34
Primer análisis.....	36
4.1 Primera muestra: Muestra Correcta	36
4.2 Segunda muestra: Defecto de Caída de Intensidad	37
4.3 Tercera muestra: Defecto de Corte de Gas Ar	39
4.4 Cuarta muestra: Defecto de Caída de Intensidad y Corte de Gas Ar.....	40
4.5 Quinta muestra: Defecto de Traspaso de la Chapa.....	42

Segundo análisis.....	42
4.6 Sexta muestra: Cordón Correcto.....	43
4.7 Séptima muestra: Defecto de Falta de Penetración	44
4.8 Octava muestra: Defecto de Falta de Penetración	45
4.9 Novena muestra: Defecto de Falta de Penetración	46
4.10 Décima muestra: Cordón Correcto.....	47
4.11 Undécima muestra: Defecto de Falta de Penetración.....	48
4.12 Duodécima muestra: Defecto de Suciedad	49
Tercer análisis.....	50
CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	53
5.1 Conclusiones.....	53
5.2 Líneas futuras.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	56

CONTEXTO Y OBJETIVOS

1.1 Contexto

La soldadura, *la fusión de las superficies de dos piezas para formar una sola*, es un método preciso, fiable y económico para unir dos materiales. Ninguna otra técnica ha sido tan ampliamente utilizada por los fabricantes para unir metales y aleaciones de manera eficiente. La mayoría de los objetos cotidianos utilizados en la sociedad moderna (edificios, puentes, equipos y dispositivos médicos) no se hubieran podido producir sin el uso de la soldadura.

Hoy en día la soldadura se aplica a una gran variedad de materiales y productos, la industria se beneficia especialmente de la soldadura por arco y láser, en sectores como puede ser el del automóvil, el nuclear o el aeronáutico. En todos estos casos se hace necesario el uso de técnicas para analizar la calidad de la soldadura de modo que se puedan excluir las piezas defectuosas para así conseguir que el producto final pueda ser utilizado sin riesgo y garantizar que cumple con todos los estándares de calidad impuestos por la sociedad actual.



Figura 1.1 – Robot soldando piezas cilíndricas.

Controlar el proceso de soldadura es una tarea realmente compleja, no basta con fijar correctamente los parámetros que intervienen, al ser un proceso no lineal no es posible predecir los defectos en la soldadura que van a aparecer debido a factores como la suciedad o la humedad del aire. Por ello, aunque se hayan calculado con precisión los parámetros influyentes necesarios (a través de diversas pruebas y ensayos en el laboratorio), siempre existe la posibilidad de que surjan defectos en el momento de la soldadura. Esto crea la necesidad de investigar en un sistema fiable de monitorización de la calidad de la soldadura para poder garantizar que el producto final esté libre de imperfecciones.

La industria de la soldadura trabaja continuamente en tratar de eliminar la inseguridad que existe acerca de que las uniones soldadas sean la parte más débil de una pieza, por ello dedica importantes recursos en realizar una comprobación de las soldaduras realizadas. Esta comprobación de piezas se realiza normalmente mediante técnicas no destructivas (NDT: *Non Destructive Testing*) como pueden ser el análisis con partículas magnéticas, líquidos penetrantes, rayos-X...

Aunque estas Técnicas No Destructivas son bastante efectivas para detectar defectos en la soldadura son procesos muy lentos y bastante costosos, y se realizan una vez se ha finalizado el proceso, por lo que en el caso de que una pieza tenga algún defecto, es necesario desecharla, con la pérdida de tiempo y dinero que ello conlleva.

Todo esto crea la necesidad de un sistema de motorización de la calidad de la soldadura en tiempo real, de modo que permita vigilar el proceso y de manera efectiva detectar los defectos en el momento en el que aparezcan. De este modo será posible desechar la pieza en el momento en que el defecto aparezca, sin necesidad de que la soldadura finalice por completo, o incluso dará la posibilidad de poder corregir la soldadura antes de que sea demasiado tarde.

1.2 Objetivos

La presión de los clientes conduce a la creación de productos fabricados sin defectos y garantía de por vida. Aunque cada soldadura puede tener algunos pequeños defectos o discontinuidades, el reto consiste en que el nivel sea aceptable para el desempeño del producto. Puesto que las uniones siempre son vistas como los eslabones más débiles de la estructura, éstas reciben especial atención por parte de las empresas que tratan de obtener una ventaja competitiva.

Los fabricantes necesitan predicciones precisas acerca del rendimiento de las soldaduras, por lo que la capacidad de analizar uniones soldadas durante el proceso de fabricación es un avance importante de cara a mejorar su calidad.

En la actualidad ya existen aplicaciones para realizar el análisis de los espectros de soldadura, pero analizan cada espectro de forma individual, lo que hace necesario que cada pieza sea supervisada individualmente, un trabajo que es muy lento y costoso.

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una aplicación sencilla y potente que sea capaz de analizar de manera eficiente una cantidad indefinida de muestras de soldadura a la vez, de forma que avise de posibles defectos en el proceso de

soldadura para un fácil descarte de las muestras erróneas. Además la aplicación también permitirá el análisis individual de la muestra permitiendo así un estudio más preciso de cada soldadura en el caso de ser necesario.

Para que la aplicación sea un poco más precisa incluirá una interfaz de usuario en la cual sea posible modificar los parámetros de ajuste a partir de los cuales se detectan las muestras defectuosas. De este modo la aplicación podrá ser utilizada para distintos tipos de análisis de calidad dependiendo de las necesidades del usuario.

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1 La soldadura

La soldadura es un proceso de unión que produce la fusión local de materiales mediante calor, la aplicación de presión o ambos. El proceso de soldadura fusiona la superficie de dos elementos distintos para formar uno sólo, aunque en ocasiones se añade un tercer material de relleno fundido para conseguir un baño de material que cuando se enfría se convierte en una única pieza.

La soldadura engloba una gran cantidad de técnicas distintas dependiendo de la fuente de energía utilizada para soldar, como una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un haz de electrones, procesos de fricción o ultrasonidos.

2.1.1 Importancia

La soldadura se remonta a los primeros días de la metalurgia, y sigue siendo muy utilizada en la actualidad debido a su coste, fiabilidad y seguridad. Si comparamos la soldadura con otros métodos de unión, tales como el remachado o atornillado, las estructuras soldadas tienden a ser más fuertes, ligeras y más baratas de producir.

Durante la cadena de fabricación de un objeto, el proceso de soldadura o unión siempre juega un papel importante en el desempeño estructural. De este mismo modo, la utilidad de la soldadura y unión en la reparación y alargamiento de la vida de los productos manufacturados es aún más crítica ya que estos procesos se utilizan con frecuencia para reparar estructuras y componentes que no fueron originalmente soldadas.

2.1.2 Sectores industriales

Una gran cantidad de sectores industriales utilizan un proceso de soldadura en alguna etapa de la fabricación o en la reparación y mantenimiento de los equipos. Desde la soldadura de placas de PC a la soldadura de grandes placas de acero en la preparación de calderas industriales, todas necesitan una unión fiable de los materiales. Entre las industrias de fabricación que dependen de la soldadura podemos enumerar las siguientes:

- ✓ Automoción.
- ✓ Equipamientos Pesados.
- ✓ Aeroespacial.
- ✓ Electrónica, e instrumentos de precisión (medicina).
- ✓ Energético, nucleares y petroquímico.

2.1.3 Tipos de soldadura

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas depende de las propiedades físicas del material y de la finalidad que va a tener en el futuro, por ejemplo, la soldadura más común si queremos unir dos metales es la soldadura por arco eléctrico, mientras que la más usada para la unión de plásticos es la de llama de gas.

Como se comentó anteriormente, existen varios tipos de soldadura dependiendo de la fuente de energía utilizada para la soldadura, una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, procesos de fricción, ultrasonidos...

- ✓ **Soldadura blanda.** Es la unión de dos piezas de metal por medio de otro metal llamado de aporte que se aplica entre ellas en estado líquido. La temperatura de fusión de estos metales no puede ser superior a los 430°C, entonces se produce una aleación entre los metales y con ello se genera la unión. Para el metal de aporte se suelen utilizar aleaciones de plomo y estaño, que funden a temperaturas inferiores a 370°C. Este tipo de soldadura es útil para la unión de piezas que no van a soportar grandes cargas o fuerzas como son la unión de elementos en circuitos eléctricos.

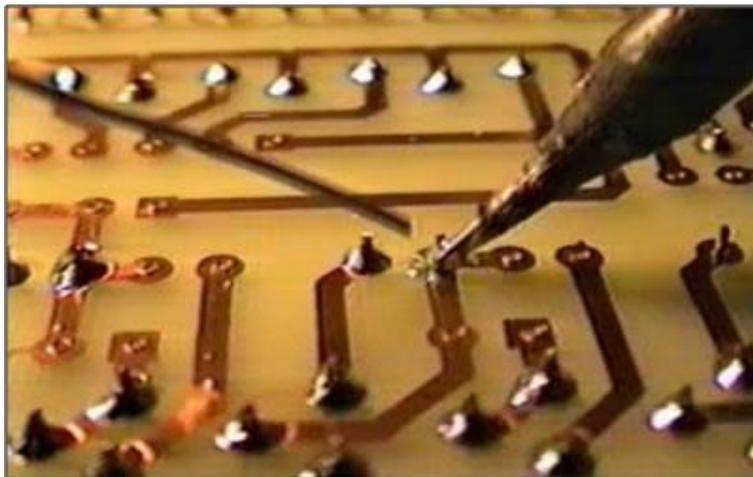


Figura 2.1 – Proceso de soldado de un circuito eléctrico.

- ✓ **Soldadura fuerte.** Este tipo de soldadura también se sirve del aporte de un metal en estado líquido, solo que en este caso su punto de fusión es superior a los 430°C y menor que la temperatura de fusión del metal base. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata.
- ✓ **Soldadura por forja.** Fue la primera forma de soldadura y la única que se ha utilizado durante muchos siglos. El proceso consiste en calentar el material hasta conseguir un estado plástico y posteriormente unir las dos partes mediante presión. El calentamiento se suele efectuar en una fragua que quema carbón o coque. Este tipo de soldadura es la más lenta, y existe un gran peligro de que se forme óxido en la superficie.
- ✓ **Soldadura con gas.** Existen muchos procesos de soldadura que emplean la combustión de gas para generar la energía necesaria para fundir el

material de aporte. Los gases más utilizados para esto son el acetileno y el hidrógeno, pero también existen otros como el propano, que dan lugar a los distintos tipos de soldadura con gas:

- Oxiacetilénica. El gas acetileno se combina con el oxígeno en un soplete, el calentamiento se produce de la llama obtenida por la combustión del oxígeno, las temperaturas que se obtienen son de unos 3500°C, por lo que la junta se calienta hasta un estado de fusión y no necesita ningún tipo de presión ni material de aporte.
- Oxhídrica. Es producto de la combinación del oxígeno y del hidrógeno en un soplete. En este tipo de soldadura las temperaturas alcanzadas no son excesivamente altas, unos 1500°C, por lo que tiene un uso limitado, como por ejemplo la soldadura de plomo y la soldadura fuerte o blanda a baja temperatura.
- Oxipropano. En este caso lo que se utiliza en el proceso de combustión es el gas propano. Se emplea normalmente en el corte de metales y en la soldadura blanda a menos de 430°C.
- OxiMAPP. El gas MAPP (metilacetileno-propadieno) es superior al acetileno en cuanto a que logra producir grandes cantidades de calor con rapidez y se utiliza para la soldadura fuerte (como el bronce) o para el corte con llama.

En estos procesos de soldadura con gas, también se puede incluir aquéllos en los que para generar la unión se calientan las piezas y se presionan con suficiente fuerza como para fusionarlas, sin añadir metal de aporte.

- ✓ **Soldadura con resistencia.** El principio de funcionamiento de la soldadura con resistencia consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir, aprovechando esta corriente para que se genere un aumento de temperatura en la junta de manera que se puedan unir los metales aplicando presión. Entre los procesos de soldadura por resistencia se incluyen los siguientes:
 - Por puntos: en la soldadura por puntos la corriente eléctrica pasa por dos electrodos con punta, debido a la resistencia del material a unir se logra el calentamiento y con la aplicación de presión sobre las piezas se genera un punto de soldadura.
 - Por resaltes: la soldadura por resaltes es un proceso similar al de por puntos, solo que esta vez se producen varios puntos a la vez determinados por la posición de varias puntas que hacen contacto al mismo tiempo.
 - Por costura: la soldadura por costura consiste en la fusión continua de láminas de metal cubiertas parcialmente unas con otras. La unión se obtiene por el calentamiento obtenido por la resistencia al paso de la corriente y la presión constante que se ejerce por electrodos circulares durante un proceso continuo.
 - A tope: la soldadura a tope consiste en la unión de dos piezas con la misma sección, estas se presionan cuando está pasando por ellas una corriente eléctrica que las calienta y logra así la fusión.



Figura 2.2 – Proceso de soldadura con resistencia.

- ✓ **Soldadura por fricción.** En este caso el calor para la unión se produce por la conversión directa de energía mecánica en energía térmica en el punto de la unión. Este calor se genera por el deslizamiento entre dos superficies en fricción.
- ✓ **Soldadura con ultrasonidos.** En este proceso se coloca un material encima de otro y se acerca una punta que emite ondas ultrasónicas que mueven las moléculas de estos materiales provocando que se fundan. En este proceso las piezas a soldar no se calientan hasta el punto de fusión, sino que se sueldan mediante la presión y las vibraciones mecánicas de alta frecuencia.
- ✓ **Soldadura por termita** o aluminotérmica. Tiene lugar debido al calor desprendido por una reacción química basada en el hecho de que el aluminio tiene una gran afinidad con el oxígeno y puede usarse como agente reductor de muchos óxidos. La mezcla consiste en juntar aluminio en polvo con óxido de hierro y un polvo de ignición especial que inicia una combustión que puede llegar a los 3000°C, temperatura más que suficiente para tener el hierro en estado líquido.

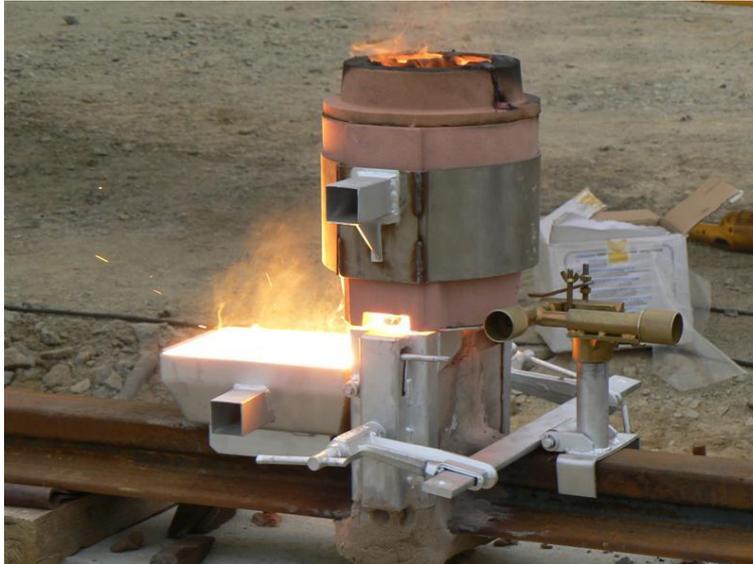


Figura 2.3 – Proceso de soldadura por termita.

- ✓ **Soldadura por arco eléctrico.** En este proceso el calor se produce por un arco eléctrico que se forma en el espacio comprendido entre la pieza a soldar y una varilla que sirve como electrodo. Normalmente el electrodo también está formado por el material de aporte, de modo que éste se funde y se deposita entre las piezas a unir. La temperatura que aquí se genera es superior a 5500°C.

2.2 Complejidad de la soldadura

La soldadura es un proceso fuertemente no lineal y su estabilidad depende de un amplio abanico de factores. Más allá de conseguir que el proceso de soldadura sea un proceso estable, toda pieza soldada debe alcanzar un nivel mínimo de calidad conforme a unos ciertos estándares para que pueda funcionar de manera óptima a las condiciones a las que será expuesta. Para conseguir esta calidad óptima, los factores significativos que influyen en el proceso deben poder ser identificados, controlados e incluso modificados durante el proceso de soldadura.

Los principales parámetros que afectan a la soldadura por arco son la tensión de soldadura, la corriente de soldadura y la velocidad de desplazamiento. Otros parámetros que pueden tener una gran influencia en el proceso son: el gas de protección empleado, incluyendo el flujo seleccionado, la humedad y temperatura de las estancias donde se lleva a cabo el proceso, la limpieza de las piezas a soldar o el tamaño y forma del electrodo.

Un área que tiene mucho peso dentro del análisis de soldaduras son las técnicas de evaluación no destructivas (*Non Destructive Testing: NDT*) y las tecnologías de simulación para predecir el comportamiento de las soldaduras antes de ser fabricadas. Algunas de estas técnicas no destructivas se enumeran a continuación:

- ✓ **Análisis con partículas magnéticas:** utilizan partículas magnéticas para detectar imperfecciones en la superficie de las soldaduras. Así también se pueden detectar errores justo debajo de la superficie de la pieza, aunque con una menor precisión.

✓ Técnicas con líquidos penetrantes: consiste en sumergir la pieza en un fluido que penetra en las fisuras, después se elimina el exceso de líquido y posteriormente se aplica un revelador para mostrar las imperfecciones en la superficie.

