

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Carrera***

**Estudio de viabilidad de la monitorización  
acústica y mecánica de procesos de  
soldadura**

**(Viability analysis of the acoustic and  
mechanical monitoring of welding processes)**

Para acceder al Título de

**INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN**

**Autor: Alfonso Nicolás González Rodríguez**

**Octubre - 2013**

# INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

## CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

**Realizado por: Alfonso Nicolás González Rodríguez**

**Director del PFC: Jesús M<sup>a</sup> Mirapeix Serrano**

**Título:** “Estudio de viabilidad de la monitorización acústica y mecánica de procesos de soldadura”

**Title:** “Viability analysis of the acoustic and mechanical 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): Quintela Incera, Antonio

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús M<sup>a</sup>

Vocal (Apellidos, Nombre): Solana Quirós, José Manuel

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)

Se hace constar que este trabajo ha sido en parte realizado con medios aportados a través de los proyectos CICYT-TEC2010-20224-C02-02 y DA2TOI (Proyecto FIS2010-19860)



## Agradecimientos

Tengo tanto que agradecer a tanta gente y soy tan poco diestro en la prosa que seguramente no pueda reflejar más que una pequeña parte de mis pensamientos en esta hoja, aún así lo intentaré...

En primer lugar quisiera agradecer y atribuir el mérito de este proyecto al Grupo de Ingeniería Fotónica cuyo trabajo ha sido la base del mismo. En especial a Jesús por su paciencia y dedicación, uno de esos pocos profesores que saben transmitir al alumno la pasión por su trabajo, también a José, Rubén y Antonio que me han ofrecido su ayuda siempre que lo he necesitado.

A mi familia que no mencionare individualmente ya que por suerte es muy numerosa a la vez que importante en mi vida, pero sobre todo agradecido a mis padres Rosario y Alfonso, por haberme apoyado siempre y nunca dejar que me rindiera, sin ellos nunca habría podido llegar hasta aquí.

A mis compañeros de la universidad: Elisa, Erika, Marta, Laro, Gusi, Rodri... y muchos más, pero especialmente a David cuya ayuda ha sido incalculable y que además se ha convertido en uno de mis mejores amigos.

A mis amigos por esos ratos de esparcimiento y diversión, por las risas, las olas, y muchas cosas más, vosotros sabéis lo importantes que sois.

Por último pero en absoluto menos importante a Cris quien por méritos propios se ha convertido en uno de los pilares de mi vida, por todo lo que me ha enseñado, y todo lo que hemos aprendido juntos, por su comprensión y apoyo incondicional...

GRACIAS!



---

<b>0. Objetivos y Contexto</b> .....	8
<b>1. Introducción</b> .....	10
1.1.Historia .....	12
1.2. Tipos .....	13
1.3. Evaluación de la calidad en procesos de soldadura .....	19
1.3.1. Métodos de prueba no destructivos .....	19
1.3.2. Ensayos destructivos .....	20
1.4. Parámetros de entrada .....	22
1.5. Estado del arte .....	23
1.5.1. Sensores eléctricos:.....	23
1.5.2. Vision artificial .....	23
1.5.3. Termografía Infrarroja.....	24
1.5.4. Sensado acústico .....	24
1.5.5. Sistemas ópticos.....	25
1.5.5.1. Espectrómetros .....	25
1.5.5.1. Fotodiodos .....	26
1.6. Detalle del estado del arte en monitorización óptica a través de FBGs .....	28
<b>2. Estudio Teórico-Experimental</b> .....	29
2.1. Sensado acústico .....	30
2.2. Teoría redes de difracción.....	33
2.3. Sensado con FBGs .....	35
2.4. Sensores FBG para la monitorización <i>online</i> del proceso de soldadura .....	37
2.4.1. Objetivos y resultados obtenidos.....	43
<b>3. Experimentos en laboratorio</b> .....	44
3.1. Set up de soldadura.....	45
3.2. Set up para las mediciones.....	47
3.3. Resultados .....	49
3.3.1FBGs pegado .....	50
3.3.2 Modo vela.....	53
3.3.3. Procesado de la señal.....	61
<b>4. Conclusiones y líneas futuras</b> .....	65
<b>Anexo</b> .....	68

---

Bibliografía: ..... 74

## 0. Objetivos y Contexto

El presente trabajo corresponde a la línea de investigación dedicada al estudio de sistemas capaces de monitorizar en línea del proceso de soldadura.

Uno de los procesos más utilizados en la industria de la construcción metálica es la soldadura por arco con protección gaseosa, aplicada a diferentes sectores como el aeronáutico, automovilístico, naval o nuclear, sectores en los que la calidad de la soldadura resultante tiene una gran relevancia, ya que si por ejemplo se realiza una soldadura con imperfecciones en alguna parte de un avión, esto podría producir una rotura en vuelo, de lo que tendría unos efectos catastróficos. Debido a esto el control o monitorización de la calidad está cobrando cada vez más importancia, especialmente en los sectores con mayor exigencia a nivel de calidad.

Para poder garantizar la seguridad durante la utilización de estos materiales se dedica mucho tiempo y dinero en pruebas iniciales mediante bancos de pruebas y ensayos no destructivos, realizados a posteriori una vez fabricada la pieza, lo que implica un notable impacto en la productividad. Por todo esto, la calidad de la soldadura y su seguimiento y control en tiempo real se han convertido actualmente en una activa línea de investigación.

Este proyecto se centrará en el estudio de la posibilidad de implementación de un sistema de monitorización en línea, a través de tecnologías ópticas y alternativas, que sea capaz de detectar algunos de los fallos más comunes que se pueden producir durante estos procesos [1].

## 1. Introducción

La soldadura es un proceso ampliamente utilizado en la actividad industrial con unos requerimientos de calidad elevados. Se nombraran los tipos más importantes, así como los estándares de calidad más comúnmente utilizados.

La soldadura es un proceso aplicado a casi todas las actividades industriales, además de ser una importante industria en sí misma. Gracias al gran desarrollo de esta técnica durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras como puentes, edificios o barcos. Es una técnica fundamental en la industria automotriz, en la aeroespacial, energética, y en casi cualquier tipo de producto hecho con metales.

El objeto principal de los diferentes variantes de la soldadura es la unión de dos piezas metálicas, asegurando la mejor continuidad de las piezas, que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión de energía aportada. El tipo de soldadura más adecuado para llevar a cabo este objetivo depende de las propiedades físicas de los metales a unir, y la aplicación a la que esté destinada la pieza.

Existen diferentes procesos de soldadura, en los que difiere la forma de aportar energía a la unión. Así hay métodos en los que se calientan las piezas de metal hasta que se funden y se unen entre sí, o que se calientan a una temperatura inferior al punto de fusión y se unen o ligan con un metal fundido como relleno. Otra forma es calentarlas lo suficiente hasta poder unir las por martilleo.

## 1.1.Historia

La historia de la unión de metales se remonta a miles de años, ya en la edad de bronce y de hierro se realizaba en lo que hoy es Europa y Oriente medio. El método utilizado para esta unión de dos piezas, llamado soldadura por fragua, consistía en calentarlas hasta que estuvieran blandas y flexibles, para después golpearlas con un martillo hasta unir las, dejarlas enfriar y endurecer. Este método fue prácticamente el único utilizado hasta el siglo XIX, cuando se produjo un gran salto tecnológico con el descubrimiento del arco eléctrico. Aunque la aplicación de esta tecnología en su comienzo fue defectuosa, por el uso de varillas sin ningún recubrimiento como electrodos, lo que producía un arco muy inestable, cordones amorfos, excesivas salpicaduras y una alta fragilidad el metal de soldadura debido a la contaminación del arco.

En 1904 se experimenta con la soldadura eléctrica con el fin de mejorar la calidad en la construcción naval, de donde resulta la aparición del primer electrodo revestido cuya función era facilitar la apertura del arco, aumentar su estabilidad, y excluir el oxígeno en el metal de soldadura para mejorar sus propiedades metálicas.

Durante los años 1920, importantes avances fueron hechos en la tecnología de la soldadura, incluyendo la introducción de la soldadura automática. El gas de protección se convirtió en un tema de gran importancia para científicos que buscaban proteger la soldadura de los efectos del oxígeno y el nitrógeno en la atmósfera. Las soluciones desarrolladas incluyeron el uso del hidrógeno, argón y helio como atmósferas de soldadura.

A mediados del siglo XX fueron inventados muchos métodos nuevos de soldadura. Después de décadas de desarrollo, la soldadura con arco de tungsteno y gas de protección (TIG) fue finalmente perfeccionada, seguida por la soldadura por arco metálico con gas, permitiendo la soldadura rápida de materiales no ferrosos pero requiriendo costosos gases de blindaje como el helio. En 1957, apareció el proceso de soldadura por arco con núcleo fundente, resultando en velocidades de soldadura altamente incrementadas, y ese mismo año fue inventada la soldadura de arco de plasma.

Otros desarrollos recientes en la soldadura incluyen en 1958 el importante logro de la soldadura con rayo de electrones, haciendo posible la soldadura profunda y estrecha por medio de la fuente de calor concentrada. Siguiendo la invención del láser en 1960, la soldadura por rayo láser debutó varias décadas más tarde, y ha demostrado ser especialmente útil en la soldadura automatizada de alta velocidad. Sin embargo, ambos procesos continúan siendo altamente costosos debido al alto costo del equipo necesario, y esto ha limitado sus aplicaciones.

## 1.2. Tipos

Existen cerca de cuarenta sistemas de soldar, pero el más importante para las estructuras metálicas es el sistema de soldadura por fusión. En las soldaduras por fusión el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y al solidificar se produce la unión.

Encontramos diferentes tipos de soldadura pero los más utilizados son: Soldadura laser, soldadura por haz de electrones, soldadura por fricción y soldadura por arco eléctrico.

### **-Soldadura por haz de electrones:**

Es un proceso de soldadura por fusión, al cual se le aporta la energía calórica mediante una corriente de electrones de alta energía que se enfoca contra la superficie de trabajo. Esta energía se consigue mediante la aceleración de electrones, operando a alto voltaje y baja corriente. La energía generada no es excepcionalmente alta, pero si su densidad, con lo que se consigue un aporte de energía realmente importante concentrando el haz de electrones en un área muy pequeño de la superficie a soldar.

### **-Soldadura por fricción:**

Este es un método de soldadura muy conveniente para procesos de producción automatizados. Se consigue la unión de los materiales mediante la combinación de fricción y presión. La fricción consiste en el frotamiento de los dos materiales mediante la rotación de las piezas, con lo que se consigue elevar la temperatura en las dos zonas a unir hasta un rango de temperaturas altas para los metales involucrados. Una vez en este punto se aproximan ambas piezas y se las somete a una determinada presión con lo que se consigue la unión metalúrgica. Normalmente no es necesario ningún tipo de aporte de material externo, así como tampoco un gas de protección.



Ilustración 1 Ejemplo de proceso para soldadura por fricción

### **-Soldadura láser:**

La soldadura laser se aprovecha de la energía aportada por un haz luminoso coherente altamente concentrado en una pequeña superficie y que se enfoca en la unión de los metales que se van a soldar. Normalmente se utiliza gases de protección con el fin de evitar la oxidación, y por lo regular no se agrega material de aporte.

Gracias a su gran concentración en una pequeña área se consiguen soldaduras de gran calidad, con una profunda penetración y estrecha zona afectada por el calor.

### **-Soldadura por arco eléctrico:**

La soldadura por arco se basa en que si ha dos conductores en contacto se les somete a una diferencia de potencia, establecemos entre ambos una corriente. Si posteriormente se los separa, provocamos una chispa, cuyo efecto es ionizar el aire o el gas que la rodea, permitiendo así el paso de corriente, a pesar de no estar los conductores en contacto, creando un arco eléctrico entre ellos donde se transforma la energía eléctrica en energía luminosa y calorífica.

El calor provocado por el arco además de ser intenso está muy localizado, lo cual resulta idóneo para la operación de soldar. Las temperaturas alcanzadas son del orden de los 3500°C.

En el circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o separan variara la resistencia y la corriente y, por lo tanto, la energía transformada en calor, con lo que la soldadura no será uniforme. Desde el punto de vista práctico esto quiere decir que para obtener soldaduras uniformes es imprescindible mantener constante la separación de los electrodos durante el proceso de soldeo.

Distinguimos distintos procesos basados en el principio de arco eléctrico:

### 1-Soldadura por arco manual con electrodos revestidos SMAW:

El fundamento de la soldadura por arco eléctrico es la diferencia de potencial que se establece entre el electrodo que pende de la pinza y la pieza a soldar o metal base que se conecta a masa.

Esta diferencia de potencial ioniza la atmósfera circundante, por lo que el aire pasa a ser conductor, cerrándose el circuito y estableciéndose un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza a soldar. El calor del arco eléctrico va a fundir el extremo del electrodo y parcialmente el metal base, creando el baño de fusión, donde se irá depositando el electrodo fundido originando así el cordón de soldadura.