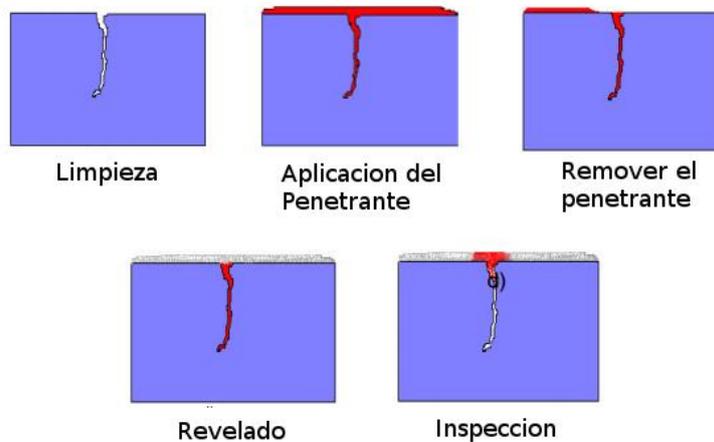


Figura 2.4 – Análisis de soldadura con líquidos penetrantes.

✓ Técnicas radiográficas aplicando rayos-X o rayos-gamma que penetren sobre la soldadura.

✓ Técnicas de ultrasonidos. Para detectar discontinuidades internas en la soldadura que no son visibles a simple vista.

✓ Inspección Visual utilizando lentes de aumento y pantallas.

2.3 Monitorización en tiempo real

La monitorización en tiempo real permite obtener información mientras se está realizando el propio proceso, proporcionando información sobre la estabilidad de la soldadura y permitiendo la detección de diversos defectos.

Este problema no es importante solo desde el punto de vista económico (el coste de eliminar la pieza defectuosa), sino también desde el punto de vista de la fiabilidad, ya que los daños son detectados en tiempo real, pudiendo incluso realizar una realimentación de la máquina de soldadura para evitar o paliar estos defectos, o, cuando menos, permitir al operario una reparación *in situ*.

Existen diversas técnicas para la monitorización del proceso de soldadura en tiempo real [7], empleando diferentes tecnologías como las que se indican a continuación.

2.3.1 Técnicas de emisión acústicas

Éstas incluyen un sensor acústico que convierte las señales sonoras emitidas durante la soldadura en otras eléctricas que pueden ser medidas.

Esta técnica no es muy utilizada en el caso de soldaduras al aire libre, ya que la detección de sonido a través del aire a menudo es complicada debido a los ambientes hostiles y ruidosos en la industria, sin embargo es muy práctica en

procesos de soldadura de arco sumergido, donde otros procesos de monitorización no son viables.

2.3.2 Técnicas de emisión ópticas

Los detectores ópticos, particularmente de radiación ultravioleta, visible y en el infrarrojo cercano, se han venido utilizando para convertir la radiación óptica emitida por el plasma de soldadura en una señal de monitorización que posea una correlación directa con los eventos de calidad en los cordones.

El medio que se utiliza para captar y enviar esta radiación es la fibra óptica, que se coloca lo más cerca posible del punto de soldadura para poder captar la mayor radiación posible.

2.3.3 Técnicas de emisión infrarroja

La termografía infrarroja es un método de monitorización rápido y sin contacto que sirve para localizar defectos por debajo de la superficie, la interpretación de *termogramas* es muy sencilla (imágenes) y la radiación infrarroja no es nociva (al contrario que los rayos-x) [9].

Prácticamente todos los tipos de soldadura emiten radiación infrarroja, poder medir esta radiación es un recurso útil a la hora de supervisar el proceso.

Durante la soldadura por arco, la alta temperatura asociada con el arco provoca altos gradientes de temperatura en la región del baño de soldadura, la lectura de la radiación térmica infrarroja durante este procedimiento resulta muy útil para supervisar el proceso.

2.3.4 Sensores eléctricos

Uno de los mecanismos más extendidos para la motorización en tiempo real en la industria se basa en el uso de transductores para medir la corriente que circula por el electrodo durante el proceso [6], son técnicas relativamente baratas y muy utilizadas, pero tienen el inconveniente de que no son demasiado precisas ya que son muy sensibles a las interferencias electromagnéticas producidas al inicio de la soldadura.

2.3.5 Técnicas de visión artificial

Otro sistema de monitorización de soldadura fiable es la visión artificial. Se compone por un sistema sensor de cámaras en el rango visible y por una fuente de iluminación externa (generalmente LED), de modo que elimine la radiación producida por la propia soldadura.

A través de la cámara se filtra la imagen correspondiente a la longitud de onda emitida por la fuente de iluminación externa LED, obteniendo así una buena visión del proceso en tiempo real [10].

2.4 Monitorización en tiempo real con tecnología óptica

La monitorización en tiempo real con tecnología óptica suele dividirse en dos ramas dependiendo si para el montaje se utilizan fotodiodos o espectrómetros:

2.4.1 Fotodiodos

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la luz visible o infrarroja. Para que funcione correctamente hay que polarizarlo inversamente, de modo que produzca una cierta circulación de corriente cuando le incida la luz.

Cuando el diodo se polariza en el sentido normal de la corriente (polarización directa), deja pasar la corriente eléctrica e impide que pase en la dirección inversa. El fotodiodo permite pasar una pequeña corriente en sentido inverso, corriente que aumenta cuando el diodo es excitado por la luz.



Figura 2.5 – Distintos modelos de fotodiodos.

Los montajes basados en fotodiodos fueron muy utilizados en los inicios de la investigación en la espectroscopía óptica de plasmas aplicada a la monitorización de la calidad en procesos de soldadura, soportando un rango espectral que abarca desde la luz ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. Esta solución permite detectar determinados defectos de soldadura como la falta de penetración en el metal [8].

2.4.2 Espectrómetros

La espectroscopía es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, durante la cual exista absorción o emisión de energía radiante.

El análisis espectral se basa en detectar la radiación electromagnética a ciertas longitudes de onda y relacionarla con los niveles de energía implicados.

El espectrómetro es un aparato capaz de analizar el espectro de frecuencias (longitudes de onda), que se usa para medir las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. Generalmente la variable que se mide es la intensidad luminosa en función de la longitud de onda.

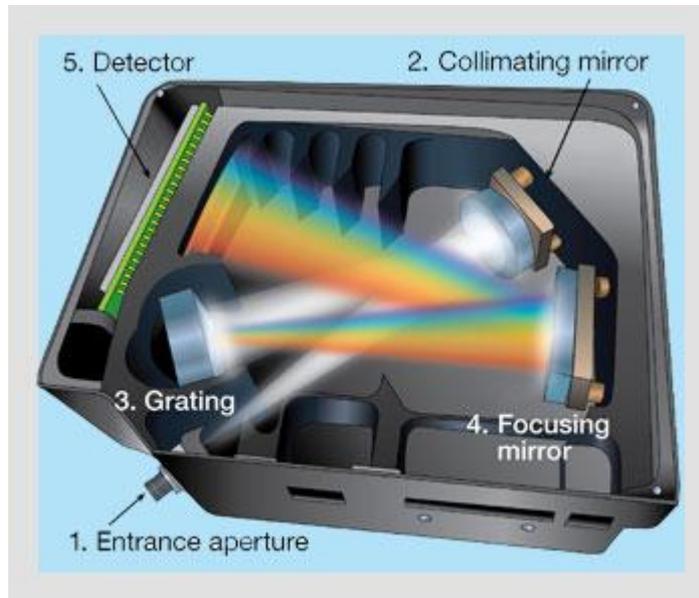


Figura 2.6 – Detalle de un espectrómetro.

La diferencia más importante entre el uso de espectrómetros o el uso de fotodiodos, además del notable margen económico, es que un sensor basado en un espectrómetro capta la radiación luminosa y la analiza indicando la intensidad para las distintas longitudes de onda, por lo que puede conseguir a partir del espectro de plasma diversos análisis distintos que nos pueden ayudar a determinar si la soldadura es correcta. Por otro lado el fotodiodo integra la luz captada en un determinado rango de longitudes de onda que convierte en señal eléctrica, de este modo se obtiene un perfil bastante más simple, ya que lo que hace es captar luz y convertirla en señal eléctrica para poder cuantificarla en vez de analizar el espectro como tal [8].

En el Capítulo 3 se procederá a una explicación detallada del programa, pasando por los pasos necesarios desde que se selecciona la carpeta llena de archivos con extensión *.bke* hasta que uno de ellos aparece representado en entorno gráfico. Se detendrá en las partes más complejas como el cálculo de los umbrales y la función que selecciona una carpeta y lista su contenido y características en el cuadro de texto.

También se detendrá, aunque más brevemente en el entorno gráfico *Zedgraph*, así como la plataforma de programación escogida *.NET*.

HERRAMIENTA SOFTWARE

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un programa que sea capaz de analizar simultáneamente grandes paquetes de archivos de datos de soldaduras de manera que sean fácilmente identificables las que no se ajusten a unos determinados criterios de calidad.

La herramienta también será capaz de mostrar una muestra específica indicando la evolución de los distintos tipos de procesamiento que incluirá.

Los datos que procesa el programa se obtienen de lecturas de soldadura a través de un espectrómetro, estos datos serán codificados e incluidos en un archivo binario con extensión *.bke*, y dicho archivo será posteriormente procesado por el programa desarrollado.

Aunque esta tecnología tiene su máxima utilidad en la detección y corrección de fallos en tiempo real, esta aplicación procesa de forma masiva muchos datos de soldadura, por lo que su utilidad cobra sentido cuando las soldaduras se han terminado. Esto es útil para hacer un procesamiento masivo y rápido de múltiples soldaduras antes de certificar su conformidad.

Para detectar los posibles defectos que puedan aparecer en los cordones de soldadura son utilizados tres métodos de análisis, pudiendo emplear cada uno normalmente de manera individual, y combinando los tres para conseguir que el análisis sea más completo:

- ✓ La temperatura electrónica del plasma T_e es el uno de los parámetros más utilizados para el análisis de las soldaduras, ya que existe una correlación entre los perfiles de este parámetro espectroscópico y la presencia de defectos en el cordón [1].
- ✓ I_l/I_c Intensidad relativa de una línea de emisión respecto a la radiación de fondo, es usada como una señal de monitorización ya que existe una relación entre este cociente y T_e [1]. Además tiene una implementación bastante sencilla ya que para su cálculo solo es necesaria una única línea de emisión.
- ✓ El valor RMS es calculado teniendo en cuenta cada píxel del espectrómetro y representa una estimación de la intensidad media de la radiación emitida por el plasma de soldadura. Se ha demostrado que este parámetro también guarda una estrecha relación con la calidad del proceso de soldadura [2], estando directamente relacionado con el aporte térmico, esto es, con la cantidad de energía aportada al proceso.

3.1 Programa Principal

A grandes rasgos, el programa desarrollado lo que hace es abrir una carpeta con archivos *.bke* y lleva a cabo un procesado inicial de todos estos archivos para mostrar en una lista todos los ellos y si tienen algún fallo atendiendo a los 3 tipos de procesamiento considerados. Si se necesita un análisis más exhaustivo de cualquiera de los archivos basta con seleccionarlo y seleccionar la opción “*Mostrar*”, entonces en el gráfico se mostrará cualquiera de los 3 tipos de procesamiento en función del tiempo.

A continuación se explicarán brevemente las distintas funcionalidades implementadas en el software desarrollado.

Inicialmente el programa tiene la opción de escoger si se quiere analizar un único archivo o una carpeta que contenga archivos *.bke*. Esta segunda alternativa es útil cuando se necesita analizar una sola muestra de soldadura, como el programa no procesa más que un único archivo, se ahorra tiempo.

En el caso de que se quiera analizar una carpeta se abrirá un dialogo de explorador de Windows para buscar la carpeta, y los archivos contenidos en ella se listarán en un cuadro de manera que los cordones de soldadura correctos se mostrarán subrayados en verde y los incorrectos en rojo. Para analizar uno de los cordones de forma individual bastará con seleccionarlo en el cuadro, pulsar “*Mostrar*” y escoger una de las opciones de análisis.

Si fuese necesario modificar los parámetros a partir de los cuales se calculan los cordones correctos y defectuosos, se podrán cambiar por los valores deseados y posteriormente se pulsará “*Refrescar*”, de este modo se volverá a cargar la lista de archivos en el cuadro subrayándose de acuerdo a los nuevos parámetros.

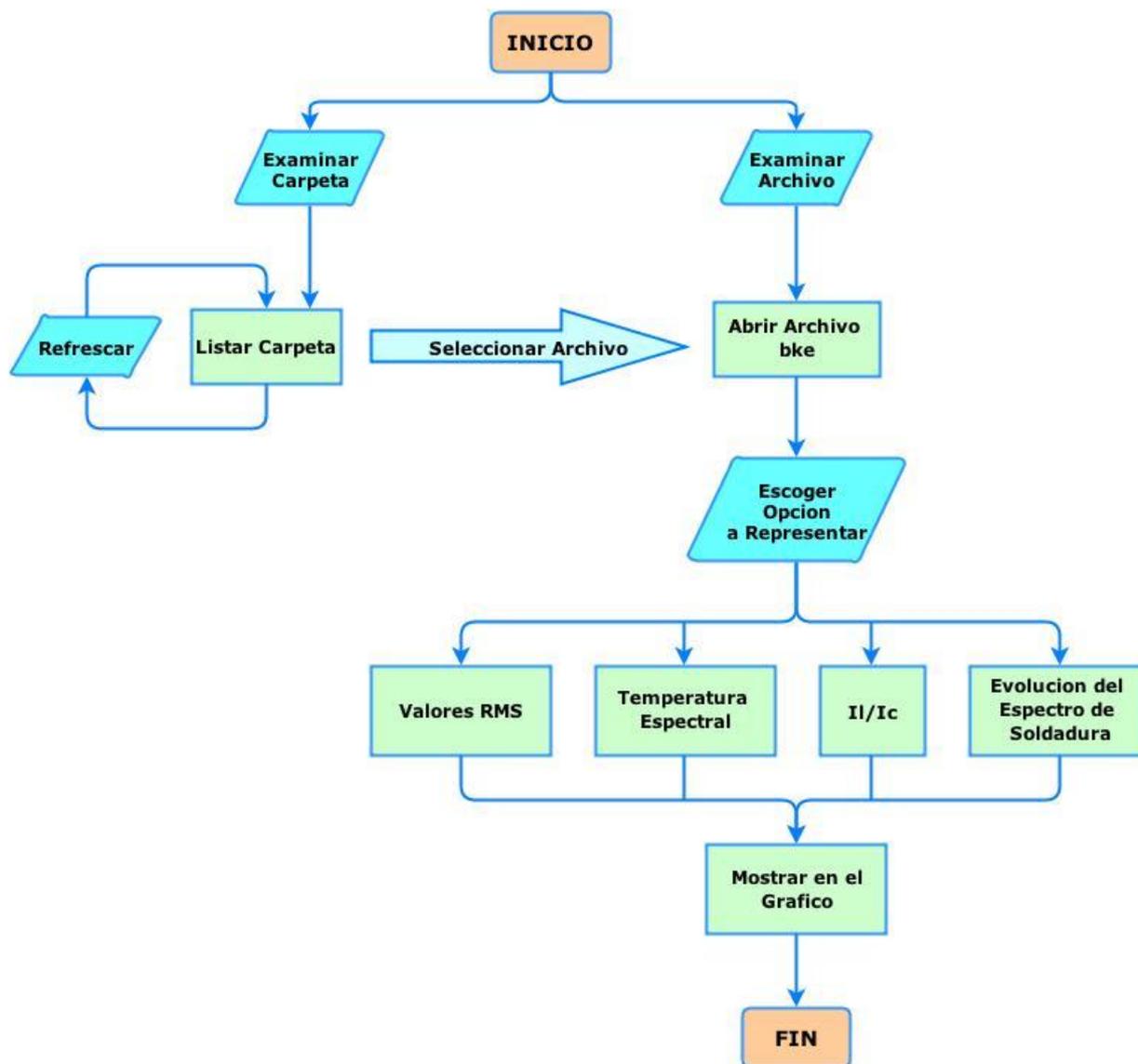


Figura 3.1 – Programa Principal.

3.2 Cálculo de umbrales

Para la parte dedicada al cálculo de los umbrales se ha utilizado como referencia el algoritmo de detección de defectos implementado por David Rojo Olaya en su proyecto [3].

El algoritmo genera dos umbrales a partir de las muestras obtenidas, uno superior y uno inferior. Para que un proceso de soldadura se considere correcto, la evolución de las muestras debe de ser más o menos constante (estable) y sin cambios bruscos. Ante cualquier cambio brusco de una muestra, ésta se saldrá de los umbrales, lo que implicará que el programa considerará la existencia de un defecto.

Este algoritmo se basa en la estimación de la desviación típica de las muestras, por lo que toma en consideración no sólo la muestra actual, sino también las muestras

anteriores. Dependiendo de la tolerancia que se necesite, es posible modificar el número de muestras a tener en cuenta, a este número se llamará “Window”.

$$desviación\ típica = \sqrt{\frac{\sum(muestra_i - \overline{muestra})^2}{n}} \quad (3.1)$$

En la ecuación anterior, $muestra_i$ se refiere al valor que va a ser procesado (*Valor RMS, T_e o I_i/I_c*) referido a la muestra actual i , $\overline{muestra}$ se refiere a la media de los valores que serán procesados en el intervalo “Window” y “ n ” es el número de muestras que se tienen en cuenta. Este valor de desviación típica representa el grado de dispersión de los valores procesados con respecto al valor medio.