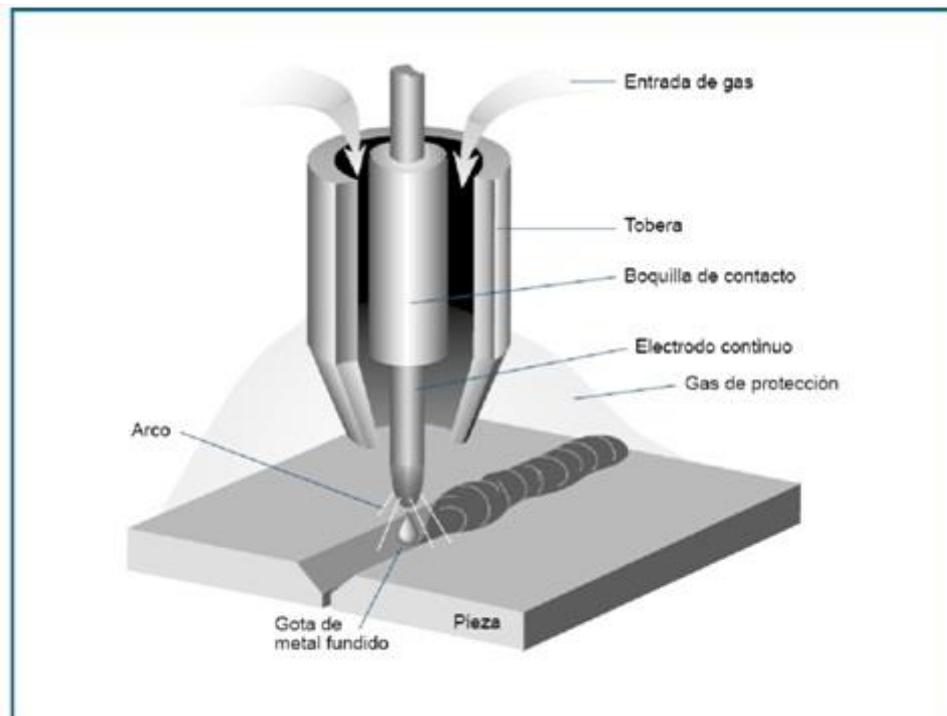


Ilustración 2 Configuración de la maquinaria para soldadura SMAW

El factor principal que hace de este método tan útil es su simplicidad, y por tanto, su bajo coste, lo único que necesita el soldador es una fuente de alimentación, cables un portaelectrodo y electrodos, no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección, lo que le hace idóneo para trabajos sencillos de reparación, fabricación y construcción.

## 2-Soldadura por electrodo consumible protegido MIG/MAG:

Mediante la soldadura MIG/MAG se establece un arco eléctrico entre el electrodo, que tiene forma de hilo continuo, y la pieza a soldar. En esta ocasión la protección tanto del arco como del baño de soldadura se lleva a cabo mediante un gas, que puede ser activo (MAG) o inerte (MIG).

La soldadura MIG-MAG tiene ventajas respecto al procedimiento de electrodo revestido. Entre ellas cabe destacar la mayor productividad que se obtiene, debido a que se eliminan los tiempos muertos empleados en reponer los electrodos consumidos. Se estima que para el procedimiento usando electrodo revestido, el hecho de desechar la última parte del electrodo antes de reponerlo por otro, más el consiguiente proceso de cebado del arco, hace que sólo el 65% del material es depositado en el baño, el resto son pérdidas. Sin embargo, el empleo de hilos continuos en forma de bobinas, tanto del tipo sólidos como tubulares, como material de aportación para el procedimiento MIG-MAG aumenta el porcentaje de eficiencia hasta el 80-90%. Además, al disminuir el número de paradas se reduce las veces del corte y posterior cebado del arco, por lo que se generan menos discontinuidades en el cordón como son los famosos "cráteres".

En este procedimiento se establece el arco eléctrico entre el electrodo consumible protegido y la pieza a soldar. La protección del proceso recae sobre un gas, que puede ser inerte, o sea que no participa en la reacción de la soldadura, dando lugar al llamado procedimiento de soldadura MIG (Metal Inert Gas); o por el contrario el gas utilizado es activo, que participa de forma activa en la soldadura, dando lugar al llamado procedimiento MAG (Metal Active Gas).

El empleo del procedimiento MIG-MAG se hace cada vez más frecuente en el sector industrial, debido a su alta productividad y facilidad de automatización. La flexibilidad es otro aspecto importante que hace que este procedimiento sea muy empleado, dado que permite soldar aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aluminio y cobre, en espesores a partir de los 0,5 mm y en todas las posiciones. La

protección por gas garantiza un cordón de soldadura continuo y uniforme, además de libre de impurezas y escorias. Además, la soldadura MIG / MAG es un método limpio y compatible con todas las medidas de protección para el medio ambiente.

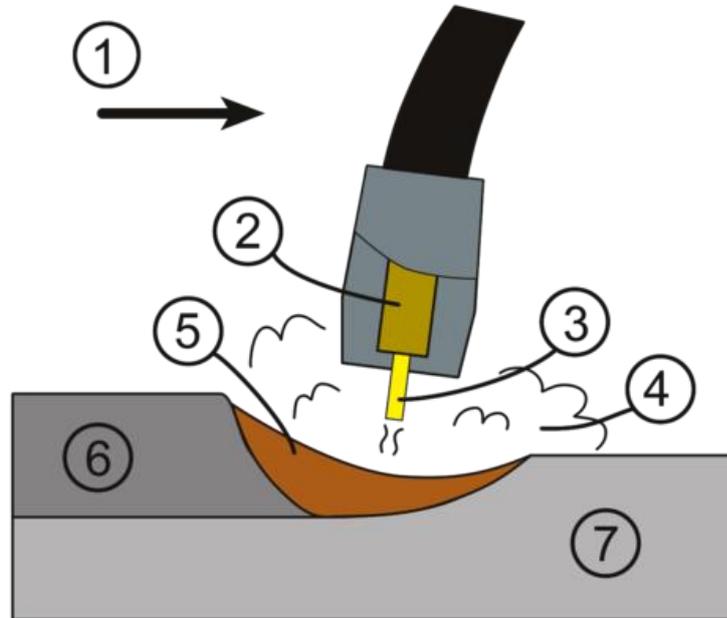


Ilustración 3 Configuración y partes de la maquinaria para soldadura MIG/MAG. 1. Dirección de la soldadura 2. Tubo de contacto 3. Hilo 4. Gas protector 5. Soldadura 6 y 7. Piezas a unir.

### 3-Soldadura por electrodo no consumible protegido TIG:

La soldadura TIG (TungstenInert Gas), también denominada soldadura por heliarco o GTAW(Gas TungstenArcWelding), es un proceso en el que se utiliza un electrodo de tungsteno no consumible, el cual genera calor al establecer un arco eléctrico entre el electrodo y el metal base a soldar. El electrodo, el arco y el área que rodea al baño de fusión, están protegidos por una atmosfera de gas inerte, cuyo objetivo es desplazar el aire para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presente en la atmosfera, lo cual evita la formación de escoria o el uso de fundentes o “Flux” protectores.

La soldadura TIG proporciona una soldadura excepcionalmente limpia y de gran calidad, ya que no produce escoria. De este modo, se elimina la posibilidad de inclusiones en el metal depositado y no necesita limpieza final.

Este proceso puede ser utilizado para soldar casi todo tipo de metales. Principalmente es utilizada en la unión de juntas de alta calidad en centrales nucleares, químicas, construcción aeronáutica e industrias de automoción, donde lo más importante es una buena calidad de soldadura. Las principales ventajas de la utilización de este método son:

-No se requiere de fundente y no hay necesidad de limpieza posterior en la soldadura.

-No hay salpicadura, chispas ni emanaciones, al no circular metal de aporte a través del arco.

-Brinda soldaduras de alta calidad en todas las posiciones, sin distorsión.

-Al igual que todos los sistemas de soldadura con protección gaseosa, el área de soldadura es claramente visible.

-El sistema puede ser automatizado, controlando mecánicamente la pistola y/o el metal de aporte.

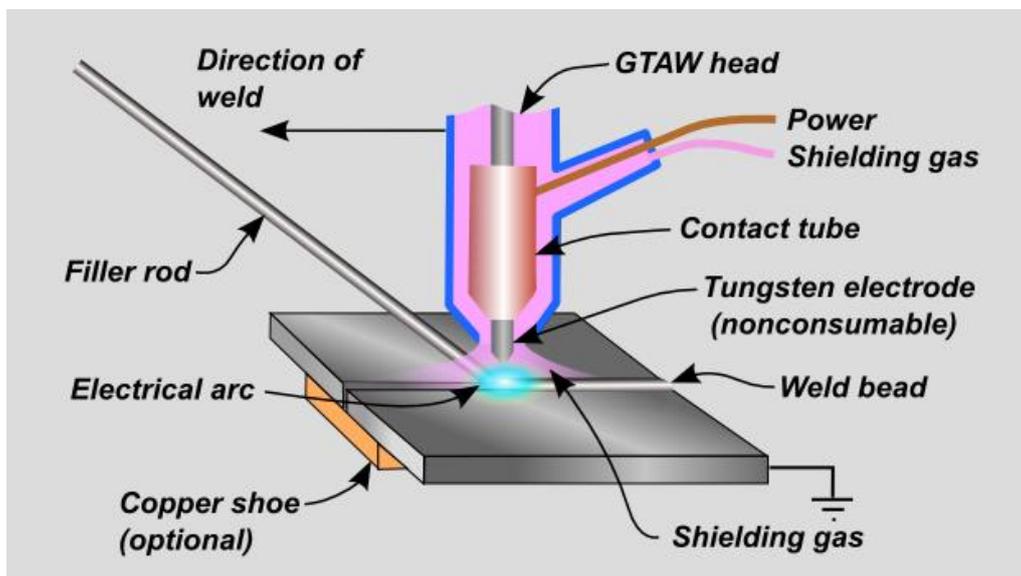


Ilustración 4 Configuración y partes de la maquinaria para soldadura TIG

### 1.3. Evaluación de la calidad en procesos de soldadura

Muchas características de una unión soldada pueden ser evaluadas en el proceso de inspección, algunas relacionadas con las dimensiones, y otras relativas a la presencia de discontinuidades. El tamaño de una soldadura es muy importante, ya que se relaciona directamente con la resistencia mecánica de la unión. Tamaños de soldaduras inferiores a los requeridos no podrán resistir las cargas aplicadas durante su servicio.

Otro factor importante serán las discontinuidades en el cordón. Estas imperfecciones pueden causar una disminución en la resistencia de la pieza, pudiendo llegar a originar una rotura al aplicar sobre ella la fuerza mecánica para la que fue diseñada.

Con el fin de comprobar si se han producido discontinuidades durante el proceso de soldadura existen diferentes métodos de prueba a posteriori, que se podrían dividir en dos clases, métodos de prueba destructivos y no destructivos:

#### 1.3.1. Métodos de prueba no destructivos

Se denominan métodos de prueba o ensayos no destructivos a aquellas pruebas practicadas sobre la pieza final, mediante las cuales se comprueban sus propiedades físicas sin realizar ningún cambio sobre ellas, pudiendo de esta forma utilizar la pieza para el fin al que está destinada.

**Inspección Visual (VT)**, Es sin duda una de las Pruebas No Destructivas (PND) más ampliamente utilizada, gracias a ella, es posible obtener información inmediata de la condición superficial de los materiales que estén siendo inspeccionados.

**Líquidos Penetrantes (PT)** El método o prueba de líquidos penetrantes (PT), basado en el principio físico conocido como "Capilaridad", consiste en la aplicación de un líquido con buenas características de penetración, a continuación se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado, revelando las aberturas superficiales.

**Partículas Magnéticas (MT)** Este método de Prueba No Destructiva, se basa en el principio físico conocido como Magnetismo, el cual exhiben principalmente los materiales ferrosos como el acero y consiste en la capacidad de atracción entre metales.

De acuerdo con lo anterior, si un material presenta alguna discontinuidad en su superficie, ésta actuará formando polos magnéticos, atrayendo cualquier material magnético o ferromagnético que esté cercano a la misma. Son utilizados pequeños trozos o diminutas Partículas Magnéticas, las cuales revelarán la presencia de discontinuidades superficiales y/o sub-superficiales en el metal.

**Prueba de Ultrasonido (UT)** El método de Ultrasonido se basa en la generación o propagación de ondas sonoras a través del material. Un sensor, que contiene un elemento piezo-eléctrico, convierte los pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, con una frecuencia imperceptible al oído humano. Estas vibraciones se propagan a través del material, y cuando su camino es interrumpido por una interfase, sufren reflexión, refracción ó distorsión. Dicha interrupción se traduce en un cambio de corriente, dirección y ángulo de propagación, cambio que es detectado y registrado a través de una pantalla o monitor especialmente diseñado para tal finalidad.

**Prueba Radiográfica (RT)** La radiografía como método de prueba no destructivo, se basa en la capacidad de penetración que caracteriza a los Rayos X y a los Rayos Gama. Con este tipo de emisiones es posible irradiar un material y, si internamente este material presenta cambios considerables como para dejar pasar o retener dicha radiación, entonces es posible determinar la presencia de estas irregularidades, simplemente midiendo o caracterizando la radiación incidente contra la radiación retenida o liberada por el material. Comúnmente, una forma de determinar la radiación que pasa a través de un material, consiste en colocar una película radiográfica, cuya función es cambiar de tonalidad en el área que recibe radiación. El resultado queda plasmado en la película radiográfica situada en la parte inferior del material metálico.

### 1.3.2. Ensayos destructivos

Para estos ensayos, se requiere que la pieza o partes a evaluar, sean destruidas o desincorporadas, con la finalidad de medir o determinar ciertas propiedades mecánicas. Estas evaluaciones se realizan a probetas obtenidas de la pieza original. Estos ensayos son exigidos por la norma cuando se desea certificar un procedimiento de soldadura o calificar la soldadura. Entre estos ensayos tenemos.

**Ensayo de dureza**, este ensayo permite medir la resistencia que el material presenta a ser penetrado por un indentador. Con este ensayo se logra medir la resistencia de los cordones de soldadura y poder determinar la existencia de heterogeneidades a lo largo de la misma. Este se realiza de forma transversal al cordón de soldadura.

**Ensayo de tenacidad de impacto**, este ensayo permite conocer la resistencia de un material al ser impactado por una carga y esta medida se da por la energía absorbida después de fallar. Se realiza a diferentes valores de temperatura para conocer el comportamiento dúctil-frágil de la pieza, la cual se denomina temperatura de transición. También se puede realizar a temperatura constante para determinar que tanta energía puede absorber el material soldado comparado con el material sin soldar.

## 1.4. Parámetros de entrada

Llamamos parámetros de entrada a las variables de soldadura que son los factores que pueden ser controlados para conseguir una buena calidad del resultado final. Es necesario conocer el efecto de cada variable sobre diversas características o propiedades del proceso de soldadura. Algunas pueden ser continuamente reguladas o fácilmente medidas, y constituyen controles mejores que aquéllas que no pueden ser medidas o sólo pueden ser modificadas indirectamente.

Para iniciar el proceso es necesario definir previamente algunas de estas variables como por ejemplo: diámetro del alambre-electrodo, composición química del mismo, tipo de gas, y su caudal. Los criterios en los que no debemos fijar para una adecuada selección de estos parámetros son: tipo de material a ser soldado, su espesor, régimen de transferencia metálica deseada y propiedades mecánicas necesarias.

En un segundo nivel se encuentran las variables primarias que una vez se han fijado los parámetros anteriormente descritos controlarán las dimensiones del cordón, la estabilidad del arco, y la calidad de soldadura. Estas variables son: tensión de arco, corriente de soldadura y velocidad de avance.

Las variables secundarias pueden ser modificadas también de manera continua, son a veces difíciles de medir con precisión, y no afectan directamente a la forma del cordón, pero actúan sobre las variables primarias que a su vez influyen en el mismo. Estas son: altura y ángulo de la boquilla, velocidad de alimentación del alambre. La altura de la boquilla influye en la penetración; aumentando la altura, aumenta también el calentamiento de la zona de fusión, así la fuente de energía no necesita alimentar tanta corriente para fundir el alambre en un régimen de alimentación específico, debido a la característica autorreguladora de la fuente de tensión constante. Esto resulta en una disminución de la penetración, de manera que cuando la altura disminuya, la penetración aumenta y viceversa.

## 1.5. Estado del arte

Debido a la importancia industrial y económica de conseguir un proceso de soldadura eficiente, se ha trabajado extensamente en el campo de investigación de sistemas de monitorización por medio de distintos tipos de sensores. Se podrían listar muchos más sistemas sensor, pero siguiendo la línea del presente proyecto, se destacarán los sistemas más comúnmente extendidos de monitoreo en tiempo real, entre los que se destacan:

### 1.5.1. Sensores eléctricos:

Son capaces de aportar información relevante a cerca del proceso de soldadura, con la que es posible la detección de defectos relativamente básicos. Con ellos se puede medir la tensión en la máquina de soldadura, la corriente suministrada por el electrodo, o la impedancia entre la pieza y el electrodo. A partir de estas señales se puede obtener información sobre imperfecciones que puedan surgir durante el proceso.[2]

El inconveniente más importante que presenta la utilización de este tipo de sensores es la fuerte interferencia electromagnética que pueden recibir, generada por la propia naturaleza el proceso, en especial durante la los primeros momentos de aparición del arco eléctrico.

### 1.5.2 Vision artificial

La monitorización del proceso de soldadura mediante visión artificial es una tecnología relativamente nueva, cuyo uso se centra en el control de procesos robotizados. Básicamente consiste en la recogida de imágenes con una cámara trabajando en el espectro visible de la luz, de las cuales una vez filtradas y procesadas se obtiene información de la forma y posibles defectos que aparezcan en el cordón. Esta técnica tiene el inconveniente de estar bastante limitada en cuanto a la defectología que es capaz de detectar.[3]

### 1.5.3 Termografía Infrarroja

Esta técnica consiste en la captación de la radiación electromagnética en la banda infrarroja, con lo que se puede llegar a obtener un mapa de la temperatura de la superficie del cuerpo. En el momento que se produce una anomalía en el flujo de calor de la pieza esto puede suponer un defecto en la misma. Por esto la monitorización del proceso de soldadura mediante termografía consiste en la obtención y análisis de estos patrones térmicos.

La principal desventaja que supone esta técnica es su alto coste, y la dificultad que supone el procesado de las imágenes en tiempo real.

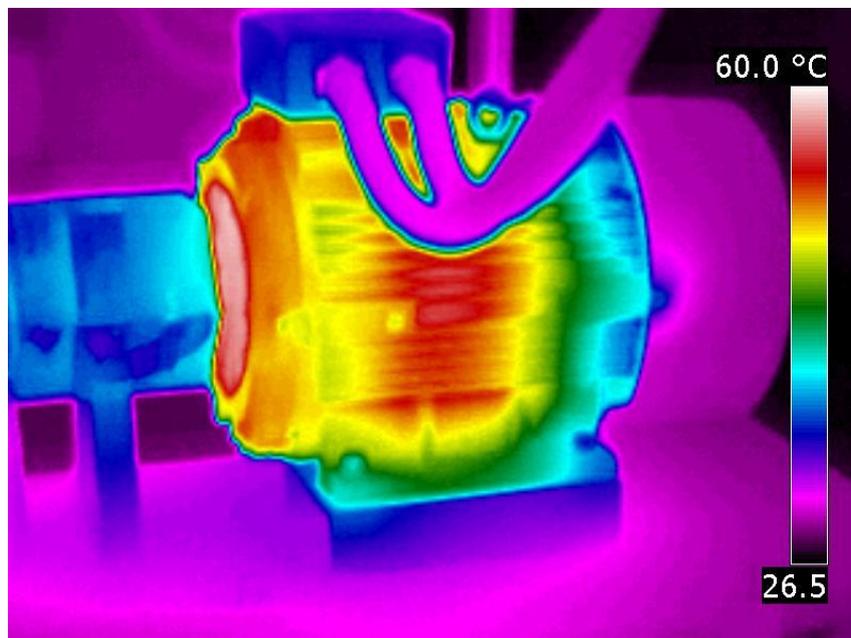


Ilustración 5 Ejemplo de utilización de termografía infrarroja en entornos industriales.

### 1.5.4 Sensado acústico

Existe la posibilidad del monitoreo del proceso mediante la captación de la onda acústica emitida debido a las fluctuaciones de alta frecuencia del plasma y del proceso de solidificación de la pieza. Usando distintos parámetros estadísticos de la señal sonora captada, se puede evaluar la estabilidad del proceso.

Su principal ventaja es la facilidad de montaje y el bajo coste que supone, ya que con un micrófono convencional y un PC para procesar la información se puede montar un sistema funcional. La desventaja reside en la complejidad para su implementación industrial, debido sobre todo al ruido ambiental que hay en estos entornos.

## 1.5.5 Sistemas ópticos

### 1.5.5.1 Espectrómetros

El espectrómetro es un instrumento que generalmente mide la intensidad de la luz respecto a las longitudes de onda dentro de la banda frecuencial en la que trabaje. Gracias a esta propiedad puede ser usado en procesos industriales en los cuales se produzca una radiación luminosa, con el fin de obtener información vital sobre el proceso en sí.

Esta radiación óptica se genera debido generalmente a un calentamiento del material hasta la incandescencia, así se produce una emisión de una luz con unas longitudes de onda muy características dependientes de la composición atómica de dicho material. De esta forma se obtienen las líneas de emisión que se pueden asemejar a la huella dactilar del material.

Mediante la medida de estas líneas de emisión y su posterior procesado se obtienen ciertos parámetros estadísticos, con los que se evalúa la estabilidad del proceso, en este caso, de la soldadura, llegando incluso a poder discriminar entre distintos tipos de defectología.

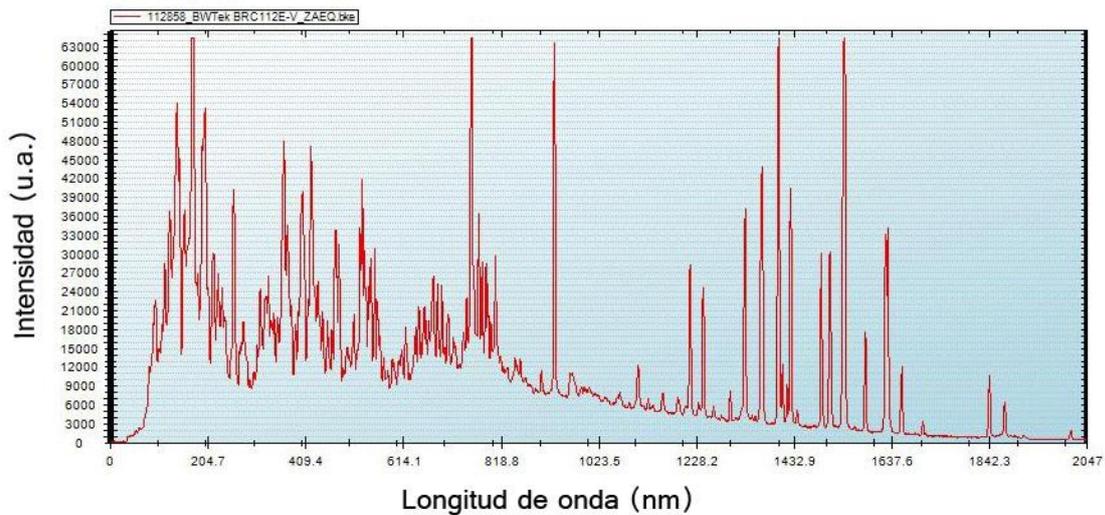


Ilustración 6 Ejemplo de datos recogidos por espectrómetro durante los experimentos para el presente proyecto

### 1.5.5.1 Fotodiodos

Los fotodiodos son semiconductores contruidos con una unión PN que se muestran sensible a la incidencia de luz, ya sea en el espectro visible o infrarrojo. Al penetrar luz o radiación infrarroja en la unión PN su energía excita a un electrón, dándole movimiento y creando a la vez un hueco con carga positiva. De esta forma se genera una corriente a través de la unión PN. Esto significa que cuanto mayor sea la luz incidente en la unión mayor será la corriente que fluyaa través del mismo.

Este fenómeno de generación de corriente se conoce como efecto fotoeléctrico interno, y para que se produzca el fotodiodo debe estar polarizado inversamente, con lo que se consigue que se genere en él cierta corriente eléctrica cuando este es excitado por una radiación óptica, el mismo principio gracias al cual trabajan las células fotovoltaicas.

Estas características pueden ser aprovechadas para utilizar el fotodiodo como un dispositivo detector de luz, con lo que sustituir a los antes mencionados espectrómetros. Por supuesto tiene sus limitaciones, ya que en un principio sólo es capaz de detectar intensidad luminosa, y por el contrario el espectrómetro posee la capacidad para discriminar las amplitudes para las diferentes longitudes de onda.



Ilustración 7 Ejemplo de fotodiodo [http://www.tme.eu/html/ES/fotodiodos-para-la-luz-visible/ramka\\_4007\\_ES\\_pelny.html](http://www.tme.eu/html/ES/fotodiodos-para-la-luz-visible/ramka_4007_ES_pelny.html)

## 1.6 Detalle del estado del arte en monitorización óptica a través de FGBs

La soldadura GMAW es una de las técnicas más extendidas y utilizadas en gran cantidad de procesos industriales, como la industria automovilística, aeroespacial o la nuclear. Así, se han realizado diversos estudios con el fin de conseguir mejorar la calidad y productividad de este proceso mediante la monitorización *online*. Las más frecuentemente utilizadas son la monitorización a través del control de las señales de tensión y corriente medidas en la fuente de alimentación del soldador. Un campo menos estudiado es la monitorización óptica del proceso por medio de Fiber Bragg Gratings, o como se hará referencia a ellos durante el resto del documento: FBGs. Los principios de funcionamiento de dichos sensores se explicarán más adelante en este mismo documento en el capítulo 2.

Pocos son los artículos publicados respecto a este tema. En una obra de Suarez et al. [4], un sensor FBG y un termopar son utilizados para monitorizar el proceso de soldadura TIG, en dicho trabajo el sensor FBG se coloca en el lado de la placa opuesta a la línea de soldadura, y describe varias dificultades debidas a la colocación de dicho sensor.

Moreira et al. Publicaron un artículo [5] en el que se describe una forma para medir la temperatura durante una soldadura ayudándose de un sistema multisensor formado por termopares, termografías y FBGs. Realizando un estudio más exhaustivo de forma en la que colocar dichos sensores, se observa la dificultad para el emplazamiento óptimo debido a la fragilidad de los mismos. Finalmente, introduciendo distintos tipos de protecciones se consigue medir temperaturas comparando los resultados con los obtenidos con termopares.

Más tarde Moreira et al. [6] publican otro artículo en el que, aprovechando la experiencia obtenida del anterior, se pegan una serie de FBGs a la propia placa a soldar, admitiendo que esto no sería práctico en una aplicación real. Se consiguen optimizar las mediciones, mediante la calibración y la comparación sistemática con otros sensores, tanto de *strain*, es decir, mediciones de la deformación o tensión sufrida en el sensor, como de temperatura.

Viendo los escasos estudios realizados sobre la aplicación de FBGs en el campo de la monitorización del proceso de soldadura, y teniendo en cuenta las ventajas que presentaría un sistema de monitorización *online* basado en esta tecnología (bajo coste, inmunidad a interferencias electromagnéticas, flexibilidad de montaje, facilidad de uso, etc.) es lógico pensar en esta línea de investigación como una oportunidad para desarrollo de nueva y eficiente tecnología.

## 2. Estudio Teórico-Experimental

Se expondrán las tecnologías mediante las cuales se han llevado a cabo los experimentos, así como sus principios teóricos. Desde el sensado acústico, pasando por la teoría de las redes de difracción, hasta la implementación de dichas redes en FBG para la utilización como sensores.