El valor de desviación típica es muy pequeño, y cuando hay una pequeña variación de las muestras tomadas éstas pueden salirse de los umbrales dando lugar a un defecto de manera errónea. Para evitarlo se añadirá un parámetro “*holgura α* ” variable por el usuario que va a establecer una desviación típica mínima.

$$\begin{aligned} umbral\ superior &= \overline{muestra} + \alpha * desviación\ típica \\ umbral\ inferior &= \overline{muestra} - \alpha * desviación\ típica \end{aligned} \quad (3.2)$$

Mediante otro parámetro llamado “*permisividad*” existe la posibilidad de aumentar ligeramente la holgura de los nuevos umbrales respecto a los anteriores.

$$\begin{aligned} umbral\ superior\ final &= umbral\ superior * permisividad \\ umbral\ inferior\ final &= umbral\ superior / permisividad \end{aligned} \quad (3.3)$$

El algoritmo implementado detecta los valores que están fuera de los umbrales y permite inspeccionarlos en la gráfica para ver en qué zona de la soldadura se detecta el error y su magnitud asociada.

El algoritmo para calcular los umbrales recibe inicialmente la lista de valores a partir de la cual va a generar los umbrales. A partir de esta lista sustituye los valores máximo y mínimo de la lista por el valor medio para que no provoquen una excesiva desviación en los umbrales. A continuación calcula los umbrales de acuerdo a los parámetros y las formulas vistas en el párrafo anterior y devuelve las dos listas, una con el umbral superior y otra con el umbral inferior.

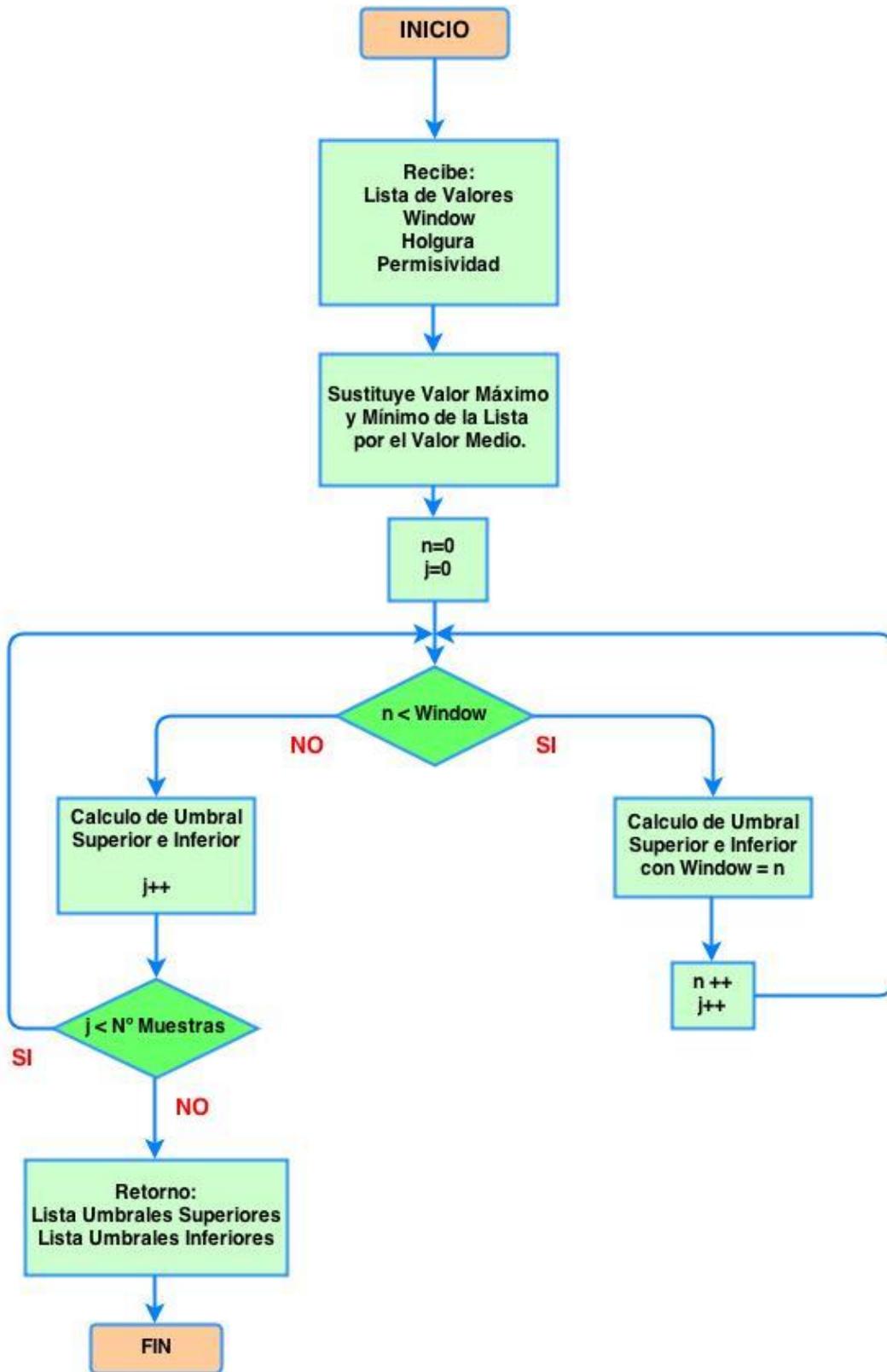


Figura 3.2 – Cálculo de los Umbrales.

Complementario a este algoritmo, es necesario crear otro que detecte los valores que se encuentran fuera de los umbrales, dado que un sólo punto fuera de los umbrales no tiene por qué ser necesariamente un error. Por lo tanto, se añadirá una

nueva variable, la cual indicará el número máximo de muestras consecutivas que pueden salirse de los umbrales sin que se considere que ha generado un defecto.

Del mismo modo, tampoco interesarán los errores al inicio ni al final del cordón, ya que estos errores son debidos a la inestabilidad inicial inherente al proceso, y son difíciles de evitar, por lo un porcentaje inicial y final de las muestras será despreciado.

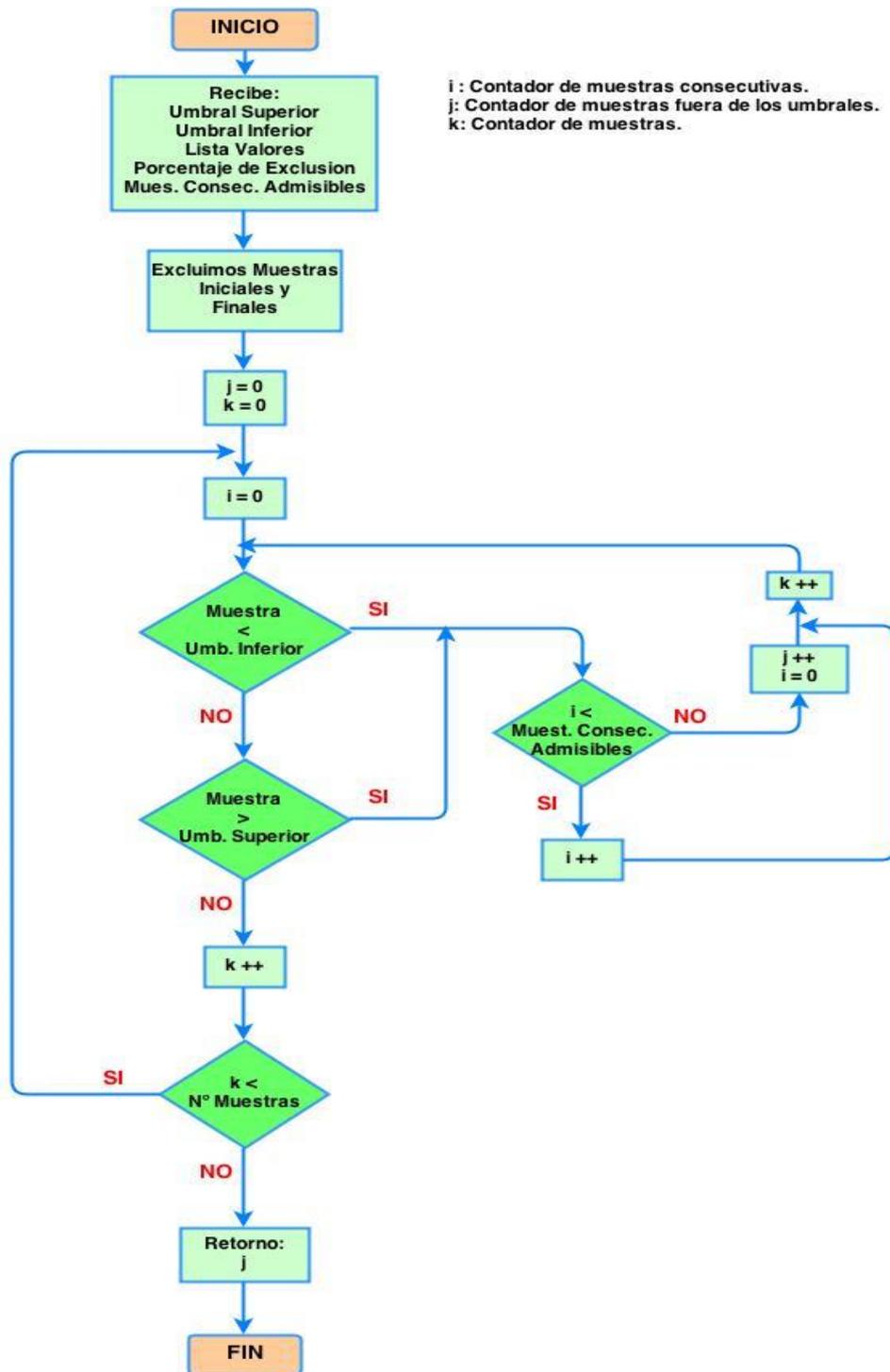


Figura 3.3 – Detector del número de errores.

3.3 Listar Carpeta

La función que lista el contenido de la carpeta en el cuadro de texto recibe la dirección de una carpeta contenida en el PC, y a partir de ella analiza todos los archivos contenidos uno a uno.

Para cada archivo lo primero es comprobar si tiene extensión *.bke*. A partir de aquí crea 3 listas, una con cada tipo de procesamiento (valores RMS, T_e e I_l/I_c), y después para cada una de estas listas genera los dos umbrales. Por último calcula el número de puntos de las listas que se encuentran fuera de los umbrales y escribe toda esta información en el cuadro de texto. Una vez no quedan archivos en la carpeta por analizar, el programa subraya en rojo aquellos archivos que contengan algún valor fuera de los umbrales y en verde los demás.

Si fuese necesario ajustar los parámetros de los umbrales, también existe la opción de refrescar la lista que muestra las soldaduras erróneas.

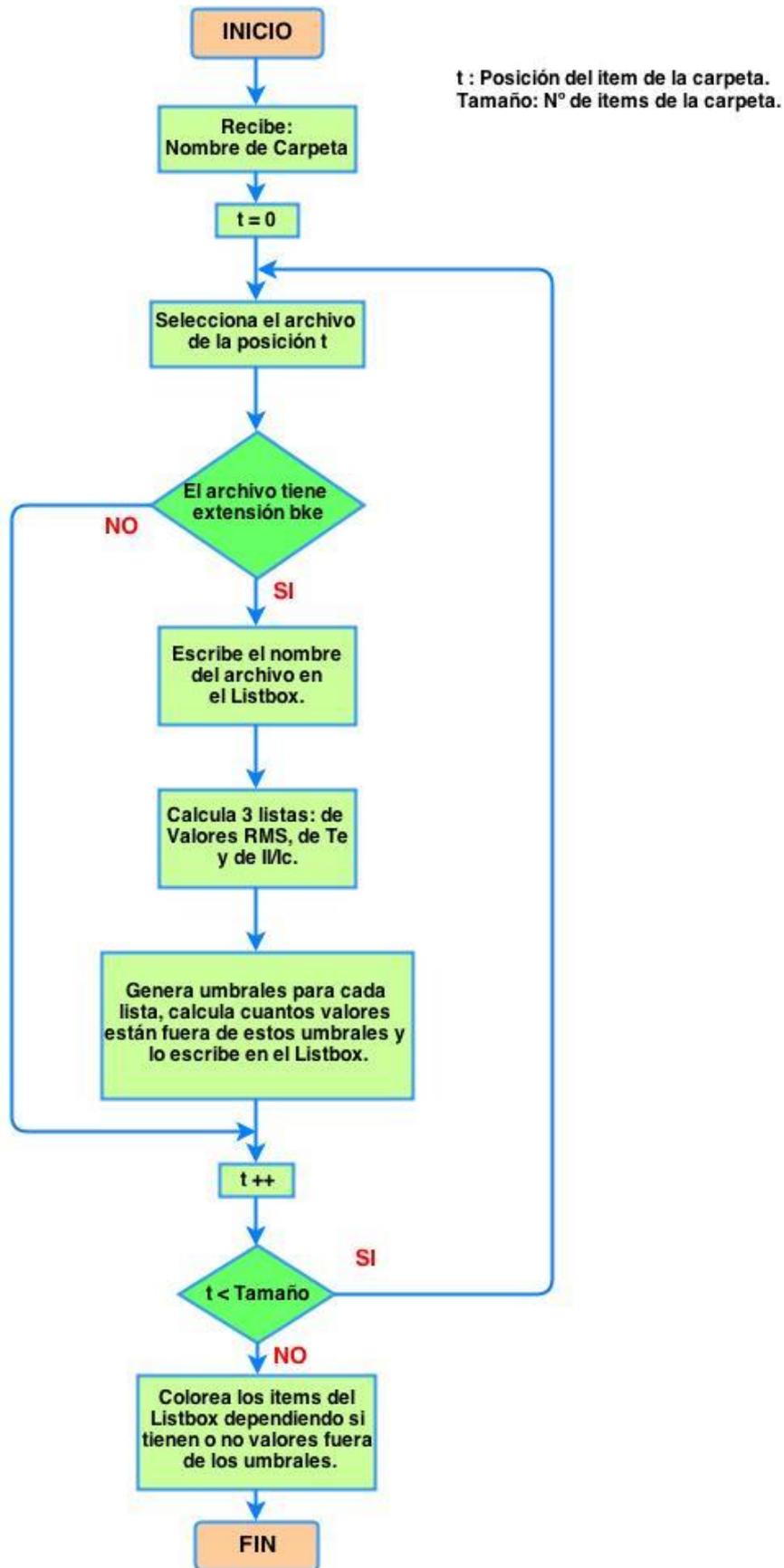


Figura 3.4 – Listar Carpeta.

3.4 Entorno Gráfico

La interfaz gráfica del programa está basada en el control de usuario Zedgraph [4], una librería de código abierto utilizada para elaborar todo tipo de gráficos en 2D. Es una herramienta muy útil, ya que permite modificar y personalizar por el usuario todos los aspectos del gráfico.

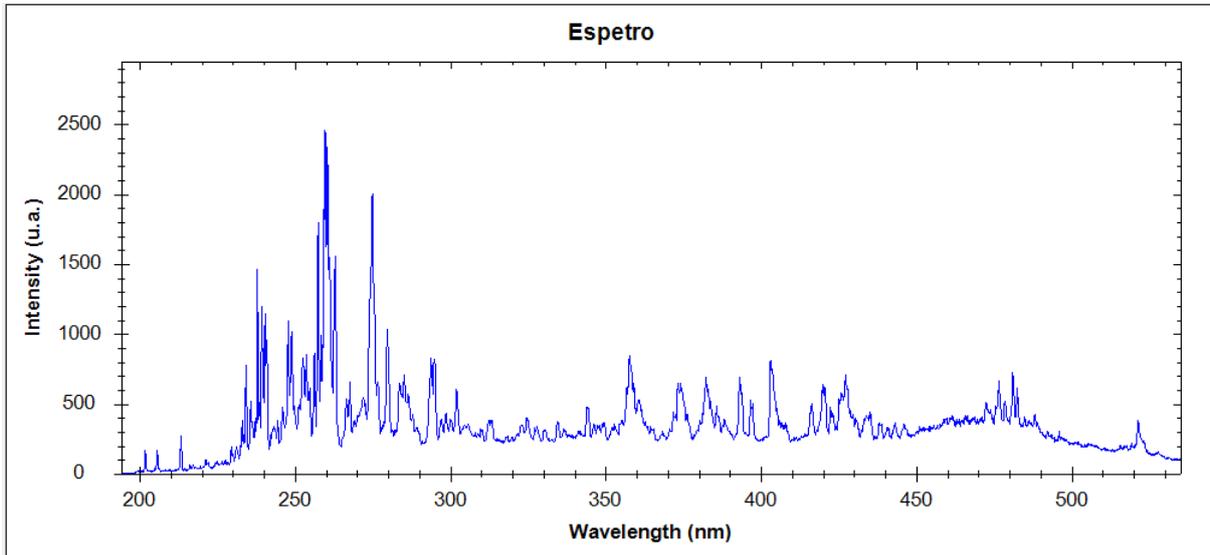


Figura 3.5 – Detalle del entorno gráfico.