## 2.1 Sensado acústico

La primera idea para el presente proyecto sobre la forma en la que se quería llevar a cabo la monitorización del proceso de soldadura fue mediante la medición de las ondas acústicas producidas por los cambios de presión que ocurren durante dicho proceso. Como cualquier otra forma de monitorizar el proceso, esto se puede realizar siempre y cuando haya una variación en una propiedad física de la cual sea posible obtener su valor en cada momento.

Lo que se ha intentado ha sido obtener dichas ondas de choque por medio de un micrófono convencional conectado a la tarjeta de audio de un PC. Las grabaciones obtenidas en el laboratorio se han procesado mediante un programa realizado en *Matlab*, cuya función básica es de realizar una fragmentación de la señal, aplicar sobre estos trozos de señal la transformada de Fourier, y hacer posteriormente algún tipo de procesado, como el cálculo de la varianza de dichas transformadas.

Con este procesado en teoría sería posible observar los cambios ocurridos en la señal acústica, para cada frecuencia y durante toda la evolución de una soldadura. De esta forma, y teniendo la gráfica de una soldadura correcta, se pretendía comparar con ella gráficas obtenidas de soldaduras con algún tipo de defecto. Por lo tanto en la gráfica resultante se esperaba observar algún tipo de pico o cambio significativo, que señalara si durante el proceso había ocurrido una perturbación.

El problema que no se ha podido solventar surge cuando se pretende aislar los sonidos ambientales y los producidos inevitablemente por la maquinaria necesaria para llevar a cabo la soldadura, de las ondas de choque producidas por los cambios de presión generados a partir del plasma de la dicha soldadura. Estas ondas de choque producidas por el plasma son la variable física que se deseaba medir y procesar, y gracias a las cuales seguramente se podría haber realizado la monitorización.

Debido a estas señales no deseadas las gráficas se llenan de ruido en prácticamente todas las frecuencias, lo que hace imposible, al menos con un método tan simplificado, la observación de cambios significativos en la señal de interés.

En la siguiente figura se muestra el ejemplo de las gráficas de la señal sonora medida junto a su varianza para las distintas frecuencias obtenidas tras el procesado, y se compara la señal correspondiente a un proceso limpio, sin fallos, contra la señal obtenida durante un proceso en el que ocurre un cambio de corriente.

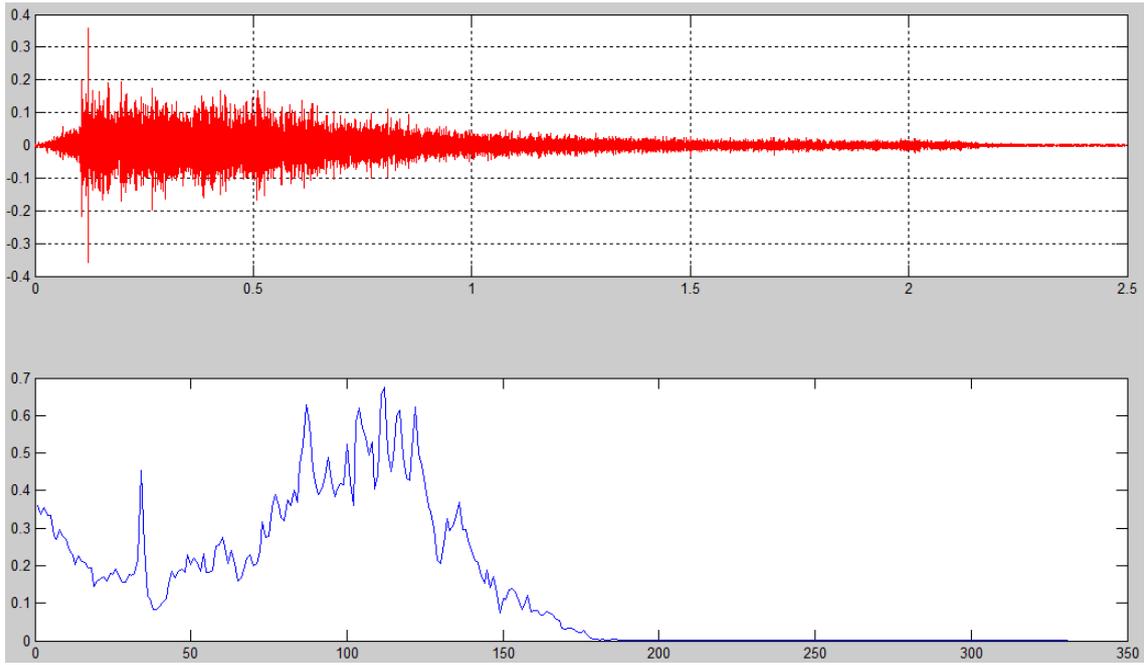


Ilustración 8 Grabación obtenida durante soldadura limpia, y su posterior procesado.

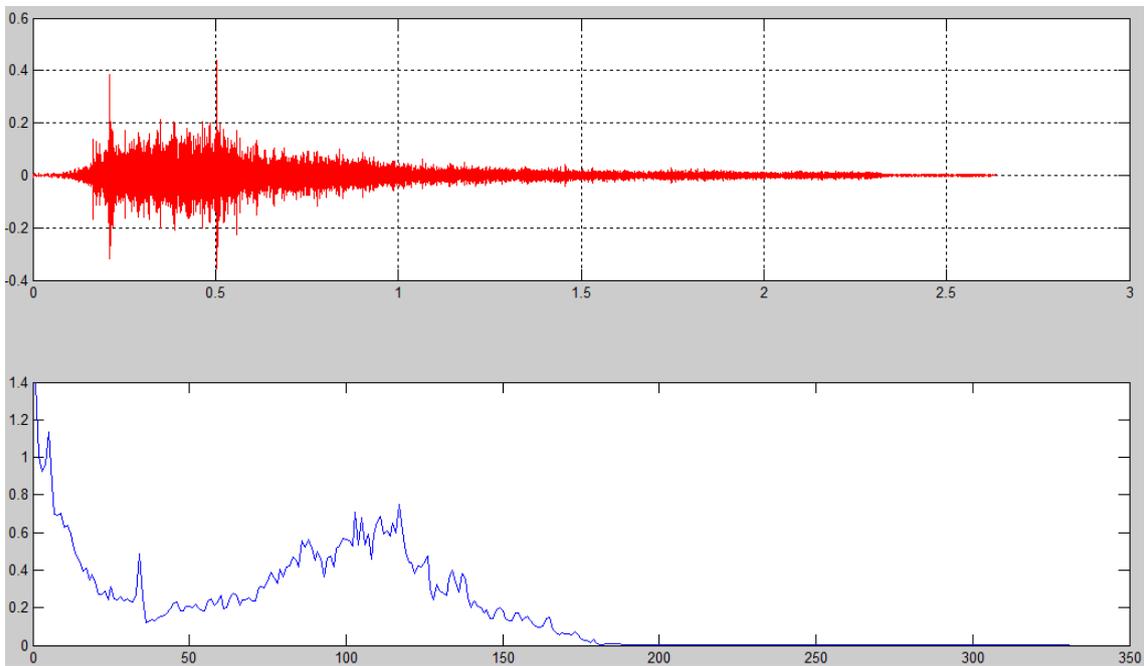


Ilustración 9 Grabación obtenida durante soldadura con cambio de corriente que produce defecto, y su posterior procesado.

Se observan cambios entre ambas soldaduras, pero no se ha podido llegar a determinar un patrón según el cual y por medio de la comparación se pueda distinguir entre soldaduras correctas e incorrectas, por el motivo antes mencionado de la aleatoriedad de las señales de ruido recogidas. Dadas estas complicaciones para obtener un sistema fiable capaz de detectar perturbaciones en las soldaduras, se optó por un cambio de estrategia, en el que como se va a ver de aquí en adelante, se ha utilizado la tecnología de las redes de difracción para la medición de las ondas de choque generadas por el plasma.

## 2.2 Teoría redes de difracción

En el presente proyecto se han realizado mediciones de los procesos físicos que rodean a una soldadura con un sistema multisensor con el fin de demostrar la viabilidad del uso de FiberBraggGratings o FBGs como sensores para la monitorización en línea de dicho proceso. Estos sensores FBGs se basan en la teoría de las redes de difracción.

La difracción de la luz es un fenómeno que se explica satisfactoriamente a través del modelo ondulatorio óptico. Una red de difracción es un instrumento óptico cuya utilidad es separar y medir un haz de luz en las distintas longitudes de onda por las que esté compuesto sus “componentes espectrales”.

ESPECTRO CONTINUO (de la luz blanca)



**Ilustración 10 Componentes espectrales de la luz blanca**

Una red de difracción es un conjunto de aberturas u obstáculos equiespaciados, las cuales producen una alteración en fase y/o amplitud del haz luminoso a estudio. Se distinguen dos tipos de redes:

- Redes por reflexión, se construyen grabando rayas paralelas equiespaciadas en una superficie, la luz se refleja en los salientes entre las rayas.
- Redes por transmisión, las rayas paralelas se graban sobre una placa de vidrio y la luz pasa a través de los espacios transparentes de dicho vidrio.

El efecto de la red se puede describir en términos de una disposición regular de rendijas paralelas, con un espacio  $d$  entre ellas del orden de los  $\mu\text{m}$ . La constante de la red es proporcional al número de rendijas por milímetro.

Si se hace atravesar un haz de luz monocromática perpendicularmente por la red, las ondas emergentes por cada rendija están en fase, y si se coloca una pantalla de manera que se proyecten sobre ella dichas ondas emergentes, se generará sobre dicha pantalla un diagrama de interferencias debido al gran número de focos

equiespaciados. Las ondas interferirán constructivamente siempre y cuando la diferencia de camino sea un múltiplo entero de la longitud de onda, es decir, los máximos de interferencia estarán localizados en ángulos  $\theta_m$  dados por:

$$d \sin \theta_m = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

donde  $m$  es un entero que indica el orden máximo de interferencia.

En el caso de que la luz incidente esté compuesta por varias longitudes de onda, cada una de ellas tendrá su propio valor de  $\theta_m$ , y a los máximos se les denomina "líneas espectrales".

La ecuación de la red es la misma que la que da los máximos en el diagrama de interferencia de una doble rendija. Se puede estudiar el efecto de ir aumentando progresivamente el número de rendijas  $N$ , partiendo de dos, hasta llegar a un número lo suficientemente grande como para considerar una red. Se destaca:

- La intensidad de cada máximo aumenta con  $N^2$
- La semianchura del máximo (ángulo entre el centro del máximo y mínimo adyacente) disminuye como  $1/N$

Por tanto, si una doble rendija produce un diagrama de franjas y una determinada distribución de intensidades, una red produce, con  $N$  elevado, un diagrama que consiste en máximos nítidos, estrechos y brillantes, y el resto de la pantalla en oscuro.

La magnitud dispersión angular  $D$ , es la diferencia en la posición angular que corresponde a una diferencia determinada por la longitud de onda.

$$D = \frac{d\theta_m}{d\lambda} \quad (2)$$

Despejando de la ecuación (1) se obtiene:

$$D = \frac{m}{d \cos \theta_m} \quad (3)$$

De donde se deduce que la dispersión de la red será mayor cuanto mayor sea la separación entre rendijas.

## 2.3 Sensado con FBGs

Desde un punto de vista genérico, los sensores basados en fibra óptica tienen como ventajas respecto a otros: la inmunidad a interferencias electromagnéticas, su ligereza, alta sensibilidad, gran ancho de banda, y una fácil implementación de sensores distribuidos y multiplexados. Su principal función, y para lo que más ampliamente han sido estudiados, es para la medición de diferentes parámetros físicos como tensiones, temperaturas y presiones.

En nuestro caso de estudio el sensor óptico es una red de difracción o grating, que consiste básicamente en una fibra óptica en la que su índice de refracción no es uniforme, de esta manera se produce el efecto Bragg o refracción de la luz. red de difracción tiene la propiedad de reflejar selectivamente una banda de frecuencias concreta, centrada sobre la longitud de onda de Bragg. Esta longitud de onda de Bragg ( $\lambda_{\text{Bragg}}$ ) es proporcional al periodo de variación del índice de refracción ( $\Lambda$ ) y al índice de refracción efectivo de la guía de onda ( $n_{\text{eff}}$ ):

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

Cada vez que la luz atraviesa una zona con índice de refracción más grande, parte de ella se refleja hacia atrás. Si la longitud de onda coincide con la separación de las regiones de la fibra con un índice de refracción mayor, las ondas reflejadas en cada una de estas zonas forman una interferencia constructiva.

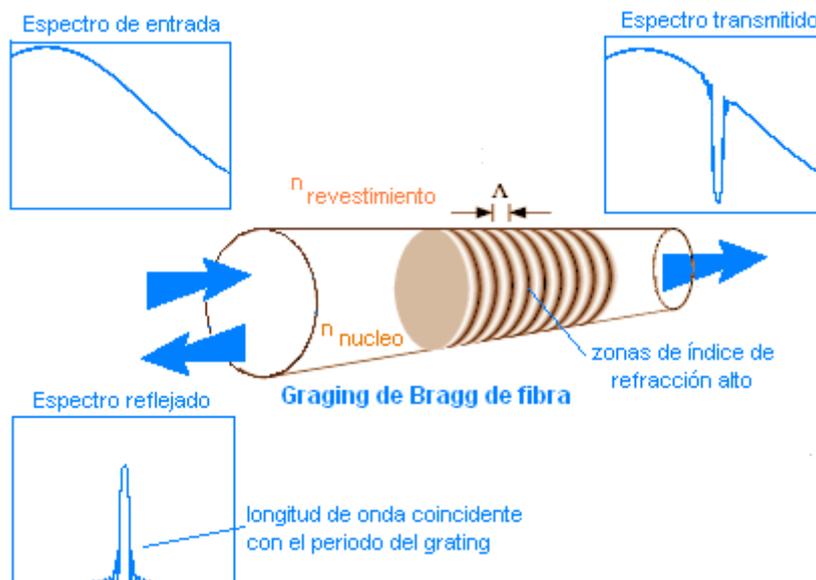


Ilustración 11 Explicación gráfica funcionamiento de red de difracción

La fabricación de los gratings de Bragg se realiza por medio de una exposición parcial de la fibra a la luz ultravioleta siguiendo un patrón de intensidad. Esta luz ultravioleta pasa a través de una máscara durante 30 o 40 segundos e imprime un sensor sobre la fibra de una determinada longitud de onda. Usando la salida pulsada de un láser, junto a la apropiada máscara, la luz UV cambia el índice de reflexión del núcleo dopado de Germanio a unas muy precisas localizaciones periódicamente espaciadas. Se crea en el núcleo de la fibra la ruptura de enlaces atómicos del cristal de óxido de silicio dopado con germanio, del cual está hecho, cambiando su índice de refracción.

Cuando una presión lateral se ejerce sobre la fibra, el perfil lateral de la misma se deforma elípticamente, el eje sobre el cual se aplica la presión se comprime (eje Y), y su eje ortogonal (eje X) se expande. En la dirección de compresión el índice de difracción aumenta ( $N_y$ ), mientras en la dirección de expansión disminuye ( $N_x$ ). En consecuencia la fibra presenta dos ejes ortogonales con índices de difracción distintos.

La relación antes mencionada, entre el periodo de variación del índice de refracción y al índice de refracción efectivo de la guía de onda,

$$\Lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda,$$

cambiará de manera proporcional a la presión lateral ejercida sobre la fibra o a un cambio de temperatura, puesto que el cambio de temperatura varía el periodo de perturbación ( $\Lambda$ ).

Dado que ambas variables, temperatura y *strain*, son las que afectan a la respuesta del FBG, se intenta aislar una de la otra dependiendo la magnitud a medir, en muchos sensores basados en la medida del strain se incluye una segunda fibra sensora que permita compensar las variaciones de temperatura.

La implementación de estos sensores es muy sencilla, se conecta un extremo de la fibra a un interrogador, este interrogador está compuesto por una fuente de banda ancha que emite luz en una amplia gama de frecuencias, un acoplador que separa la señal enviada de la reflejada, y un detector CCD o policromador, que permite analizar las reflexiones de uno o varios sensores FGB. Por lo tanto, esta tecnología permite crear sensores cuasi distribuidos que permiten tomar medidas punto a punto a lo largo del recorrido de la fibra óptica.

## 2.4 Sensores FBG para la monitorización *online* del proceso de soldadura

Una vez conocidos los principios físicos de los sensores de fibra FBGs, se pasa a explicar cuál es su papel en el presente proyecto.

La idea original para la utilización de dichos sensores, una vez fue descartado la monitorización mediante la medición de las señales acústicas con el micrófono convencional, fue de recoger estas vibraciones midiéndolas a través del *strain* sufrido en la fibra. Para esto se colocaron sensores en diferentes disposiciones cercanas a la zona donde se produce el plasma de la soldadura, en teoría el generador de las ondas de choque a estudio.

De esta forma, conectando los sensores a la unidad interrogadora como se ha descrito en el punto anterior, se podrían ver las variaciones de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz que retorna al interrogador, causadas por las deformaciones ocurridas en la zona de la fibra con el patrón grabado que origina el sensor.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo del espectro en reflexión característico de uno de los FBG utilizados, es decir, la distribución de la reflectividad para las distintas longitudes de onda, teniendo como longitud de onda central los 1532 nm. Esta es la longitud de onda que varía al aplicar sobre el FBG tanto aumentos de temperatura como *strain*.

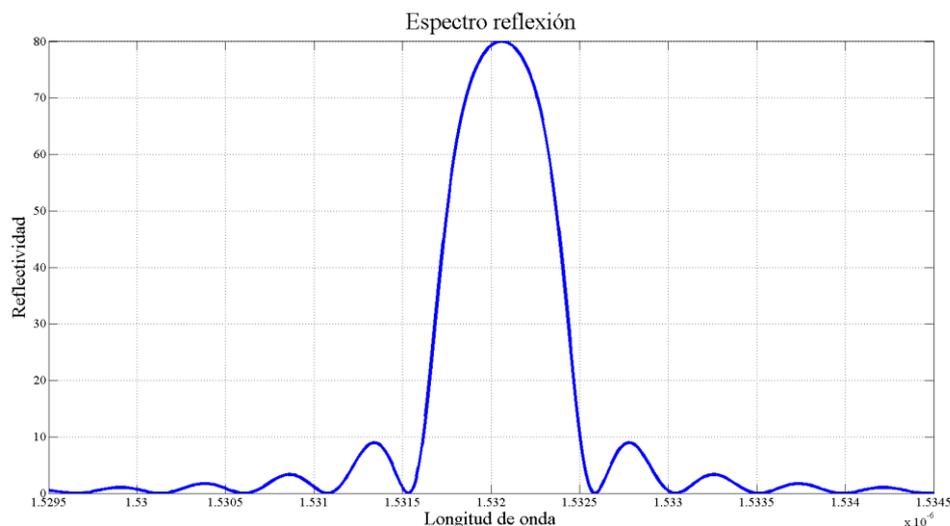


Ilustración 12 Espectro en reflexión del FBG

Esta zona de la fibra se encuentra adherida a una membrana plástica mediante la cual se consigue la amplificación del efecto que producen las vibraciones en el sensor. Esta no es la configuración habitual para este tipo de sensores, si no que ha sido diseñada para esta aplicación particular, ya que los FBGs generalmente son adheridos a la pieza para su utilización. Como un ejemplo práctico y habitual se podría mencionar el uso de los FBGs para la medida de deformaciones en una estructura, en la cual esta configuración no tendría ningún sentido.

A continuación se muestra una imagen de uno de los sensores utilizados en el laboratorio durante la validación experimental del estudio. La zona naranja es la mencionada membrana sobre la cual se encuentra adherida la fibra, se puede observar como dicha fibra se encuentra pelada, sin ningún tipo de protección en la zona central, donde el hilo pasa de ser negro a transparente, con el fin de obtener un sensor lo más sensible a los cambios físicos posible.

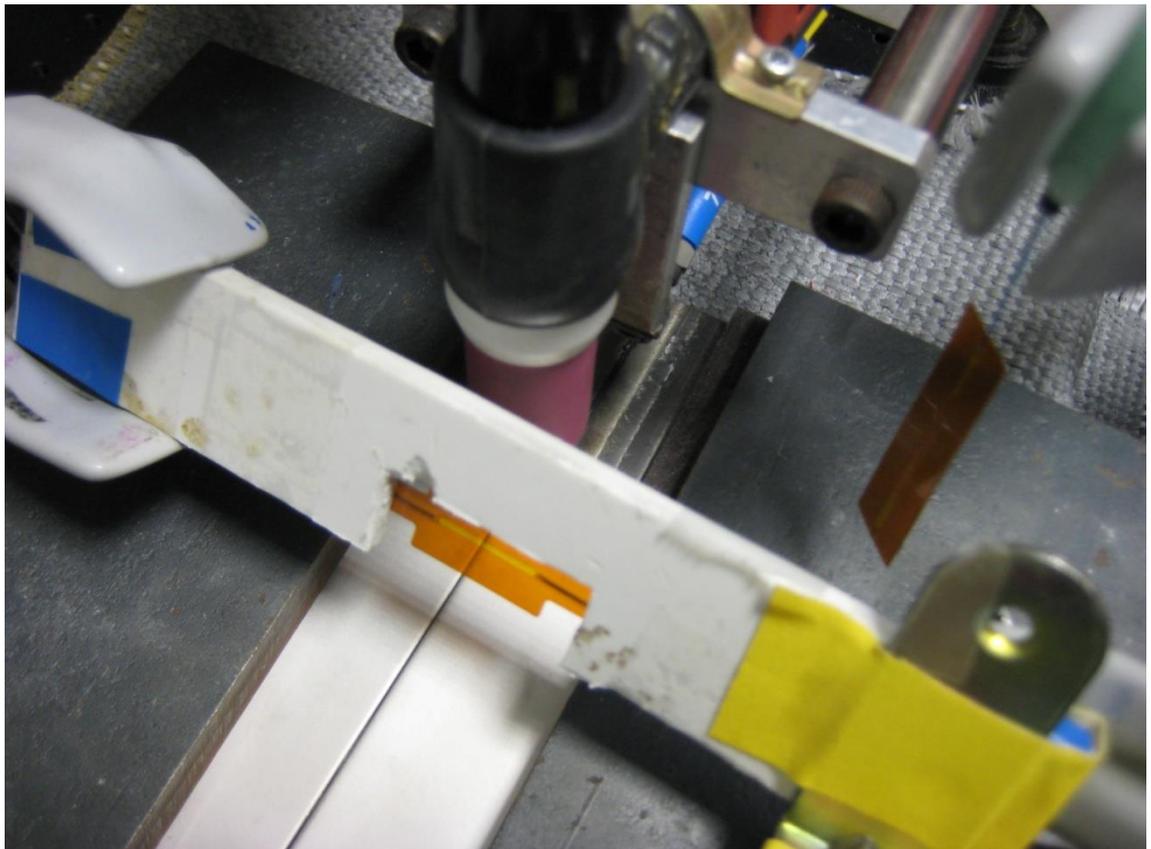


Ilustración 13 Aspecto de uno de los sensores utilizados

Con el fin de captar lo más fielmente posible los cambios en las variables físicas que ocurren alrededor del plasma se han colocado dichos sensores en distintas disposiciones, siempre tan cerca de la columna de plasma como ha sido posible. La limitación aquí la impone la temperatura, ya que la membrana a la que está adosado el FBG es plástica y es evidentemente muy sensible a las altas temperaturas que se llegan a alcanzar en las zonas más próximas a cordón de soldadura, por lo tanto está limitación nos la impone la membrana y no la fibra óptica que puede llegar a soportar los 1000°C.

Las disposiciones como se han colocado los FGBs son:

- Modo vela

Un ejemplo de esta disposición está en la figura 13. Para esto se ha adosado el FBG a un soporte rígido, junto con la membrana para aumentar la sensibilidad del sensor. La red de difracción está grabada en una fibra con un extremo conectado a la unidad interrogadora, y el otro abierto, esto es posible ya que como se ha comentado antes el FBG trabaja en reflexión, por lo que la señal a interés es la que vuelve a la unidad interrogadora, la que aparece en el otro extremo de la fibra carece de importancia.

Con ayuda de brazos y abrazaderas se ha colocado el FBG sobre el cordón de soldadura, intentando siempre acercarlo tanto como sea posible, las pruebas se hicieron a unas distancias aproximadas de entre 10 y 5 cm.

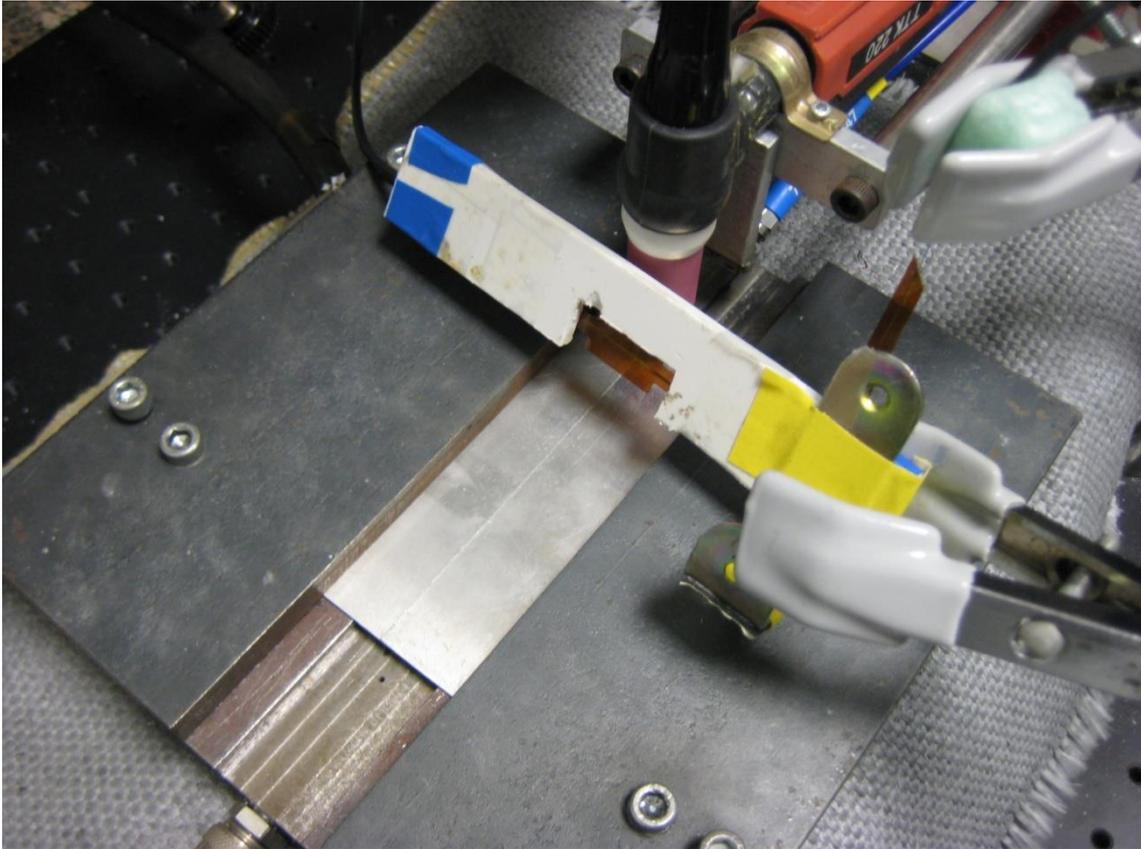


Ilustración 14 Ejemplo de la primera disposición del FBG

Como se observa en la imagen se ha colocado el FBG de forma que no tocara tanto la mesa como ninguna de las partes de la maquinaria relacionada con la soldadura, con esto se consigue aislarlo de las vibraciones resultantes de dicha maquinaria, y no deseadas ya que en principio son carentes de información interesante acerca del proceso. Para esto se ubicó el brazo donde va adosada la abrazadera en una mesa diferente, con lo que se consigue el máximo aislamiento.