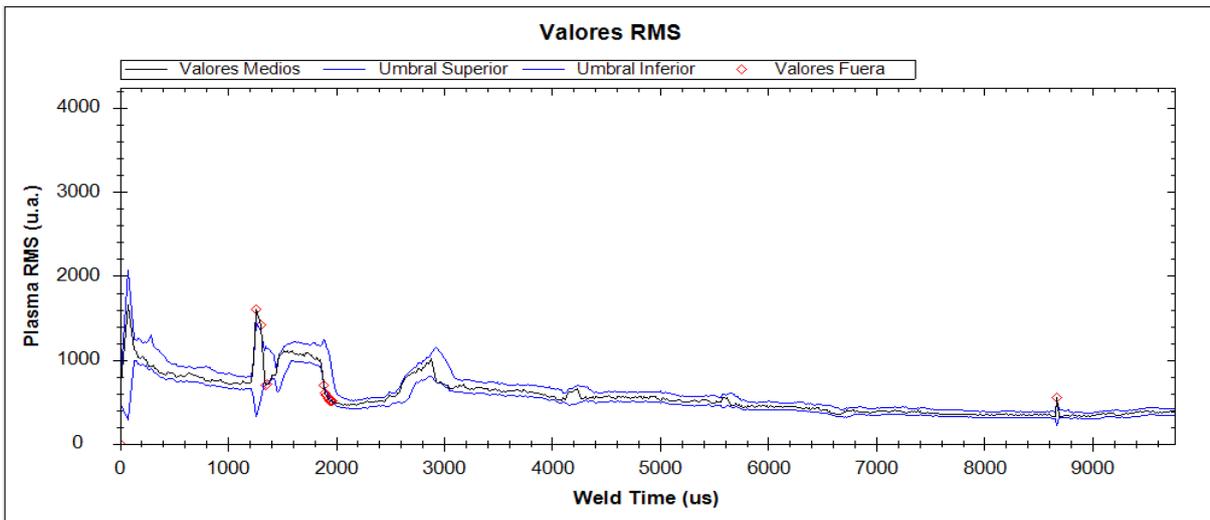


Figura 3.6 – Detalle del entorno gráfico.

3.5 Entorno de programación

El entorno de programación escogido para desarrollar el presente software funciona bajo el sistema operativo *Microsoft Windows*®, en su versión *Windows 7 Ultimate*. La elección de *Windows* viene dada por 2 motivos, el primero la experiencia del autor en la dicha plataforma, y el segundo y más importante, el hecho de que los principales usuarios a los que está destinada la aplicación desarrollada, trabajan utilizando las herramientas disponibles para el sistema *Windows*.

Como entorno de desarrollo se ha escogido Microsoft Visual Studio 2010 y se ha elegido C# como lenguaje para crear la aplicación con el entorno de trabajo .NET en su versión 4.0.



Figura 3.7 – Entorno de programación.

3.6 Interfaz de usuario

En este apartado se mostrará en diseño de la interfaz gráfica de usuario, así como la manera en que el usuario interactuará con el software desarrollado.

Se ha prestado especial importancia a la sencillez y a la facilidad de uso de la aplicación, lo que se pretende es que sea lo más intuitiva posible para que cualquier persona sea capaz de aprender a utilizarla de manera relativamente rápida y que pueda sacarle partido lo antes posible.

Uno de los objetivos para que la interfaz sea lo más sencilla posible, es que prácticamente la totalidad de las funcionalidades estén disponibles sin necesidad de navegar por distintos menús. De modo que exceptuando las funcionalidades relacionadas con abrir carpeta y abrir archivo, el resto se encuentran disponibles en todo momento en la pantalla principal de la aplicación con un nivel de navegación mínimo.

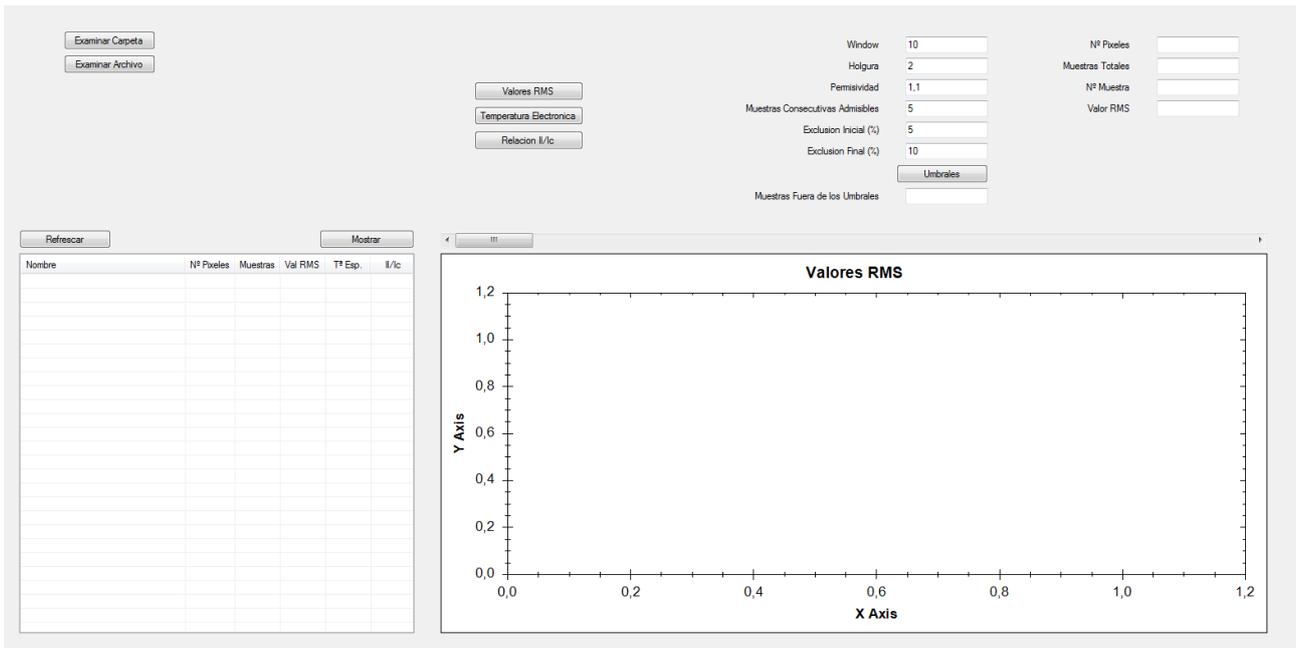


Figura 3.8 – Interfaz de usuario.

Inicialmente el programa dispondrá de la opción de elegir si se quiere analizar un único archivo o una carpeta que contenga archivos *.bke*. Si lo que se quiere es analizar una carpeta se abrirá un cuadro de dialogo donde buscar la ubicación de la carpeta y al abrir esta carpeta, todos los archivos se cargarán en el cuadro de texto, marcando en rojo los que contienen algún defecto y en verde los que no.

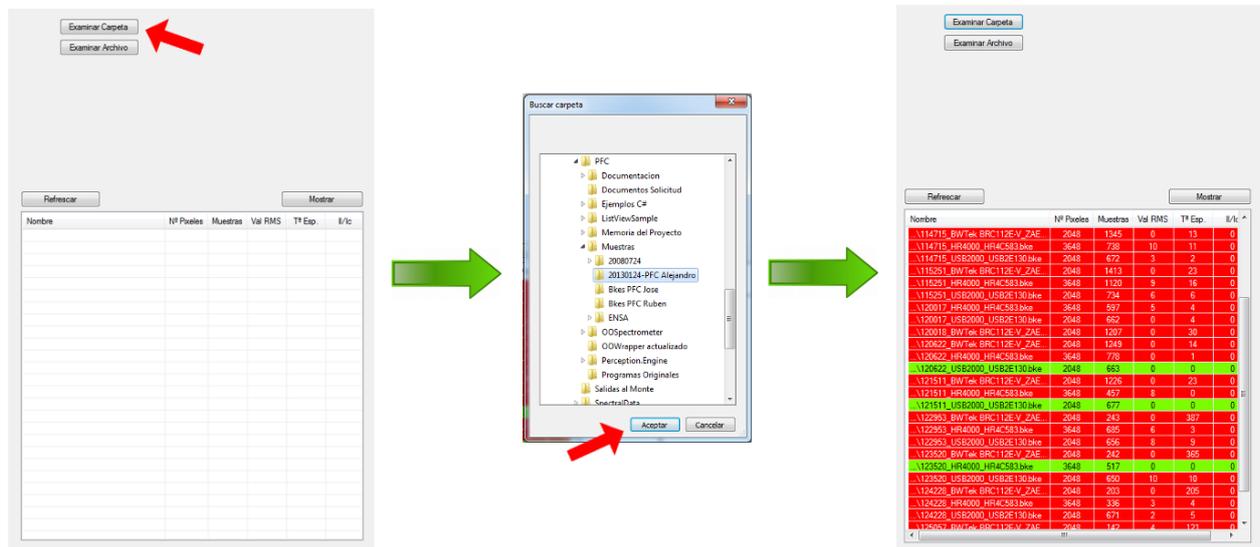


Figura 3.9 – Carga de archivos en el programa.

Una vez se han cargado los archivos, analizar cualquiera de ellos de manera individual es sencillo, únicamente será necesario seleccionarlo en el cuadro y pulsar "Mostrar". Después se podrá representar en el gráfico cualquiera de las formas de procesamiento.

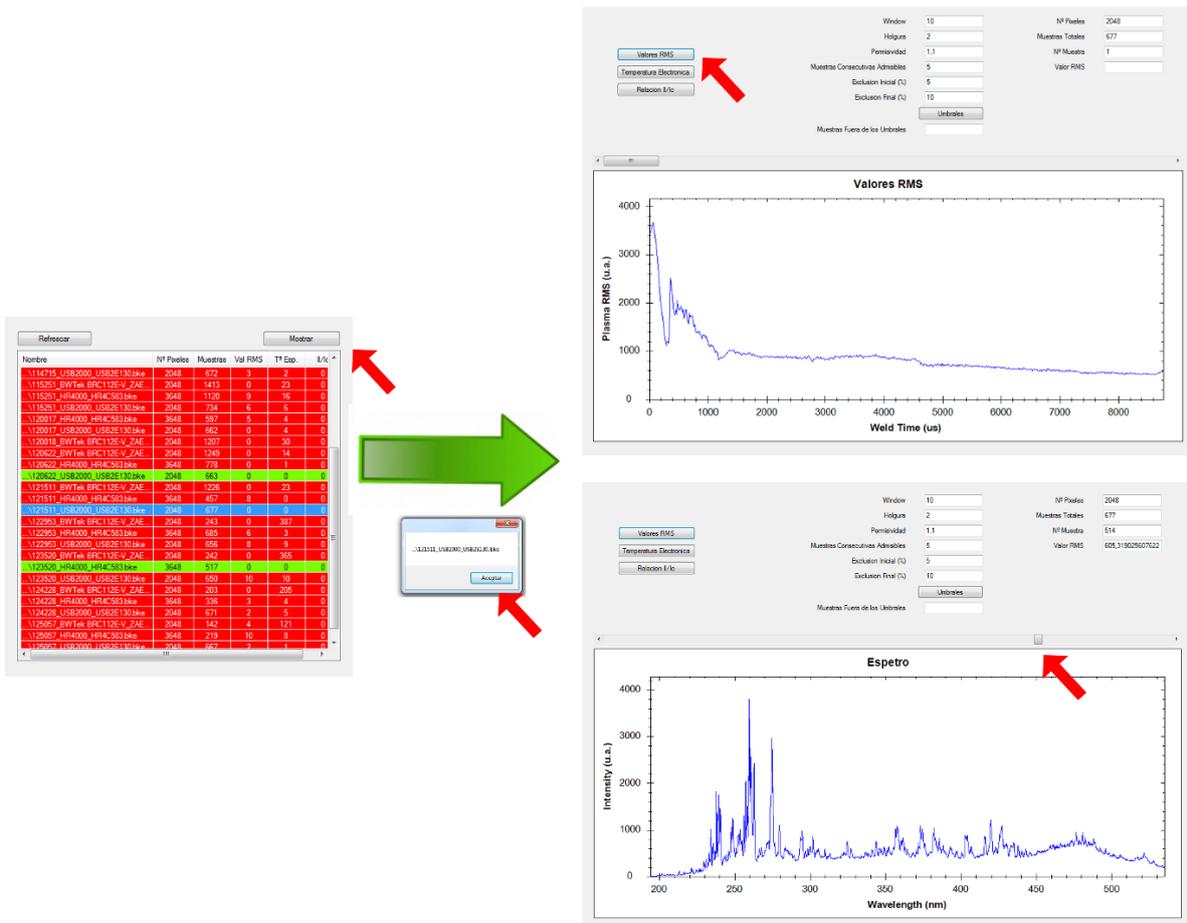


Figura 3.10 – Mostrar un único archivo.

Por ultimo existirá la opción de representar los umbrales o de calcular unos nuevos en el caso de que los parámetros por defecto cambien, para ello bastara con pulsar el botón “Umbrales”.

También se dispone de otra la opción para volver a calcular toda la lista de archivos con unos nuevos parámetros para los umbrales, para ello será necesario cambiar los parámetros a los deseados y pulsar la opción “Refrescar” que se encuentra sobre el cuadro de texto.

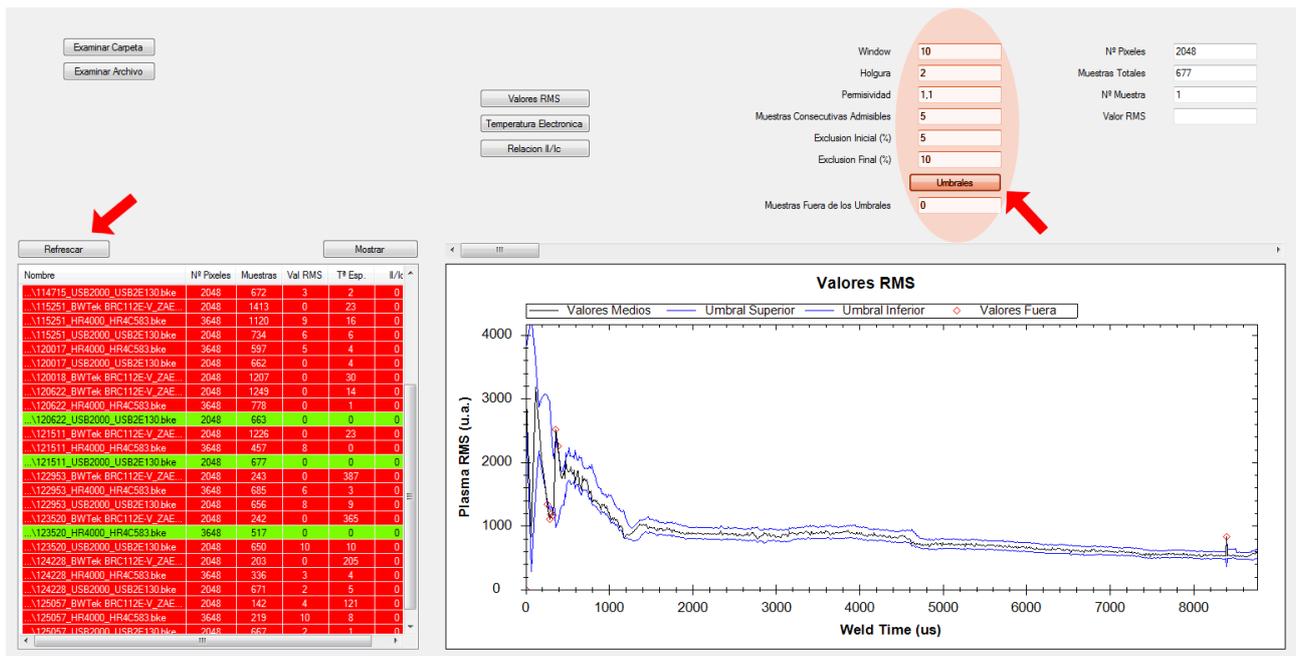


Figura 3.11 – Representación de los umbrales.

En el siguiente capítulo se explicará brevemente el montaje experimental necesario para el sistema de realización de las soldaduras y se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos tras haber realizado unos experimentos en el laboratorio así como de otros experimentos realizados en junio de 2008 en las instalaciones de ITP.

EXPERIMENTOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del programa, se llevaron a cabo experimentos de soldadura en el laboratorio, que posteriormente serán analizados mediante la aplicación desarrollada.

Para no detenerse más de lo necesario en las especificaciones del equipo de soldadura, cabe decir que está compuesto por una máquina de soldar TIG (*Tungsten Inert Gas / Soldadura de arco con gas inerte y electrodo de Tungsteno*) Kemppi 2200, una etapa de desplazamiento para controlar la velocidad de soldadura lineal, otra segunda etapa de desplazamiento para determinar con precisión la altura de la antorcha de soldar y por un mecanismo de control de dos flujos de gases destinados a proteger el baño de soldadura, todo ello controlado y dirigido mediante un PC de control.