Para esta disposición se colocó el sensor tanto de frente al cordón como se puede ver en la figura 14, a los lados y detrás del mismo, el lado opuesto al de la figura.

Se llegó a la conclusión, como se mostrará más adelante, que los resultados más positivos se obtienen al ubicar el sensor de la forma en la que se ve en la ilustración 14. Colocando el mismo a unos 7cm de la antorcha, y con un ángulo de inclinación que permite enfocar la membrana directamente sobre la zona de generación de plasma.

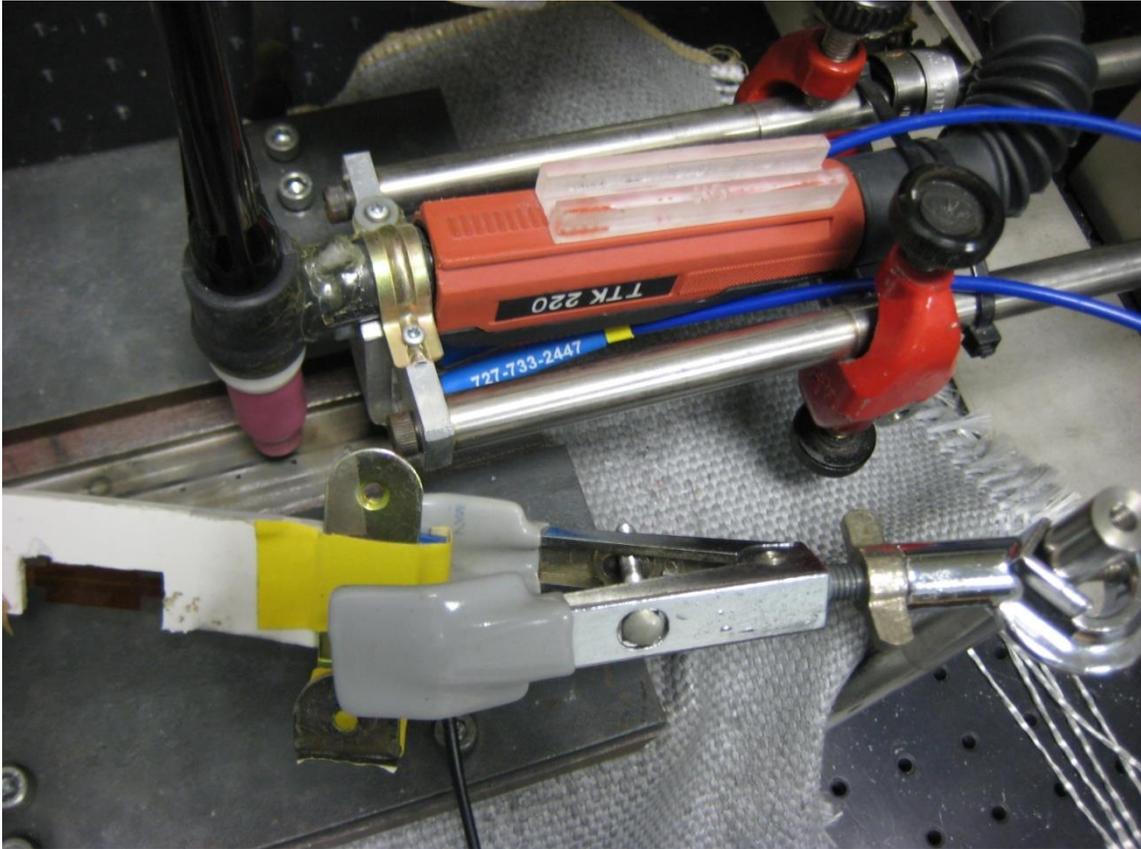


Ilustración 15 Emplazamiento óptimo del sensor en modo vela

- Pegados

La segunda disposición que se ha probado consiste en colocar varios sensores pegados en la pieza a soldar. Para esto se utilizó una fibra desnuda en la que en el mismo hilo se encuentran grabados cinco FBGs, cada uno de ellos trabajando con una longitud de onda ( $\lambda$ ) central diferente.

Estos sensores, al igual que el del modo vela, se conectan a la unidad interrogadora por un extremo, quedando el otro abierto. La unidad interrogadora es capaz de detectar los cinco sensores grabados en la fibra, y monitorizar las variaciones en las longitudes de onda centrales de cada uno de ellos.

Los sensores se han pegado repartiéndolos por las zonas más cercanas al cordón de la soldadura, dejando siempre cierto espacio ya que como se ha explicado anteriormente no podrían soportar sin fundirse las altas temperaturas generadas por el plasma y transferidas a las chapas de metal a soldar.

En la siguiente imagen se muestra como fueron colocados estos sensores: dos de ellos en cada una de las placas, dejando dos centímetros hasta la junta que iba a ser soldada, el quinto se pegó en la zona final de la junta entre ambas piezas.

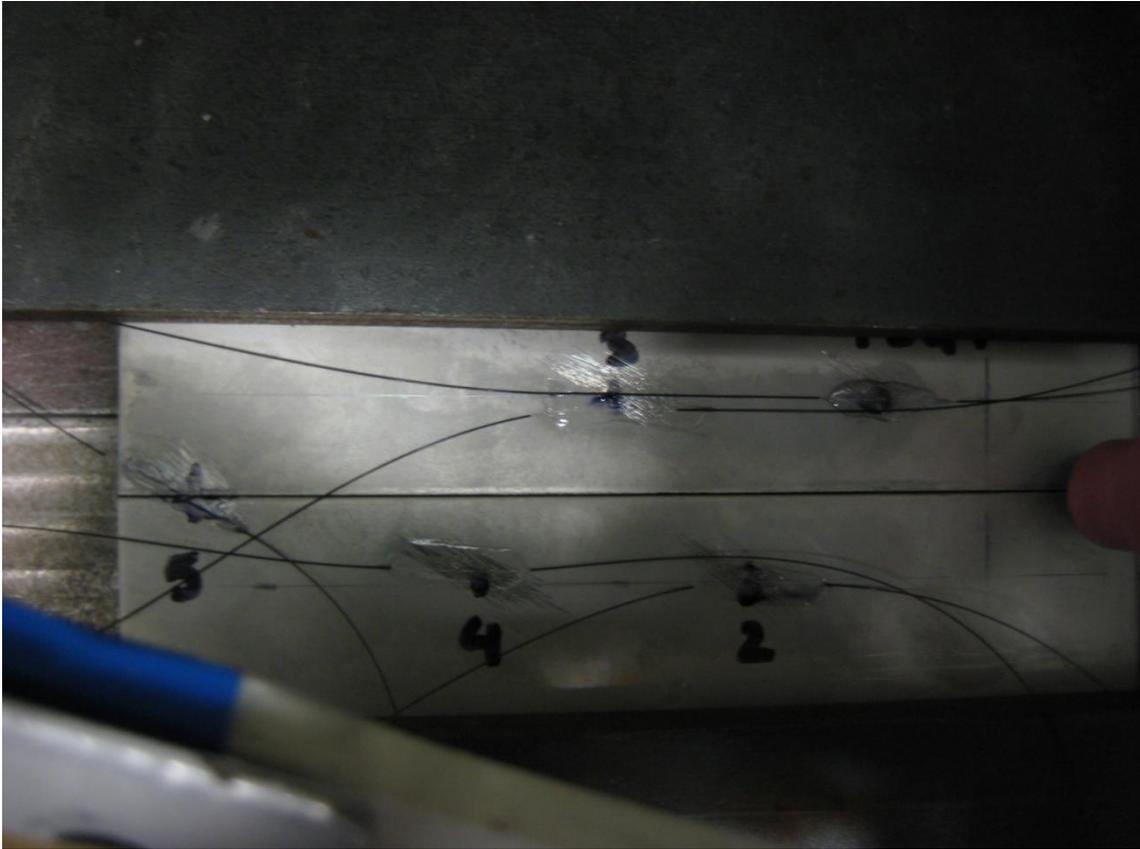


Ilustración 16 Disposición de los FBGs pegados en las placas

### 2.4.1 Objetivos y resultados obtenidos

El objetivo de estas mediciones, tanto en la disposición en modo vela, como pegados, fue el de detectar las vibraciones propagadas por el aire durante el proceso de soldadura, obteniendo de este modo un patrón según el cual basarse para que por medio de la comparación poder detectar soldaduras erróneas. De esta forma, al monitorizar con dichos sensores un proceso, se podrían observar cambios significativos en el patrón que evidencien el punto en el que pueda haber ocurrido un defecto de la soldadura.

Esta primera hipótesis fue refutada por los resultados obtenidos en el laboratorio. En estos se evidenció la facilidad de la red de difracción para obtener la curva de temperatura del proceso de soldadura. Como se ha comentado anteriormente, los sensores FBG son sensibles tanto al *strain* como a la temperatura, y esta segunda propiedad es la aprovechada para la detección de defectos de soldadura llevada a cabo en el presente proyecto.

Esto se puede explicar gracias a que en la mayoría de casos en los que se produce un defecto en el cordón este es producido por un cambio en la estabilidad del proceso, en particular en alguna de las variables de entrada al mismo, como pueden ser la corriente y la tensión de soldadura, la velocidad de avance, la distancia entre el electrodo y la pieza, la temperatura y humedad de la estancia, el flujo del gas de protección, etc. Como se comentó anteriormente, en todo proceso de soldadura la estabilidad es un parámetro crítico, que evidencia si se ha llevado a cabo el proceso correctamente o no.

Estas eventualidades producen cambios en la dinámica del proceso que afectan a sus propiedades físicas, con lo que se ve afectada la estabilidad de dicho proceso, lo cual conlleva una alta probabilidad de aparición de defectos en el cordón.

Estos cambios son lo que se aprovechan para obtener información acerca de la aparición de defectos o perturbaciones en el proceso. Un ejemplo de esto es la monitorización por medio de espectrómetros, que se valen de las variaciones de las longitudes de onda de la luz emitida por el plasma para detectar los casos en los que ha ocurrido algún tipo de defecto. Esta tecnología ha sido usada para validar los resultados obtenidos con los FBGs, ya que como es lógico no solo cambian las longitudes de onda de la luz emitida, con ellas también varía la temperatura generada, que es lo que se ha medido con estos sensores.

### 3. Experimentos en laboratorio

En esta parte del documento se detallarán los test realizados en el laboratorio, así como los resultados obtenidos tras los mismos

### 3.1. Set up de soldadura

Tanto el *setup* de soldadura, como el software que lo controla utilizado para realizar las mediciones han sido desarrollados por José Julián Valdiande del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria [7].



Ilustración 17 Laboratorio con set-up de soldadura

Dicho *setup* puede verse dividido en tres zonas bien diferenciadas. Por un lado se encuentra la parte del motor que controla el movimiento de la pieza y de la antorcha en los tres ejes de coordenadas. Pudiendo éste ser controlado tanto por el software *Weldstorm* como manualmente. Estos motores son el modelo MTM100PP de Newport, y están a las órdenes del controlador de la misma marca MM4005. Gracias a estos equipos se puede colocar con gran exactitud la antorcha en el punto sobre la pieza donde se quiere que comience el cordón de soldadura, para que una vez que empiece ésta, los motores se encarguen de mover el plato sobre el que está fijada la pieza. Así, durante una soldadura la que se mueve es la pieza quedando fija la antorcha. Esta configuración que resulta muy útil para los experimentos llevados a cabo en este proyecto, ya que de esta manera al colocar el sensor FBG éste siempre estará a una distancia constante del punto de generación de plasma.

La segunda parte corresponde al control de gas de protección (Ar). Su tarea es la de proporcionar un flujo constante de gas, el cual evita que se produzcan defectos en la soldadura provocados por procesos de oxidación durante la misma. Este flujo de gas también es controlado por el software *Weldstorm*.

Por último se encuentra la zona de la fuente de alimentación Mastertig 2200 de Kemppi, que proporciona la corriente y voltaje necesario a la antorcha TTC 200 de Kemppi. Estos parámetros de corriente y voltaje son también controlados por el software *Weldstorm*, propiedad aprovechada para la generación de perturbaciones de soldadura derivados de subidas y bajadas del nivel de corriente en la antorcha.

### 3.2. Set up para las mediciones

El primer test se realizó con la configuración de los sensores FBG pegados a las piezas a soldar. Se realizó sobre dos placas de acero inoxidable AISI304 de 1mm de espesor, las cuales fueron fijadas a la base donde el gas de protección actúa. La tabla de composición de dicho material, acero inoxidable AISI304, es la siguiente:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,052	0,55	1,23	0,017	0,011	18,7	9,5

Ilustración 18 Tabla de composición Acero Inoxidable AISI304 (%wt)

Se pegaron sobre ellas los cinco FBGs de 4mm de longitud en la disposición que se muestra en la figura 12.