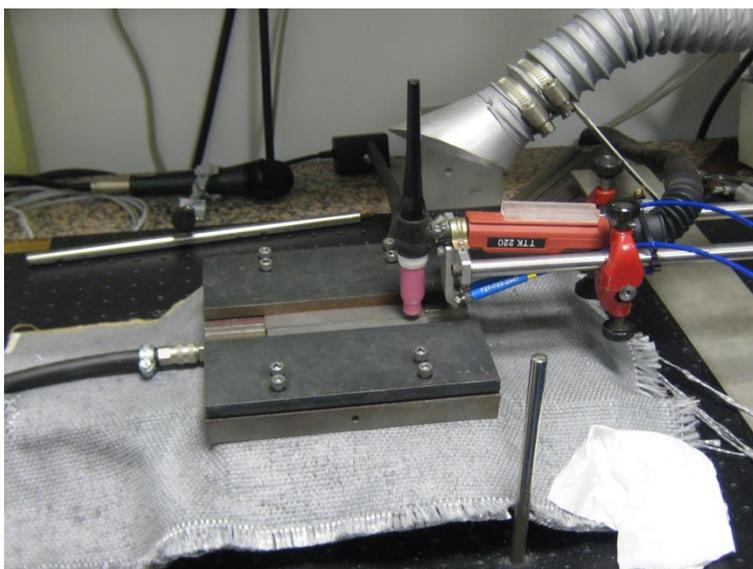


Figura 4.1 – Detalle de la antorcha de soldadura y las etapas de desplazamiento.

Desde el punto de vista del montaje óptico, para tomar los datos de las soldaduras que posteriormente van a ser procesados, se disponen 3 espectrómetros diferentes y dos cables de fibra óptica (una de las fibras es bifurcada, con la que es posible conectar 2 espectrómetros al mismo tiempo) para captar la radiación que será enviada a los espectrómetros:

- ✓ Espectrómetro *BWTeK Econic* con un rango de 200nm a 976nm y 2048 píxeles.
- ✓ Espectrómetro *Ocean Optics USB2000* con un rango de 195nm a 520nm y 2048 píxeles.
- ✓ Espectrómetro *Ocean Optics HR4000* con un rango de 370nm a 500nm y 3648 píxeles.
- ✓ Fibra óptica *Ocean Optics P200* de 2 metros de longitud y 200µm de diámetro

del núcleo.

- ✓ Fibra óptica bifurcada *Ocean Optics* BIF600 de 2 metros de longitud y 600 μ m de diámetro del núcleo.



Figura 4.2 - Detalle de los espectrómetros utilizados.

A continuación se procederá a describir los experimentos de soldadura que se han realizado para comprobar la validez del software desarrollado.

Esta parte experimental estará dividida en tres análisis distintos:

- ✓ Inicialmente se realizará un análisis individual de cada una de las soldaduras tomadas en el Laboratorio del Grupo de Ingeniería Fotónica con el *set-up* experimental descrito en el apartado anterior.
- ✓ La segunda parte estará compuesta por el análisis, también individual, de unos datos que fueron recogidos durante la realización de las probetas de soldadura en las instalaciones de ITP (Industria Turbo Propulsores) en Zamudio el 23 de Julio de 2008.
- ✓ Por último se volverán a analizar las muestras iniciales tomadas en el Laboratorio del Grupo de Ingeniería Fotónica, pero centrándose en el análisis masivo, objetivo principal al que está destinado el presente software.

Primer análisis

4.1 Primera muestra: Muestra Correcta

Lo primero es analizar una muestra de soldadura correcta que será utilizada para calibrar el programa. Esta muestra está soldada mediante un arco de 70A a lo largo de un cordón de 70 mm de longitud. Para esta primera soldadura se representarán los valores tomados por los tres espectrómetros, para el resto de las muestras únicamente se analizarán los datos tomados por el espectrómetro USB2000 de *Ocean Optics*, ya que con uno es suficiente.

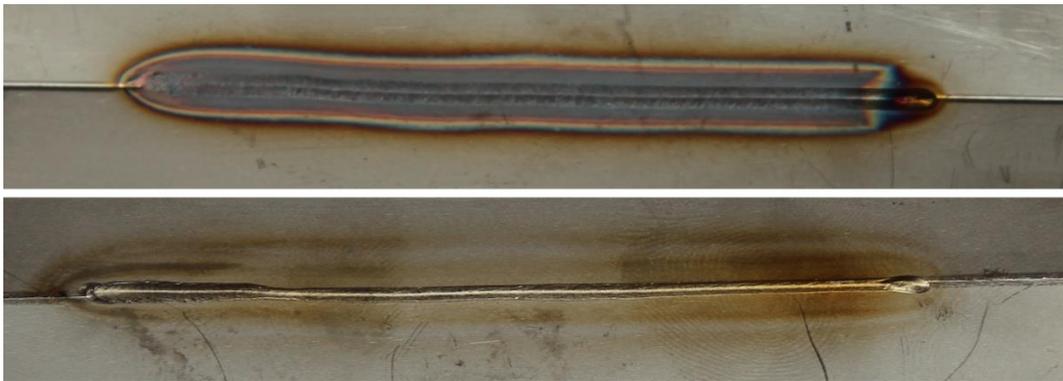


Figura 4.3 - Vista superior e inferior del cordón correcto.

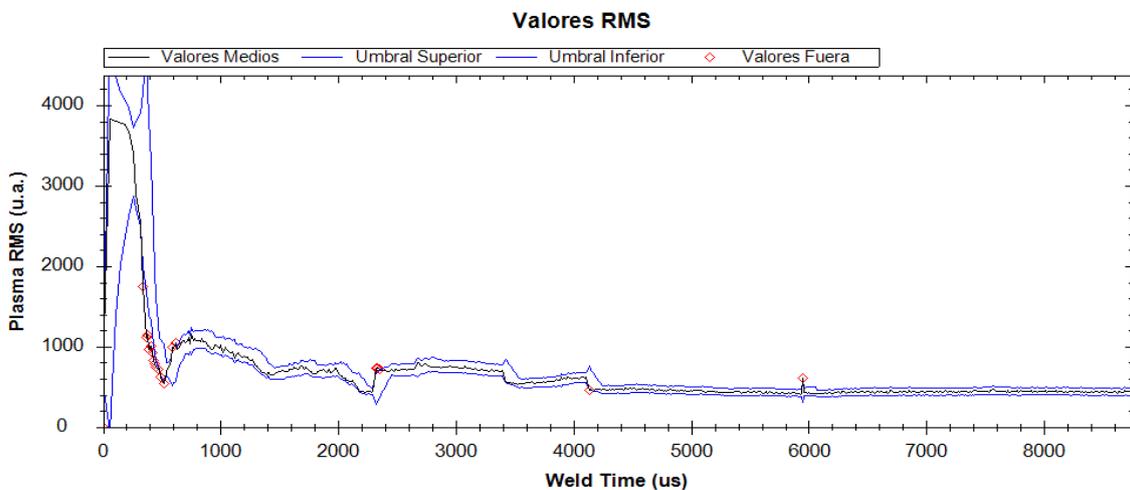


Figura 4.4 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000

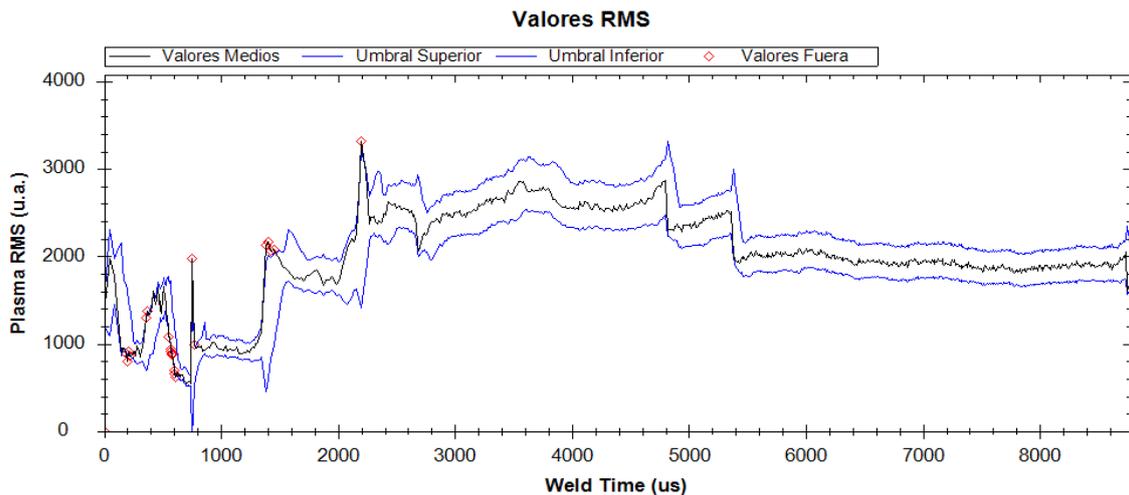


Figura 4.5 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro HR4000.

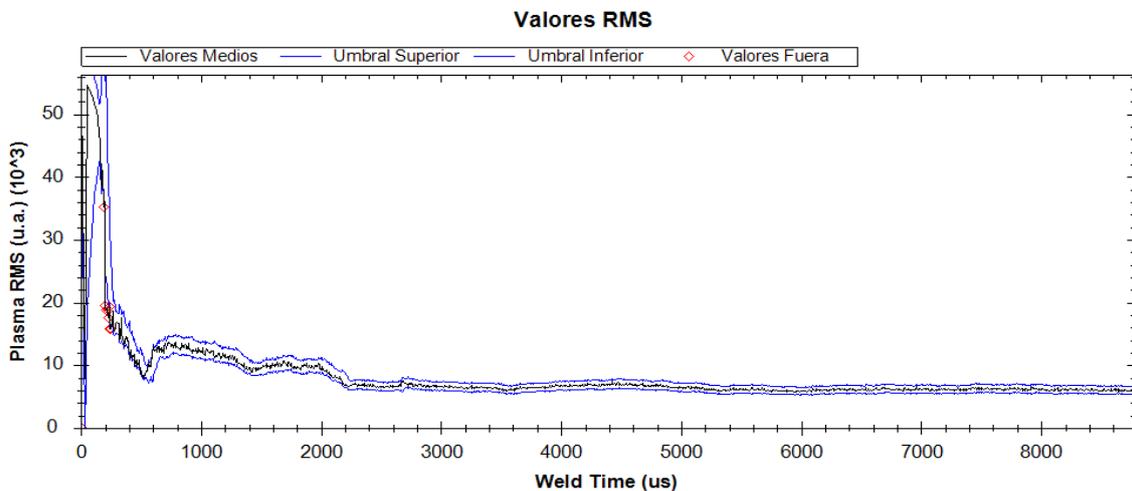


Figura 4.6 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro BWTek.

La aplicación representa la evolución de los valores RMS de cada muestra a lo largo del tiempo. Para detectar los errores en el cordón el programa detecta los cambios bruscos de intensidad a lo largo de la soldadura, cambios que son producidos cuando existe algún tipo de defecto o perturbación en el proceso.

Se puede comprobar que al principio del proceso se produce un cambio brusco, esto es común al principio y al final de la soldadura, esta inestabilidad del proceso es muy difícil de evitar, por lo que la aplicación ofrece la opción de no tenerlos en consideración.

Este cordón se considera, por lo que a partir de él se ajustarán los parámetros de los umbrales para analizar posteriormente las siguientes muestras.

4.2 Segunda muestra: Defecto de Caída de Intensidad

Para este estudio se monitorizará un error de caída en la intensidad del arco, para ello es necesario configurar la máquina de soldadura para usar un arco a 70A durante una longitud de 70mm, creando los errores bajada de intensidad a 45 amperios entre 20 y 30mm y entre 50 y 60mm.

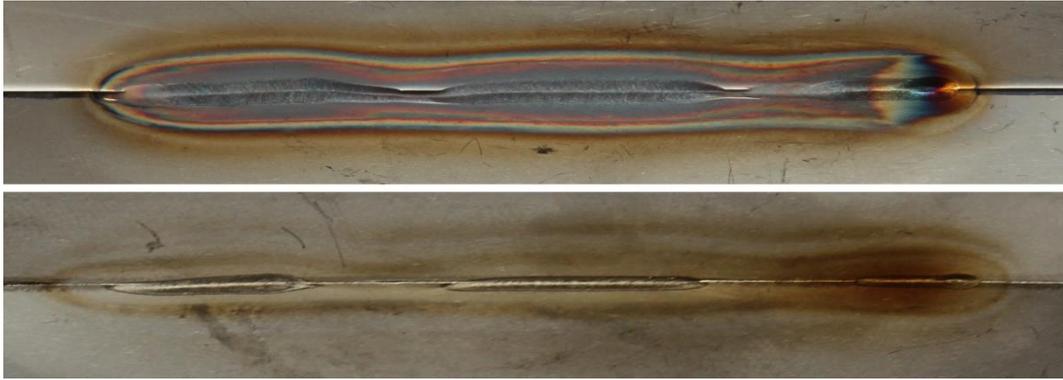


Figura 4.7 - Vista superior e inferior del cordón con error de bajada de intensidad.

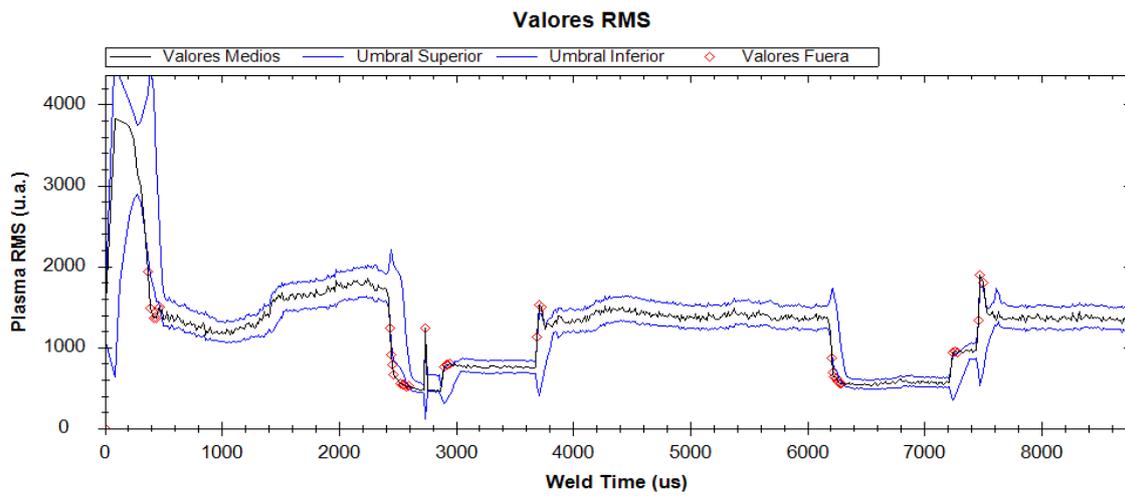


Figura 4.8 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

Se puede observar perfectamente el fallo debido a una caída de corriente, la intensidad baja y sube dos veces, a los 2,4 y a los 6,2sg, coordinadas perfectamente con las longitudes de 20 a 30mm y de 50 a 60mm como muestran las fotos de la soldadura en la Figura 4.6.

4.3 Tercera muestra: Defecto de Corte de Gas Ar

Con la tercera muestra lo que se quiere es simular un corte en el gas Argón, gas que se tiene que suministrar de manera continua para proteger el cordón frente a posibles procesos de oxidación. Para esto se debe situar la corriente nominal en 70A y simular los cortes de gas de 20 a 22mm y de 50 a 54mm.

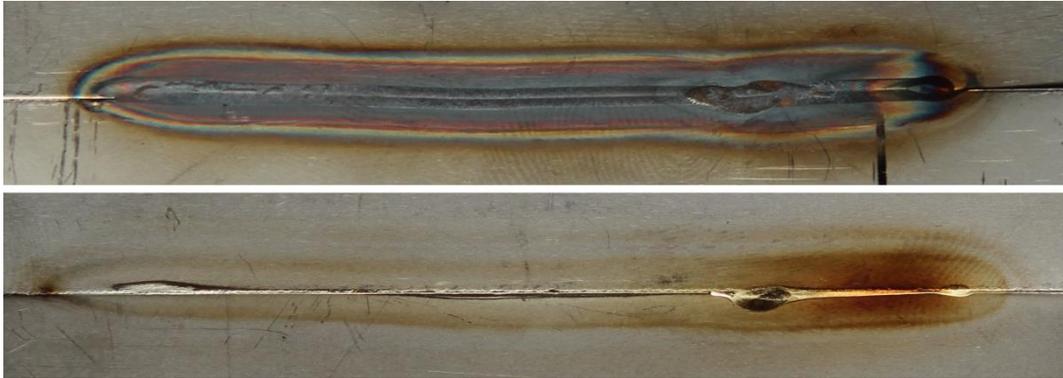


Figura 4.9 - Vista superior e inferior del cordón con error de corte de gas Ar.

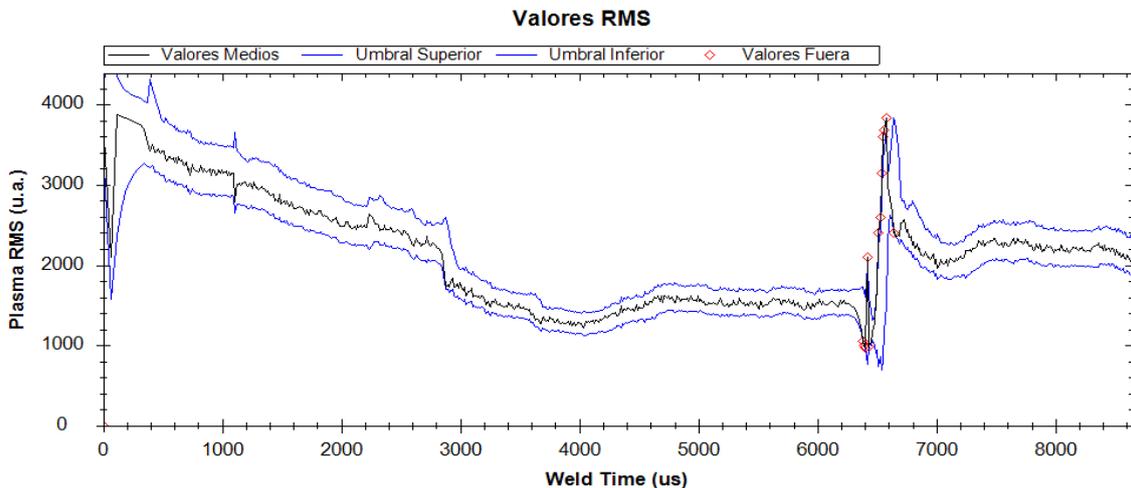


Figura 4.10 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

En esta muestra se detecta perfectamente el segundo corte de gas, pero el primero no se ha detectado ni mediante inspección ocular ni con el programa. Esto puede ser debido a que es de muy poca longitud (20 a 22mm) y probablemente esta perturbación no ha generado un defecto en la soldadura. De todos modos, como se han tomado muestras desde varios espectrómetros se puede ver lo que ocurre con el BWTek.

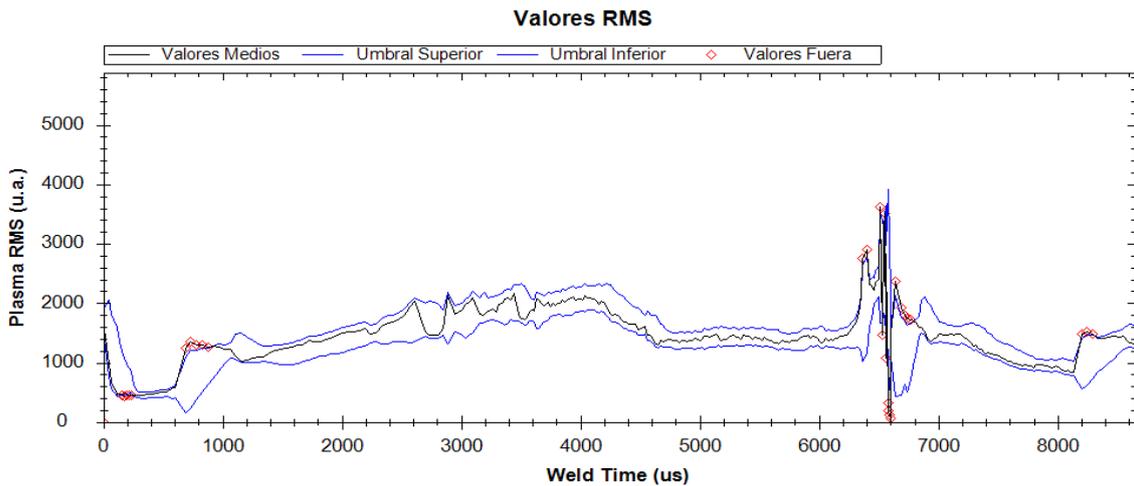


Figura 4.11 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro BWTek.

Esta vez se sigue sin poder detectar de manera automática el corte de gas, aunque alrededor de 3000 μ s se pueden observar unas perturbaciones que pueden indicar que existe un posible defecto sobre ese punto.

4.4 Cuarta muestra: Defecto de Caída de Intensidad y Corte de Gas Ar

En la cuarta muestra el propósito es simular los dos tipos de errores vistos anteriormente sobre el mismo cordón. Para ello, sobre una intensidad nominal de 70A, se reduce la intensidad 15 amperios entre los 25 y los 35mm, y también se provoca un corte de gas de protección entre los 50 y los 54mm.

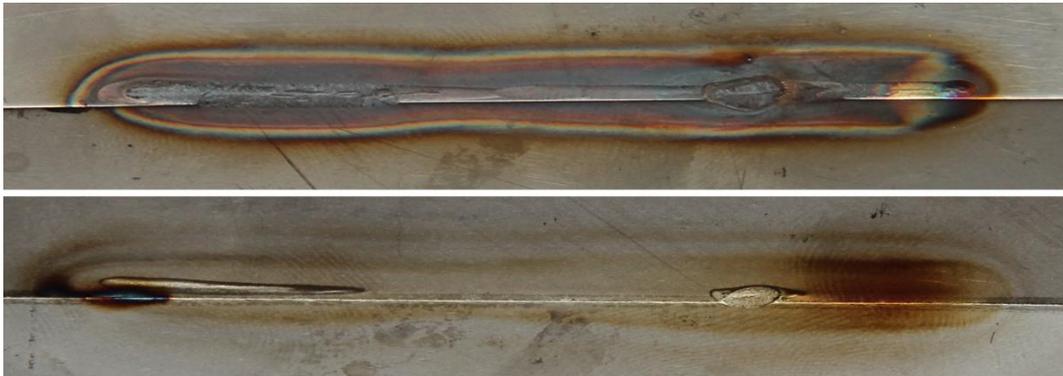


Figura 4.12 - Vista superior e inferior del cordón con los dos errores distintos.

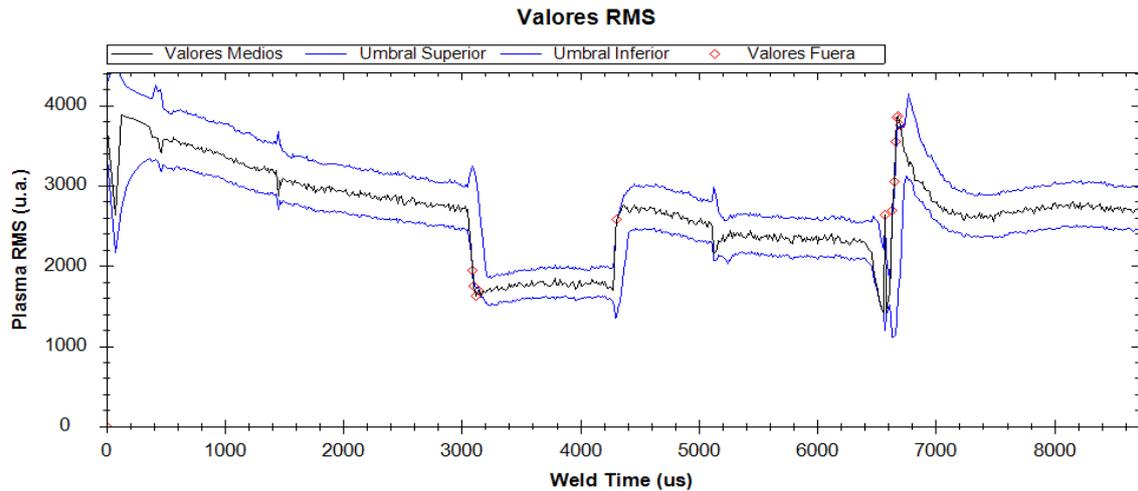


Figura 4.13 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

En este caso se puede apreciar perfectamente los dos tipos de errores, el de bajada de corriente y el de corte de gas. Aunque en la muestra el programa ha identificado bien los errores, la aplicación incluye también otro tipo de procesamiento como es la temperatura electrónica del plasma a través del cual también es posible detectar los errores.

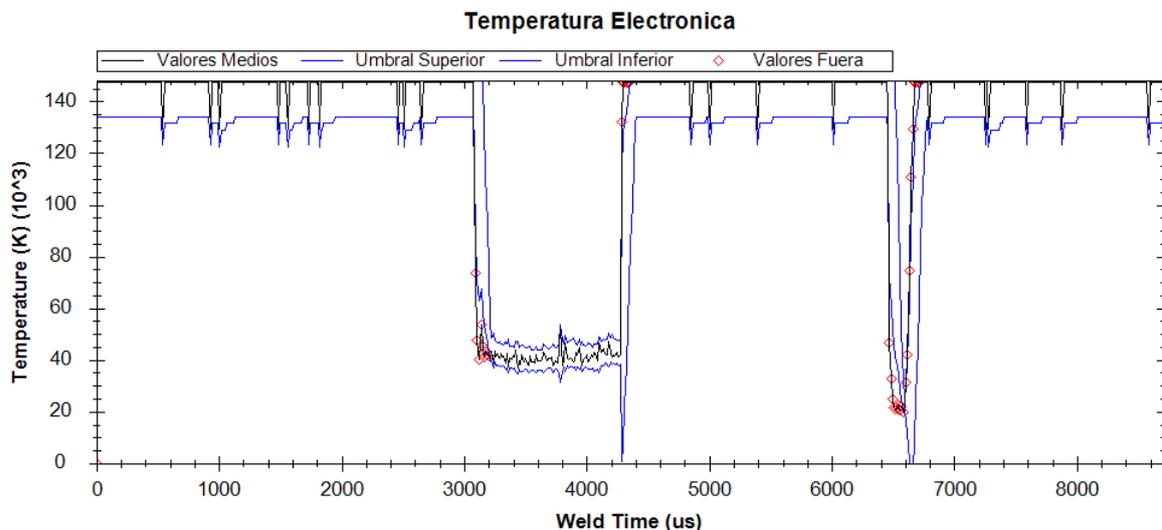


Figura 4.14 - Evolución de la Tª Electrónica de Plasma tomada con el espectrómetro USB2000.

Esta gráfica representa la evolución de la temperatura del plasma en función del tiempo, para calcularla se ha utilizado una aproximación obtenida de la simplificación del método *Boltzman-plot* [11] tomando las líneas de emisión a 480.6 y a 487.6nm, coincidiendo con dos picos en el espectro debidos al Argón II.

$$T_e = \frac{E_m(2) - E_m(1)}{k * \ln \frac{I(1) * A(2) * g_m(2) * \lambda(1)}{I(2) * A(1) * g_m(1) * \lambda(2)}} \quad (4.1)$$

Como se puede observar, los errores de descenso en la intensidad y de corte de gas son también fácilmente identificables y coinciden en tiempo con los de la gráfica de la evolución de los valores RMS.

4.5 Quinta muestra: Defecto de Traspaso de la Chapa

En esta quinta muestra el propósito era monitorizar un defecto de caída en la intensidad del arco, para ello se configuró la máquina de soldadura para usar una arco de 70A durante una longitud de 70mm, creando los errores de bajada de intensidad a 45A entre 20 y 30mm y entre 50 y 60mm.

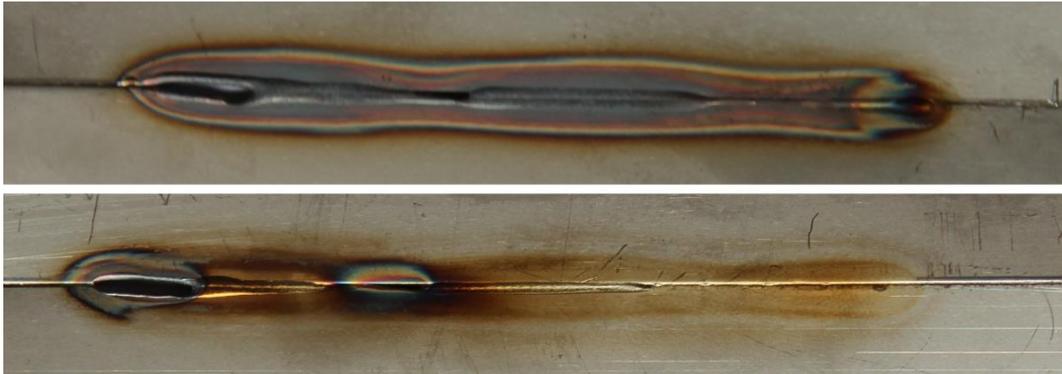


Figura 4.15 - Vista superior e inferior del cordón con error de bajada de intensidad.

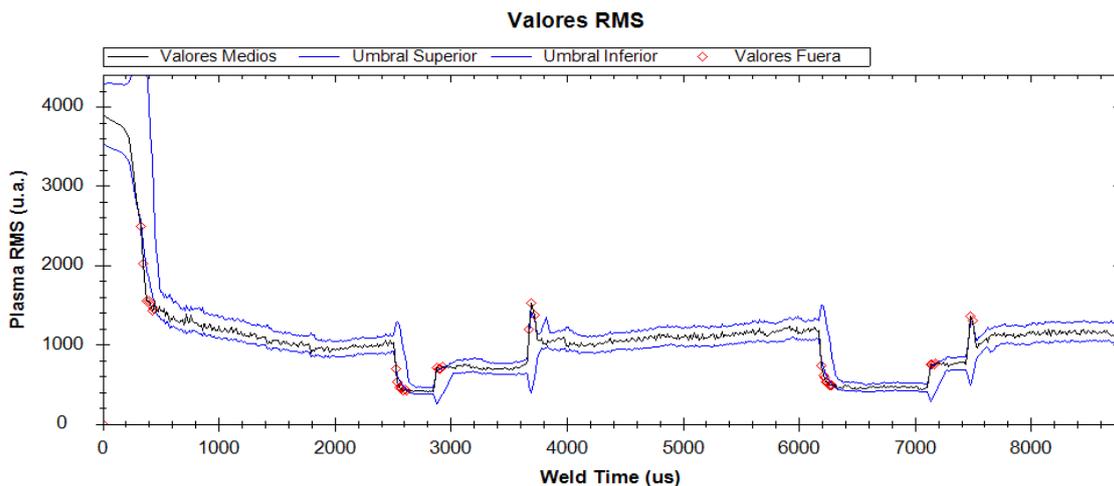


Figura 4.16 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

En el espectro se observan perfectamente los dos fallos de caída de corriente, sin embargo se puede observar en la imagen 4.15 que el defecto sobre la soldadura no es el esperado, se producen 2 agujeros en el cordón debido a que las 2 chapas a fusionar no estaban correctamente colocadas, por lo que debido a las altas temperaturas producidas en el arco de soldadura la chapa resultante ha resultado fundida y agujereada.

Segundo análisis

Los datos que serán procesados a continuación fueron recogidos por el sensor espectroscópico durante la realización de las probetas de soldadura en las instalaciones de ITP (Industria Turbo Propulsores) en Zamudio el 23 de Julio de 2008.

Estos experimentos incluyen dos materiales distintos: Inconel-718 y Titanio 6Al-4V. Como la composición de los materiales a soldar es un factor relevante a la hora de procesar los espectros de plasma, ésta se detalla a continuación:

Inconel 718		Titanium 6Al-4V	
Element	% participatio n	Element	% participation
Fe	Balanced	Ti	Balanced
Ni (+Co)	50-55	Al	5.5-6.75
Cr	17-21	V	3.5-4.5
Mo	2.8-3.3	C	0.08 max
Nb (+Ta)	4.75-5.5	H	0.015 max
Ti	0.65-1.15	Fe	0.25 max
Al	0.2-0.8	N	0.05 max
Si	0.35	O	0.2 max
Mn	0.35		

Figura 4.17 - Composición relevante del INCONEL-718 y del Titanio 6Al-4V.

4.6 Sexta muestra: Cordón Correcto

Soldadura sobre Inconel, la máquina se ha configurado para usar un arco de 115A a una velocidad de 180mm/min.



Figura 4.18 - Vista superior e inferior del cordón.

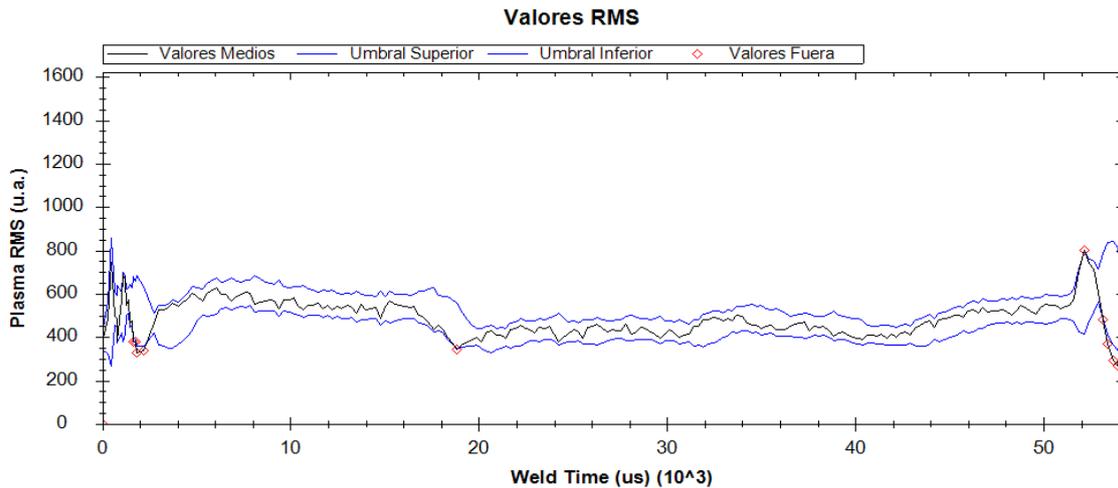


Figura 4.19 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

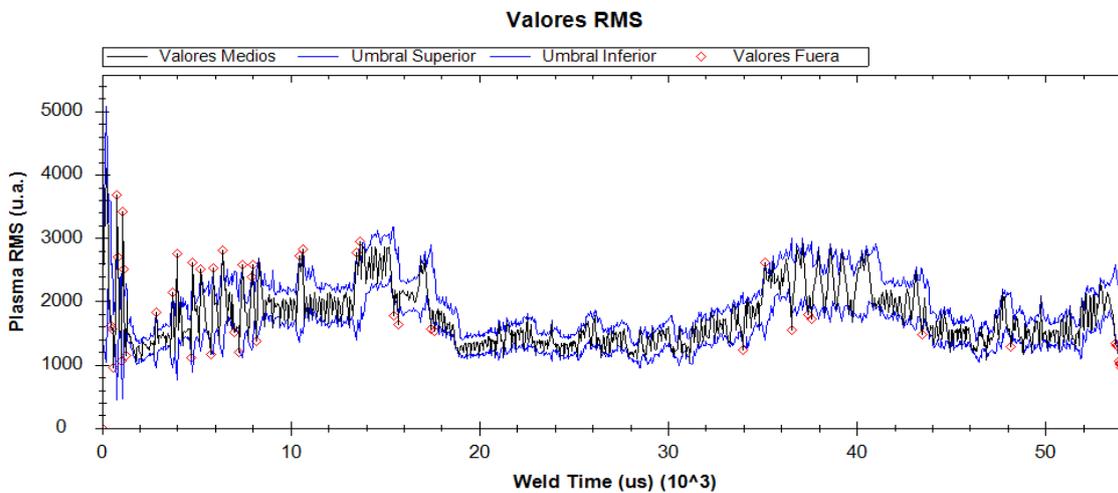


Figura 4.20 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro HR4000.