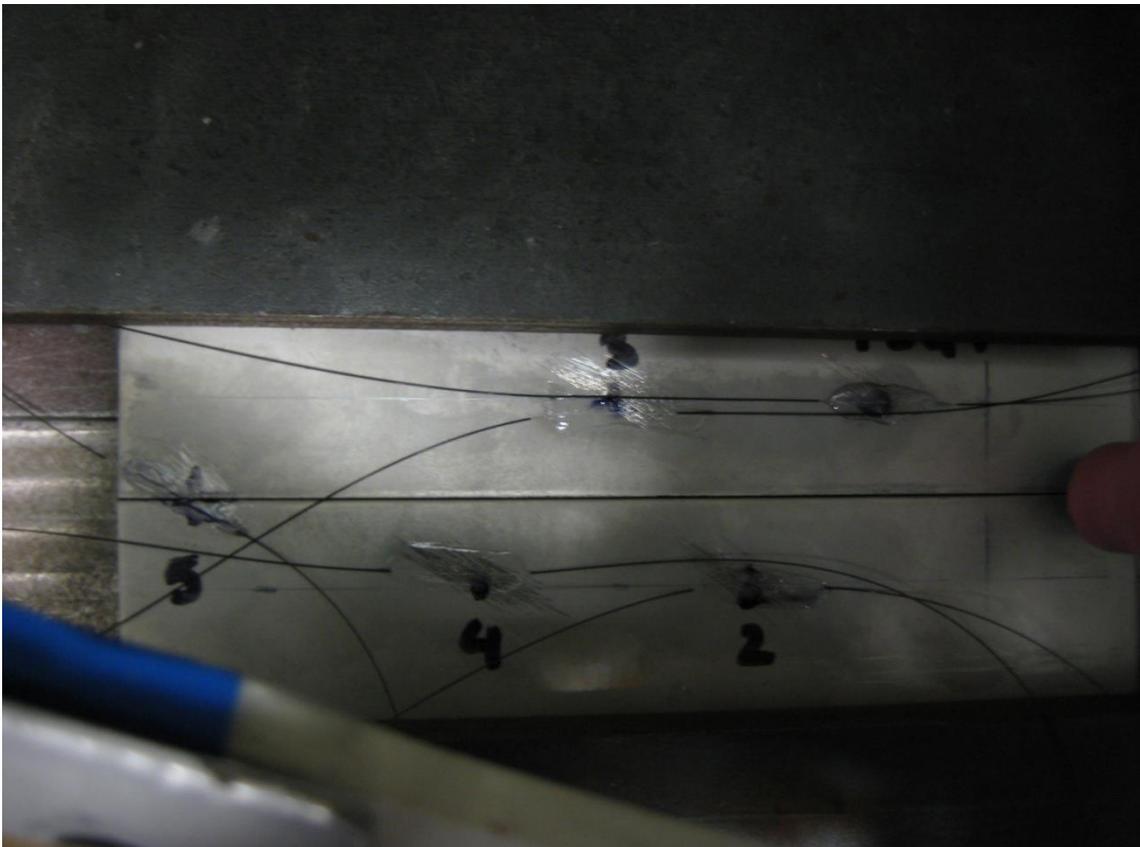


Ilustración 19 Disposición de FBGs pegados

Los resultados fueron obtenidos interrogando a los FBGs con la unidad interrogadora comercial *FibersensingBraggScope*, con una frecuencia de muestreo de 250Hz. Además de los FBGs, y con el fin de obtener una comparación fiable a los resultados obtenidos, se utilizó un *setup* basado en espectroscopía óptica consistente en dos fibras ópticas con diámetros de núcleo de 300um, y dos espectrómetros CCD: Ocean Optics HR400 y Ocean Optics USB2000. Esta parte del *setup* basada en espectroscopía recoge la radiación generada por el plasma y procesa el espectro del mismo por medio de un PC, con una técnica basada en la media cuadrática, es decir, el valor RMS de los espectros del plasma [1].

Usando esta configuración se realizaron medidas provocando durante los procesos diferentes perturbaciones tales como bajada de la corriente de soldadura en la antorcha y corte del caudal de gas de protección empleado (Argón).

Como se comentó anteriormente, y con el fin de evitar las evidentes complicaciones prácticas para la implementación del anterior *setup*, se realizó un diseño basado en un único FBG adosado a una pieza plástica que actúa de soporte, es decir, el modo “vela”.

Durante estos experimentos también se generaron perturbaciones en el proceso que afectaban a la corriente en la antorcha y al caudal de gas de protección, durante las soldaduras de piezas de acero inoxidable AISI304 de 2mm de espesor. Mientras tanto, el FBG fue interrogado con la unidad interrogadora *FibersensingBraggScope*, pero en este caso utilizando una frecuencia de muestreo de 10 kHz, mucho mayor que en el anterior caso, con el fin de atribuir una mayor sensibilidad al sensor, ya que al contrario que la configuración anterior en el modo vela el sensor no se encuentra adosado a las piezas y por lo tanto tienen menor efecto sobre él las perturbaciones generadas por las mismas. Se realizó la comparación de los resultados con el mismo *setup* basado en espectroscopía descrito en el anterior caso.

### 3.3. Resultados

A pesar que en un principio el objetivo fue la monitorización de las ondas de choque generadas por el plasma por medio de la medición del *strain* en el FBG, lo que finalmente se obtuvo fue la medición de la curva de temperaturas. Con esta curva, y observando la pendiente de la misma, se es capaz de estimar si ha ocurrido un defecto durante el proceso de soldadura como se verá en el próximo capítulo.

Si se relaciona la curva de temperatura con el cordón de soldadura se es capaz de discernir el punto exacto de la longitud del cordón donde ha sucedido un defecto durante el proceso. Esto ocurre en el punto en el que se observa un cambio importante de aumento o disminución de la pendiente de dicha curva.

### 3.3.1 FBGs pegado

Como se ha comentado anteriormente, se comenzó el estudio basándose en la configuración de los cinco FBGs pegados a las piezas. Para este primer test se generaron dos perturbaciones: una caída en la corriente de soldadura que circula por la antorcha ( $t_1 \approx 4$  seg), y un corte en el flujo del gas de protección. Dichas perturbaciones son fácilmente identificables mediante la medida por medio de la espectroscopía del valor RMS de la radiación generada por el plasma, sin embargo no es tan evidente a la vista de los resultados obtenidos mediante los FBG en la configuración de pegados

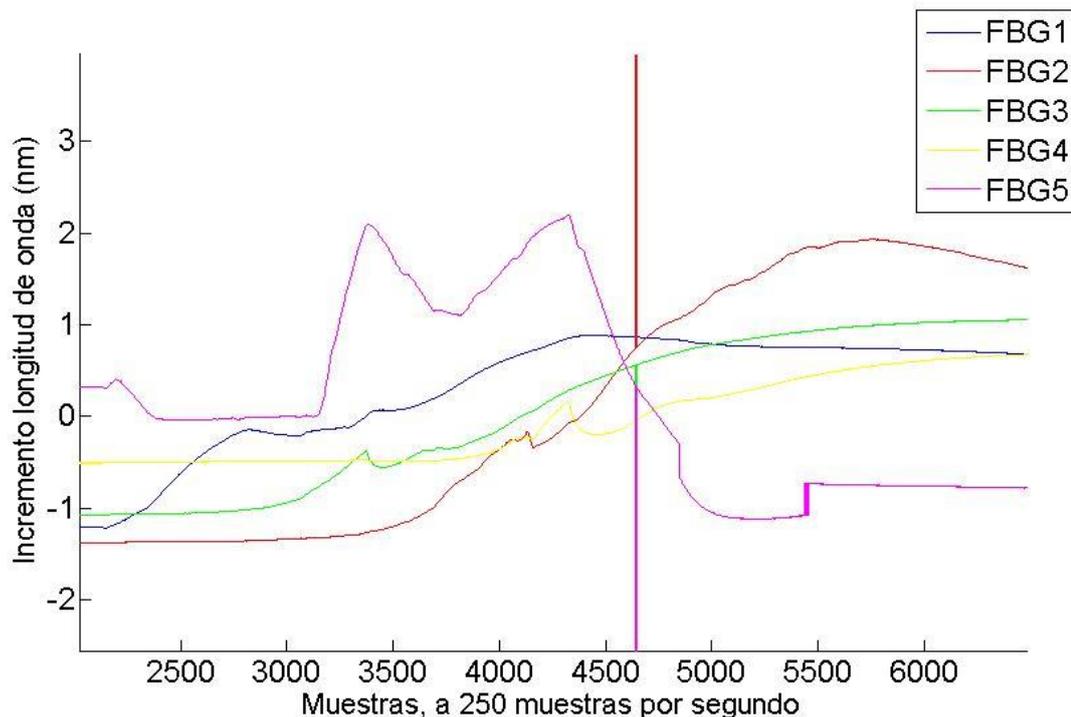


Ilustración 20 Resultados obtenidos por los 5 FBGs pegados

El primer sensor en reaccionar ante el proceso es evidentemente  $\lambda_1$  debido a su localización (está situado el primero desde donde comienza el cordón de soldadura), aparece en él la primera pendiente térmica debido a que físicamente se encuentra a la distancia más corta hasta la antorcha. Seguidamente se observa una caída en la curva térmica de los FBGs  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$ , originada por la primera de las perturbaciones, la caída de corriente en  $t_1 \approx 4$  seg conlleva una bajada en la temperatura del proceso, que queda registrada en estos tres sensores, como una bajada en la curva térmica, la cual, si el proceso no se viera alterado, seguiría la tendencia natural a aumentar hasta que el mismo acabe y empezara a enfriarse. Esta disminución no es simultánea en los tres FBGs debido a que el enfriamiento se propaga por la placa, y dado que los sensores no se encuentran exactamente a la misma distancia de donde se produce la falta, el enfriamiento se produce en tres momentos distintos.

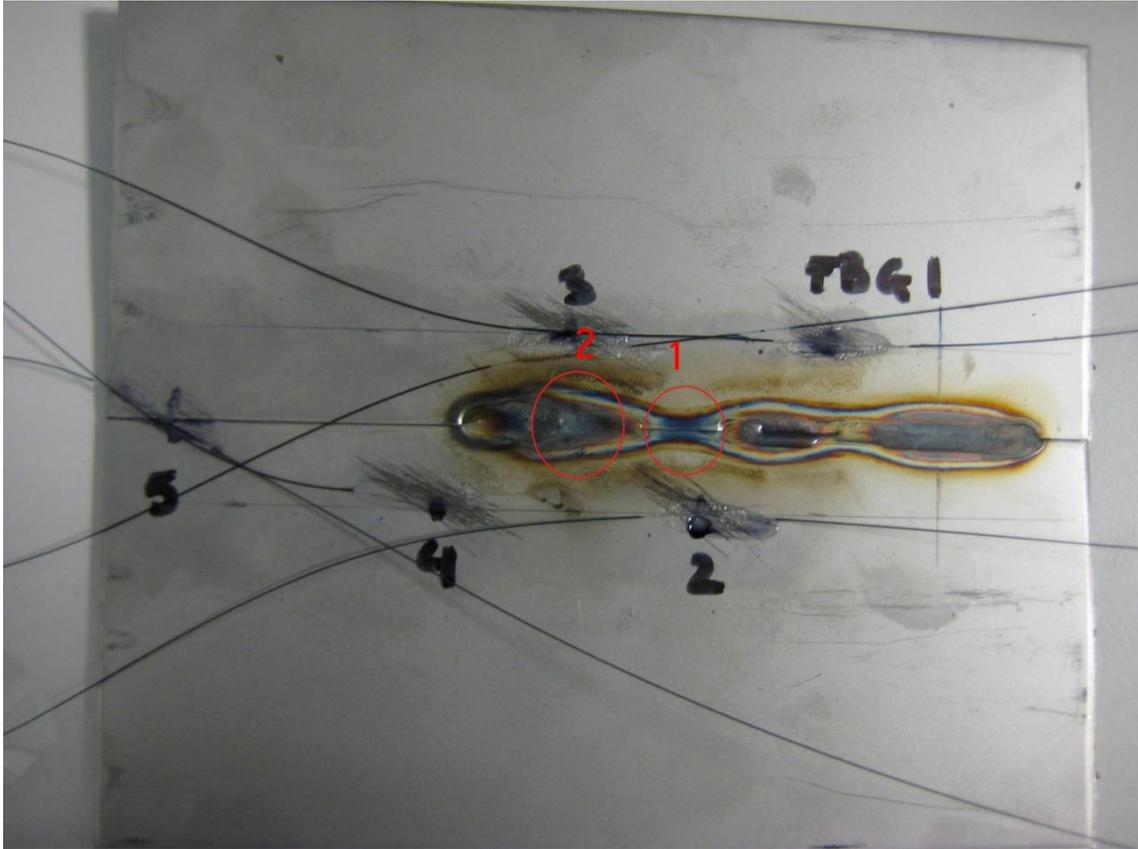


Ilustración 21 Placa después de soldadura errónea

La figura 22 muestra el resultado de las placas con los cinco FBGs pegados después de ser soldadas, comenzando la soldadura de derecha a izquierda. Se puede observar en ella la disminución de cordón culpa de la bajada en corriente de la antorcha (círculo 1), y finalmente la oxidación producida por el corte de gas de protección (círculo 2).

En ensayo se ha validado como se comentó anteriormente por medio de espectroscopía del plasma. en la siguiente figura se muestra la gráfica del valor RMS del plasma, es decir, el valor cuadrático medio de las muestras, en el que se correlan las dos perturbaciones generadas con dos caídas bastante pronunciadas de dicho valor.