En esta muestra se ha considerado correcta, aunque a simple el cordón de soldadura no tiene buen aspecto debido a la suciedad y a un exceso de metal de aporte durante la primera parte del cordón, el análisis de la soldadura mediante el software muestra que, aunque con algún pequeño defecto, puede considerarse un cordón correcto.

Las sucesivas muestras únicamente se analizarán con los datos del espectrómetro USB2000, aunque tiene una resolución menor (0.3nm frente a los 0.03nm del HR4000), se considera suficiente para el propósito del experimento.

4.7 Séptima muestra: Defecto de Falta de Penetración

Soldadura sobre Inconel, la máquina se ha configurado igual que con la soldadura anterior pero se ha aumentado la distancia del electrodo con la chapa.

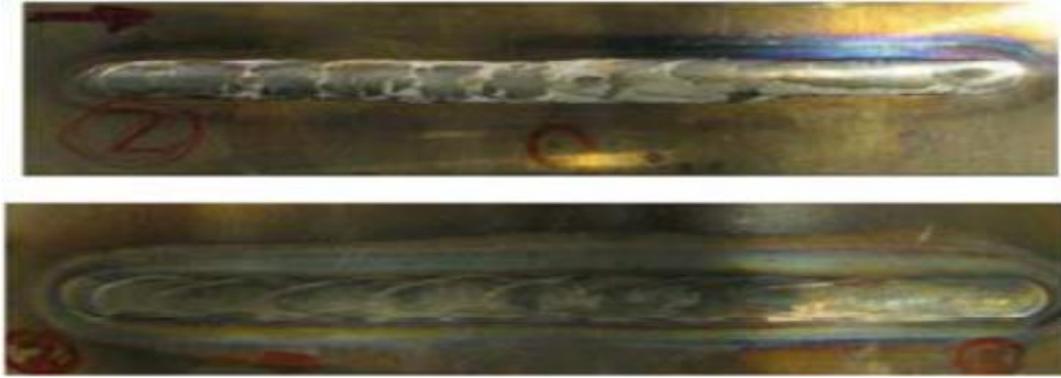


Figura 4.21 - Vista superior e inferior del cordón.

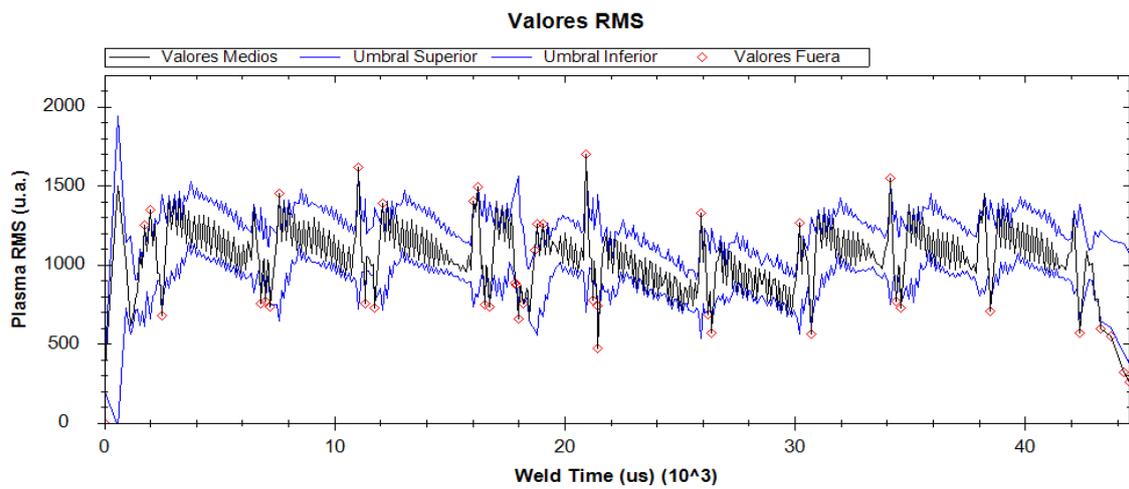


Figura 4.22 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

Se puede observar tanto a simple vista como en el espectro que existen varias irregularidades en forma periódica a lo largo de todo el cordón, posiblemente debidas a la falta de penetración sobre el metal.

4.8 Octava muestra: Defecto de Falta de Penetración

Soldadura sobre Inconel, la máquina está configurada para usar un arco de 60A a una velocidad de 180mm/min.

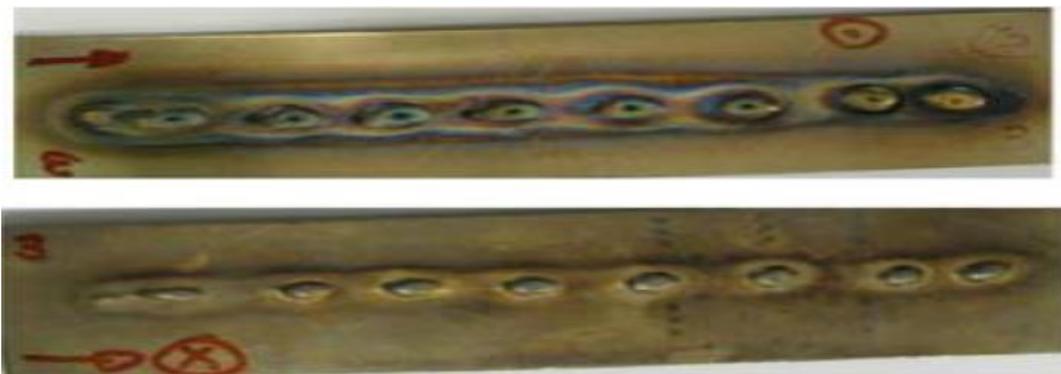


Figura 4.23 - Vista superior e inferior del cordón.

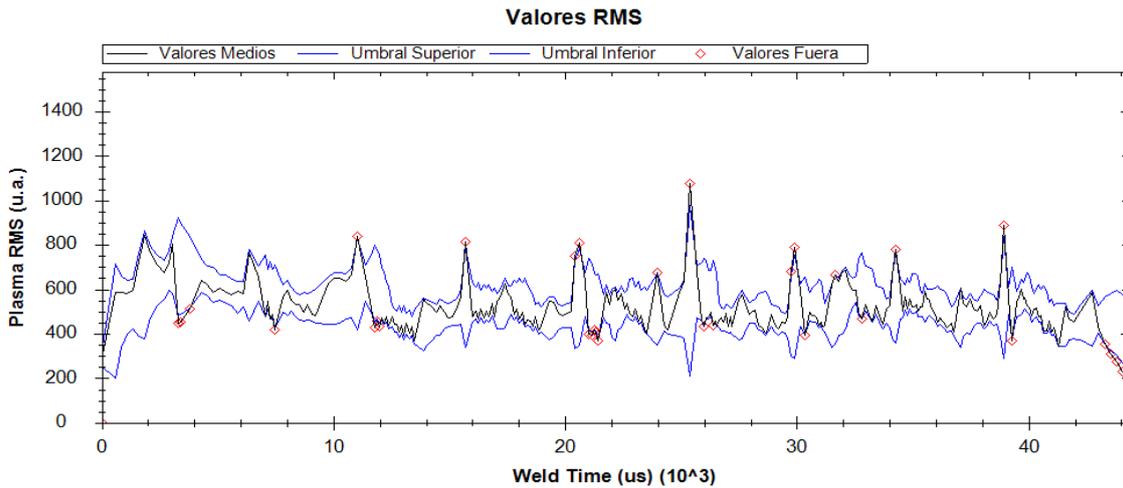


Figura 4.24 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

El defecto en este caso vuelve a ser la falta de penetración, se pueden observar en el cordón partes sin fundir y cráteres, defectos que también quedan reflejados en el análisis espectral con la aparición de diversas perturbaciones a lo largo de la gráfica resultante.

4.9 Novena muestra: Defecto de Falta de Penetración

Esta soldadura se vuelve a desarrollar sobre Inconel. Los parámetros utilizados en la soldadura son un arco de 60A a una velocidad de 250mm/min, aunque en este caso no se ha utilizado material de aporte en la soldadura.

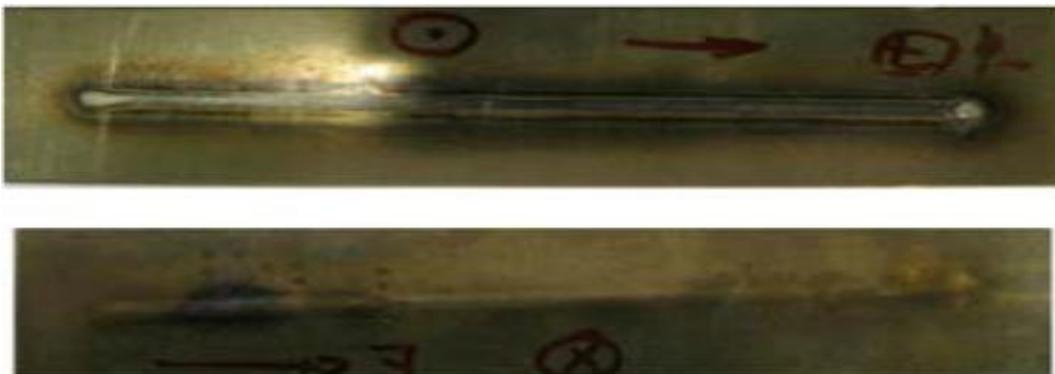


Figura 4.25 - Vista superior e inferior del cordón.

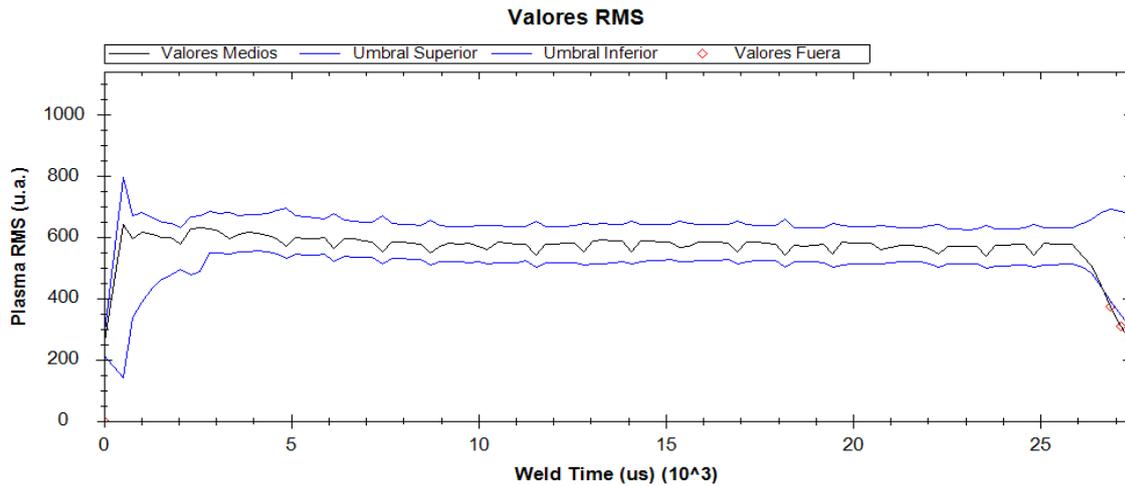


Figura 4.26 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

Se puede apreciar claramente la falta de penetración de la soldadura. En el análisis espectral se observa que la evolución de los valores RMS a lo largo del espectro son estables aunque son bastante menores de los obtenidos para cordones aceptables. Como el software presente contempla únicamente los cambios bruscos en la evolución del espectro, no sería capaz de detectar este tipo de fallos, para lo que sería útil otra herramienta que calculara el valor medio de todos los cordones y lo comparara con el valor medio de cada soldadura.

4.10 Décima muestra: Cordón Correcto

La próxima soldadura se realizará sobre Titanio en lugar de sobre Inconel. Los parámetros utilizados son 95A de corriente para el arco de soldadura y una velocidad de 60mm/min.

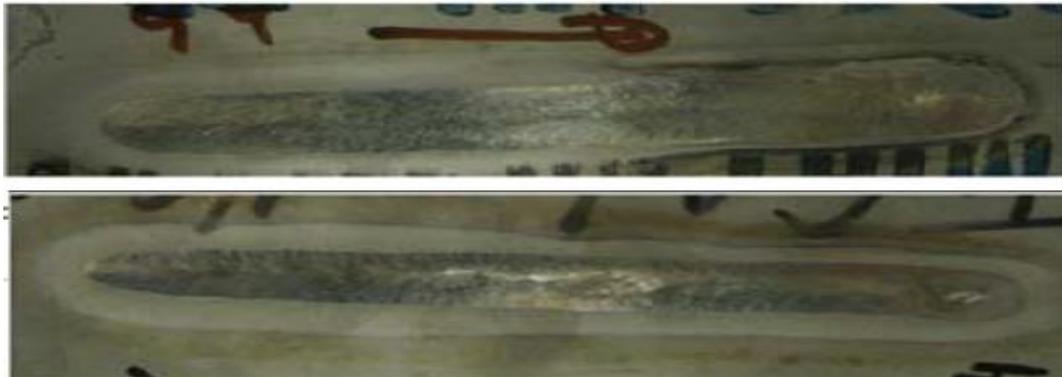


Figura 4.27 - Vista superior e inferior del cordón.

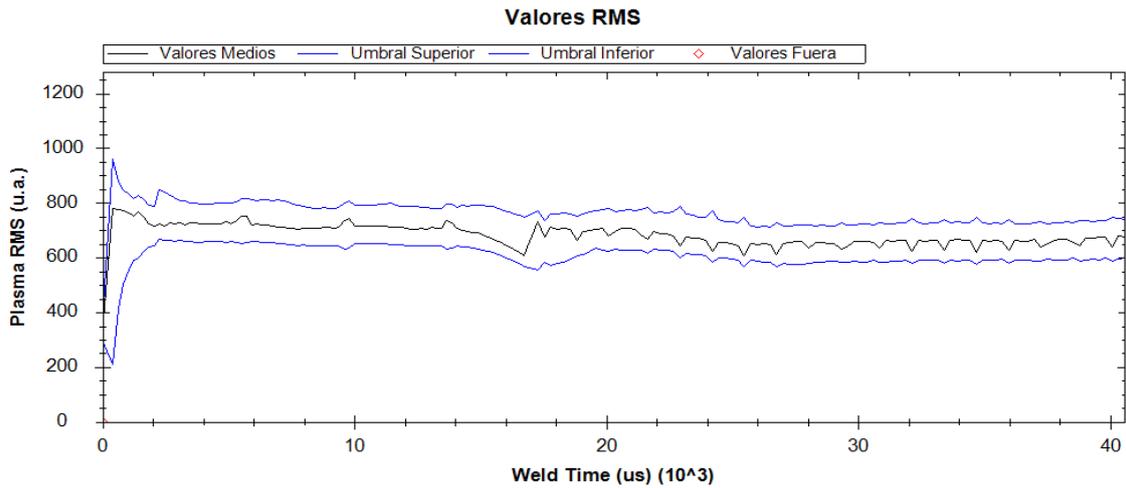


Figura 4.28 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

A la vista de los resultados es posible catalogar esta soldadura como correcta, ya que a simple vista no se aprecia ningún defecto y analizando el espectro tampoco se aprecia ninguna variación notable en los valores RMS.

4.11 Undécima muestra: Defecto de Falta de Penetración

Esta soldadura se ha realizado sobre Titanio con un arco de soldadura de 45A de corriente y a una velocidad de 60mm/min.

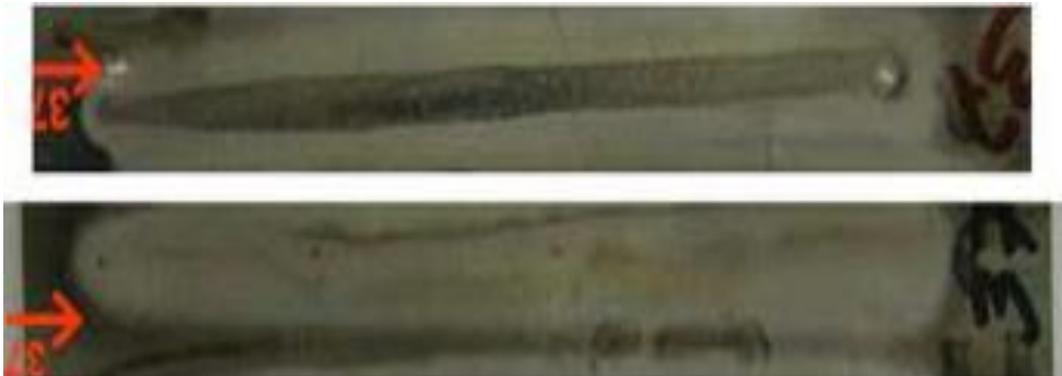


Figura 4.29 - Vista superior e inferior del cordón.

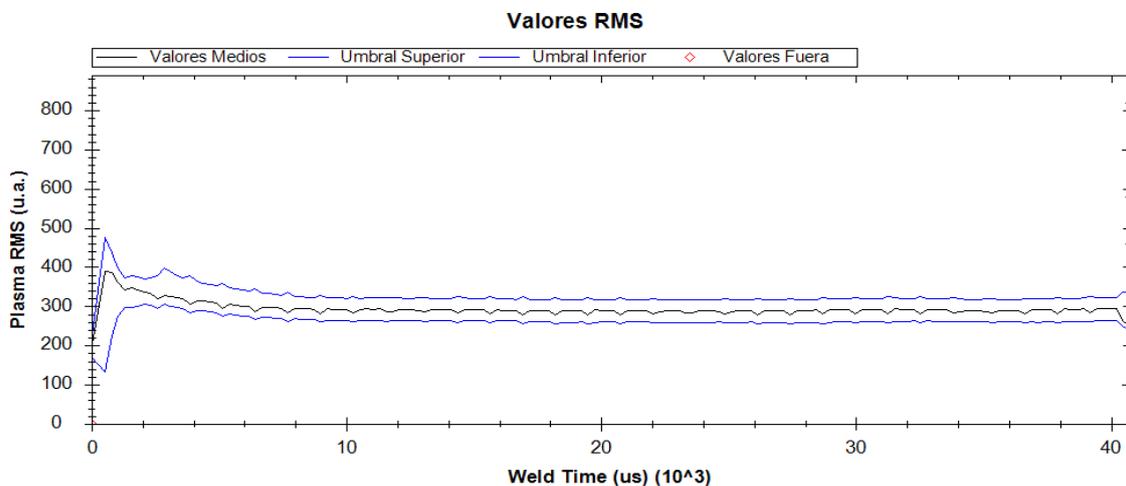


Figura 4.30 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

En esta soldadura se puede apreciar claramente la falta de penetración en el metal. En el análisis espectral se vuelve a observar, al igual que en el caso anterior, que la evolución de los valores RMS a lo largo del espectro son estables pero menores de los obtenidos para cordones aceptables por lo que esta soldadura no es posible calificarla como aceptable aunque el software no sería capaz de detectarla automáticamente y necesitaría un análisis más minucioso.

4.12 Duodécima muestra: Defecto de Suciedad

La presente soldadura se realizará sobre Titanio. Los parámetros utilizados son 95A de corriente para el arco de soldadura y una velocidad del proceso de 60mm/min.

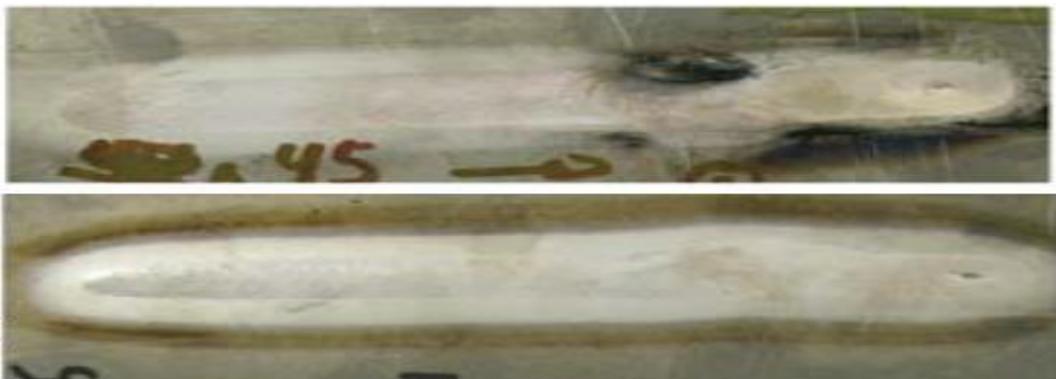


Figura 4.31 - Vista superior e inferior del cordón.

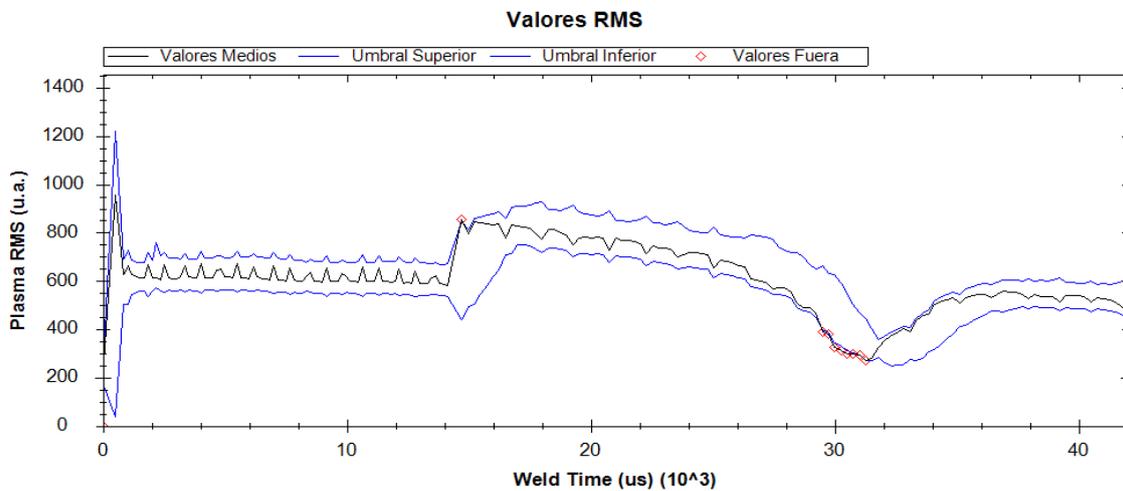


Figura 4.32 - Evolución de los valores RMS tomados con el espectrómetro USB2000.

Como se puede notar a simple vista la suciedad ha afectado al proceso y ha provocado un claro defecto. Si se observa la evolución del espectro en la gráfica se puede apreciar un salto inicial (a los 15 segundos): éste es debido a que en ese punto es donde comienza la suciedad, pero el arco la va desplazando hasta que esto desemboca en un “chispazo”, que es lo que queda marcado en la chapa y reflejado en la evolución del espectro de soldadura.

Tercer análisis

A continuación se procederá a analizar varias soldaduras de manera consecutiva.

Para detectar si una muestra es defectuosa el software generará para cada muestra un umbral superior y otro inferior y calcula los puntos que se salen de esos umbrales. Para ello se necesitan conocer los parámetros con los que calcular estos umbrales, inicialmente la aplicación propone unos parámetros de “*window*”, “*holgura*” y “*permissividad*”, pero estos parámetros deben ser calibrados en función de cada usuario y el uso que se les vaya a dar a las soldaduras que se desea analizar.

La forma correcta de calibrar estos parámetros es utilizando una muestra correcta y ajustar los umbrales a su perfil de la forma deseada, dando mayor o menor margen de error en función de las necesidades de cada usuario.

Así modificar el parámetro “*permissividad*” de 1,1 a 1,5 puede cambiar el que una muestra sea claramente defectuosa a que no se detecte ningún defecto.

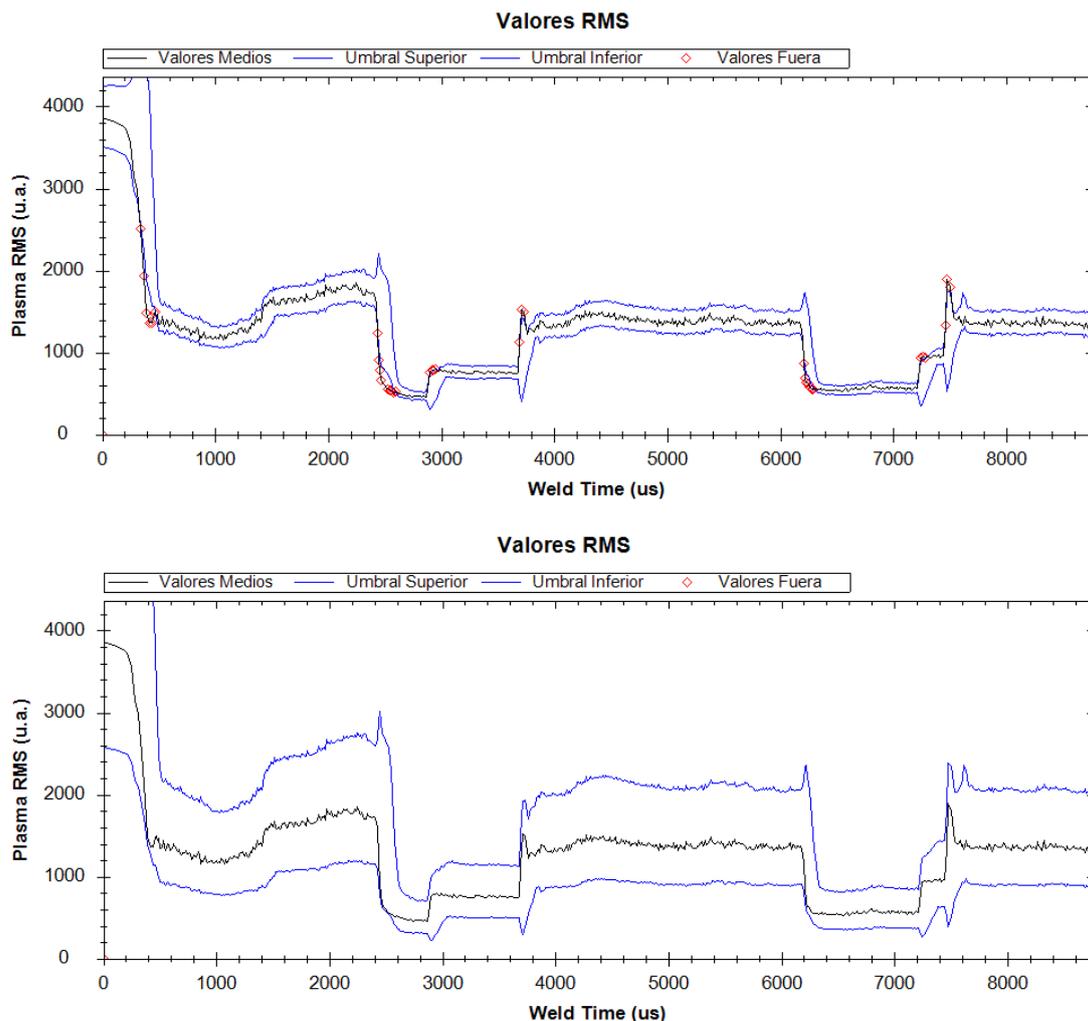


Figura 4.33 – Evolución de los valores RMS de la misma muestra con dos parámetros de holgura diferentes.

Una vez ajustados los parámetros de los umbrales se puede proceder a analizar todo el conjunto de muestras que se hayan tomado en condiciones similares y detectar de este modo las muestras defectuosas.

Para el siguiente análisis se han utilizado las muestras tomadas en el laboratorio y se han calibrado los parámetros de la siguiente manera:

Parámetro	Valor
Window	10
Holgura	2
Permisividad	1,1
Muestras consecutivas admisibles	5
Exclusión inicial	5
Exclusión final	10



Figura 4.34 – Detalle de la modificación de parámetros.

Como se observa, con sólo cambiar el parámetro “*holgura*” del 1,1 inicial al 1,3, cambia bruscamente el resultado, el programa pasa de detectar únicamente 3 muestras sin defectos a tener 15 muestras sin error.

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Durante el presente trabajo se ha llevado a cabo la realización de un programa capaz de procesar de manera eficiente varias muestras de soldadura a la vez a partir de unos parámetros ajustables por el usuario. Para determinar las muestras defectuosas la aplicación efectúa a cada muestra 3 métodos de análisis distintos, a los cuales se les aplica un algoritmo basado en la desviación típica de las muestras para detectar si existe algún defecto en la soldadura y el punto en el que éste se produce.

La aplicación también permite un análisis más individualizado de cada muestra, en el caso de que sea necesario, para poder observar en un gráfico la evolución de la soldadura a través del tiempo y así analizar mejor la muestra defectuosa.

Para la implementación de este programa se ha utilizado el lenguaje de programación C#, un lenguaje orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET, de modo que funciona en cualquier equipo con Microsoft Windows instalado.

En la parte experimental, correspondiente al Capítulo 4, se ha puesto a prueba el correcto funcionamiento del programa con muestras de tres espectrómetros distintos, demostrando así que el programa puede analizar muestras independientemente del espacio espectral que abarquen o de los píxeles que tengan.

5.2 Líneas futuras

El análisis de las soldaduras durante el proceso de fabricación repercutirá directamente en la mejora en la calidad y la fiabilidad del cordón de soldadura de modo que ayudara a superar el problema de imagen de que la unión soldada es el eslabón más débil de cualquier estructura. A través de la monitorización de la soldadura, se podrá crear un proceso de selección automática de los productos defectuosos pudiendo asegurar el entorno de calidad necesario. Este proyecto nos deja abiertas algunas líneas futuras como pueden ser las siguientes:

- ✓ **Falta de penetración.** Algunos defectos, como la falta de penetración continuada a lo largo de todo el proceso, no implican un cambio brusco en los perfiles, por lo tanto el programa es incapaz de detectarlos. Una posible modificación del software para que fuera capaz de detectar estos defectos consistiría en incluir al programa un algoritmo que calculara el valor medio para cada uno de los cordones soldados en condiciones similares, de modo que considerara un defecto cuando el valor medio de uno de los cordones cayera de forma considerable con respecto a los demás.

- ✓ **Mantenimiento de piezas usadas.** Aunque la industria del consumo obliga a orientarse principalmente en la producción de productos nuevos, la espectroscopía óptica de plasmas puede tener también una gran importancia en lo que es el mantenimiento de la soldadura de piezas ya usadas, para analizar y restaurar piezas defectuosas y así extender la vida del producto.
- ✓ **Estética del producto.** Como parte de la calidad del producto final, el cliente está insistiendo cada vez más en la calidad estética de la soldadura en productos donde la soldadura vaya a ser visible. Es complicado asegurar que el cordón de soldadura de materiales distintos tales como el acero y aleaciones de níquel sea estéticamente aceptable. Se podría modificar un poco este mismo algoritmo para que analice el relieve del cordón de soldadura o el contraste de color entre la soldadura y el resto de la pieza de modo que la aplicación descarte las piezas estéticamente no aceptables.
- ✓ **Deterioro de la pieza.** La industria de la soldadura necesita poder predecir y cuantificar la distorsión y deterioro de los materiales debido a la soldadura, con métodos similares a los que se utilizan para el análisis del cordón de soldadura, prácticamente no sería necesario modificar el algoritmo actual para que sea capaz de cuantificar este deterioro del resto de la pieza que tiene debido principalmente a las altas temperaturas a las que se exponen durante el proceso de soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Mirapeix, A. Cobo, S. Fernandez, R. Cardoso, J.M. Lopez-Higuera. "Spectroscopic analysis of the plasma continuum radiation for on-line arc-welding defect detection." *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 135202.
- [2] J. Mirapeix, A. Cobo, J. Fuentes, M. Davila, J. M. Etayo, J.M. Lopez-Higuera. "Use of the Plasma Spectrum RMS Signal for Arc-Welding Diagnostics." *Sensors* 2009, 9, 5263-5276; doi:10.3390/s90705263.
- [3] David Rojo Olalla. "Desarrollo de un sistema de bajo coste para la detección automática de defectos de soldadura mediante espectroscopía óptica de plasmas." Proyecto de Fin de Carrera. 2011.
- [4] <http://sourceforge.net/projects/zedgraph/>
- [5] American Welding Society <http://www.aws.org/w/a/>
- [6] T. Siewert, I. Samardzic, S. Klaric. "Application of an on-line weld monitoring system." *Advanced Technologies for Developing Countries.* 2002.
- [7] J. Shao, Y. Yan. "Review of techniques for On-line Monitoring and Inspection of Laser Welding." *Journal of Physics: Conference Series* 15. 2005.
- [8] J. Mirapeix, R. Ruiz-Lombera, J.J. Valdiande, L. Rodriguez-Cobo, F. Anabitarte, A. Cobo. "Defect detection with CCD-spectrometer and photodiode-based arc-welding monitoring systems." *Journal of Materials Processing Technology* 211. 2011.
- [9] Idurre Sáez de Ocáriz, Fernando Alonso, Borja Gambín. "Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aeroespaciales." Centro de Tecnologías Aeronáuticas.
- [10] David Ibáñez Cervera. "Monitorización de proceso de soldadura mediante visión artificial y fuentes de iluminación láser y LED". Proyecto de Fin de Carrera. 2012.
- [11] J. Mirapeix, A. Cobo, D. A. González, J. M. López-Higuera. "Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis for arc-welding quality assurance." *Optics Express* 1885, Vol. 15, No. 4.