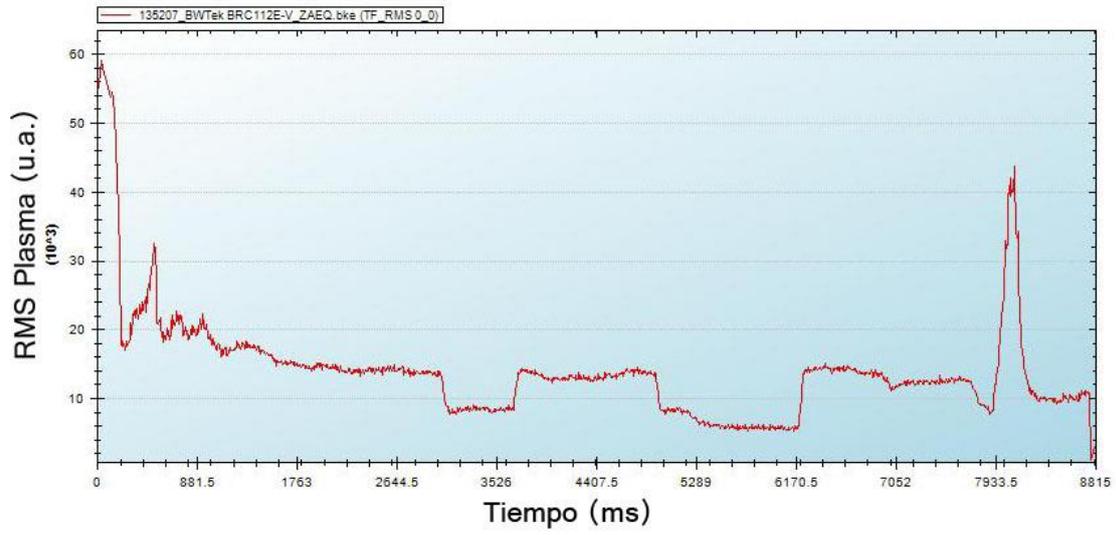


Ilustración 22 Valor RMS de las muestras grabadas por espectrómetro

### 3.3.2 Modo vela

Varios test se realizaron utilizando esta configuración, ya que como antes se ha mencionado fue necesario variar la posición del sensor con respecto a la antorcha para comparar y decidir cuál era la posición con la que obtener los resultados óptimos. A continuación se muestra el resultado obtenido con el FBG en modo vela, a una distancia  $d=50\text{mm}$  de la antorcha y un ángulo ortogonal a la misma. Con un cordón al que se han provocado tres diferentes perturbaciones: los dos primeros son dos caídas de corriente de soldadura de  $I_H=110\text{A}$  a  $I_L=70\text{A}$ , en los tiempos  $t_1=3\text{ seg}$  y  $t_2=5\text{ seg}$ , la tercera perturbación consiste en un corte en el gas de protección en  $t_3=7\text{ seg}$ .

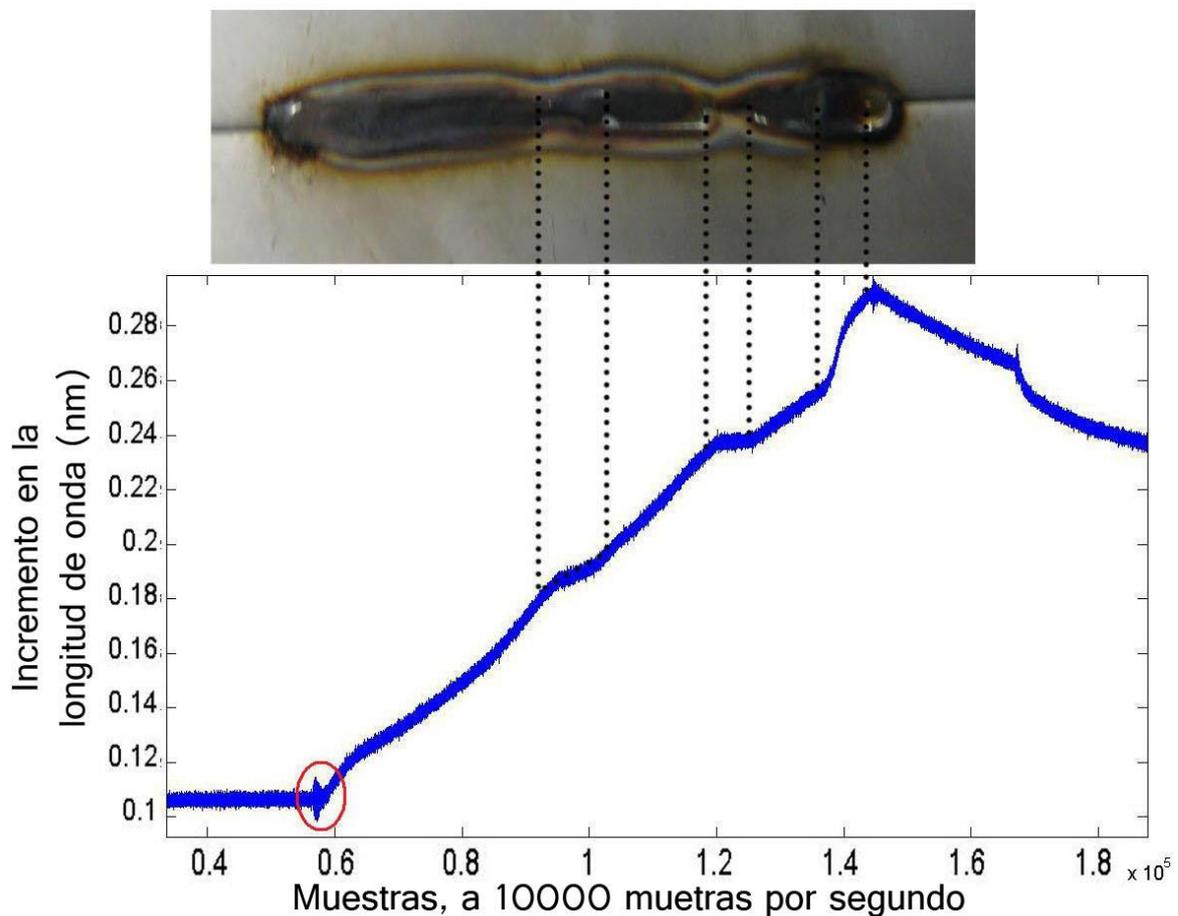


Ilustración 23 Resultado de la medición en modo vela ortogonal comparado con la imagen de la soldadura

En la gráfica mostrada en la figura 14 se pueden observar los resultados obtenidos de la medida de las perturbaciones generadas por el plasma, los cuales corresponden a la curva de temperatura del proceso. El primer evento medido (remarcado con un círculo

rojo) marca el comienzo del proceso y no corresponde a la medida de la curva térmica, sino a las vibraciones derivadas de la puesta en marcha de la maquinaria. Este efecto es interesante para tenerlo en cuenta en el futuro en una posible aplicación práctica.

En la figura se observan los eventos medidos con su correspondiente falta en el cordón de soldadura. Los dos primeros cambios importantes en la pendiente de la curva térmica corresponden a estrechamientos en el cordón. Esto se debe a que las dos primeras perturbaciones fueron disminuciones en la corriente de la antorcha, lo que provoca una atenuación en el aumento de temperatura asociada al proceso, esto se traduce en una menor pendiente de la curva, y por tanto se produce un cordón más débil o estrecho. El tercer evento se trata de un repentino aumento de la pendiente de la curva térmica, derivado de la perturbación provocada consistente en el corte del gas de protección. Este corte de gas desemboca en una variación en la dinámica del proceso, lo cual genera una discontinuidad en el cordón.

Después de este proceso se observa como la curva térmica desciende, efecto ocasionado por fin del proceso y el asociado enfriamiento de las chapas. Se muestra a continuación los resultados obtenidos mediante espectroscopía, con los cuales se ha validado el experimento. Las dos bajadas en el valor RMS corresponden a las dos caídas de corriente, mientras el último pico es el generado por el corte de gas de protección.

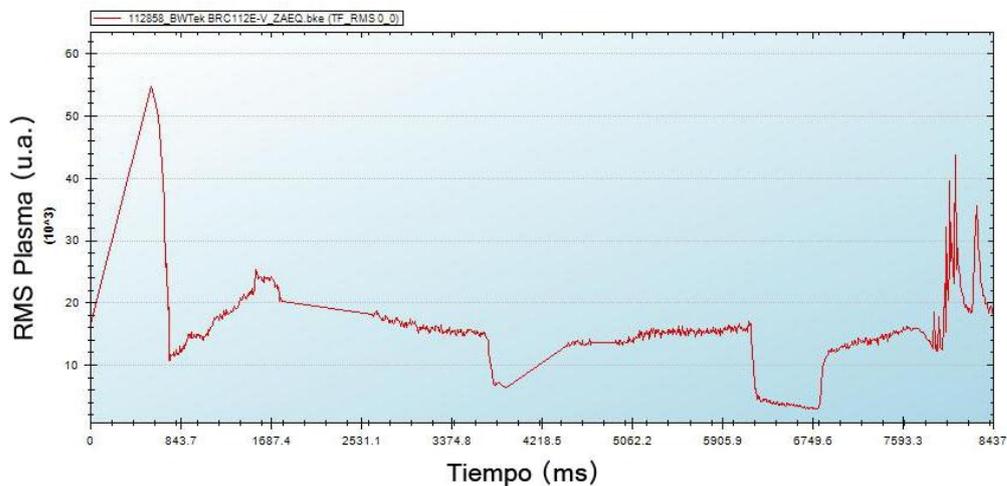


Ilustración 24 Valor RMS de las muestras grabadas por espectrómetro

Se llevó a cabo otro test en el que se varió el ángulo de proyección hacia la antorcha del FBG en modo vela, pasando del ortogonal a un ángulo de 45° con la distancia a la antorcha  $d = 50\text{mm}$ , con el fin de llegar a establecer la posición óptima para la monitorización del proceso. Además, se intensificó la segunda bajada de corriente, quedando el experimento con las siguientes perturbaciones provocadas: una primera

bajada de corriente de  $I_H=110A$  a  $I_L=70A$ , en el tiempo  $t_1=3$  seg, la segunda caída en la corriente en  $t_2=5$  seg de valor  $I_H=110A$  a  $I_L=50A$  la tercer perturbación consiste en un corte en el gas de protección en  $t_3=7$  seg.

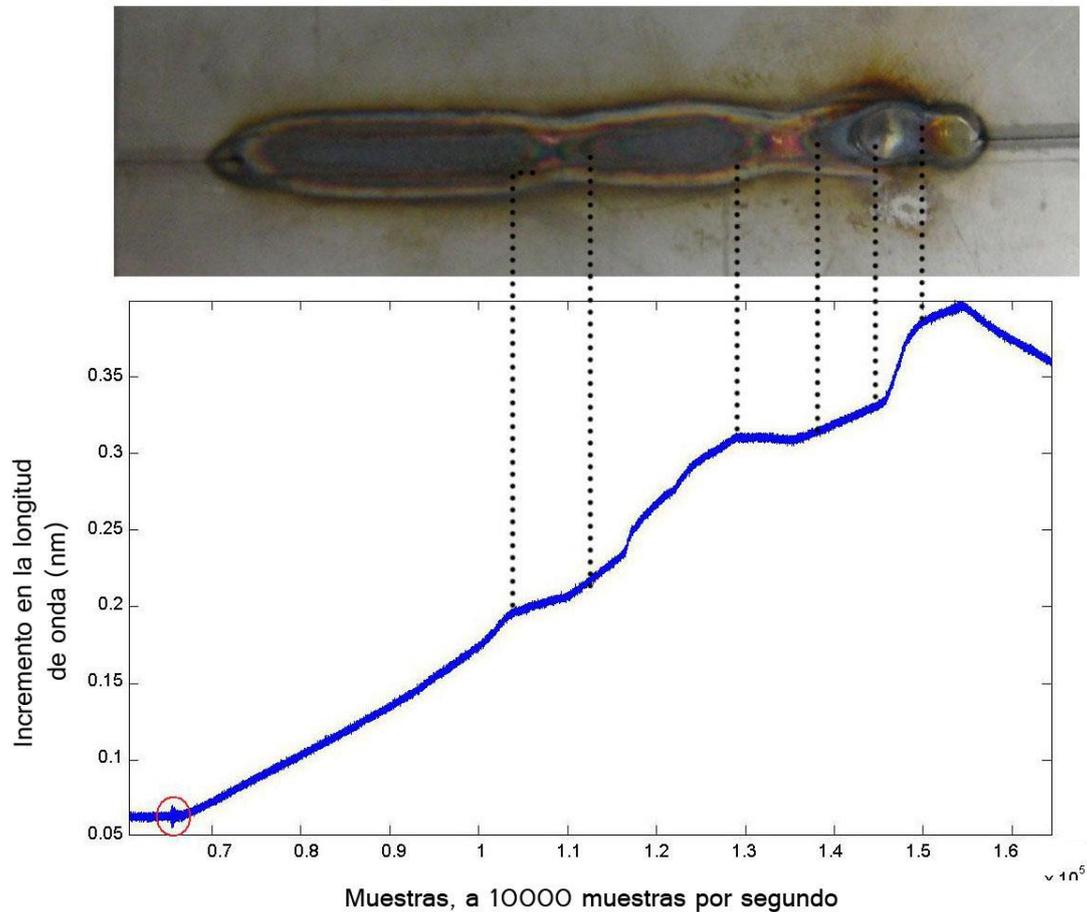


Ilustración 25 Resultados del experimento en comparación con el cordón final

A la vista de los resultados se deduce en primer lugar y como se comentó en el anterior test, la capacidad de determinar el momento en el que comienza el proceso, recogiendo las vibraciones de la puesta en marcha de la maquinaria (marcado por un círculo rojo), una interesante aptitud a la hora de implementar un sistema de monitorización automático. A continuación comienza la curva con una pendiente más o menos constante, que indica como antes se comentó, la curva térmica del proceso. El siguiente evento es una bajada en la pendiente correspondiente a la caída de corriente  $I_H=110A$  a  $I_L=70A$ , tras esto se vuelve a establecer la pendiente de calentamiento normal. Seguidamente el tercer evento es una significativa bajada en la pendiente del perfil, correspondiente a la caída de corriente de  $I_H=110A$  a  $I_L=50A$ , este descenso de la pendiente es significativamente mayor que los registrados por las

caídas de corriente de  $I_L=70A$ , esto se explica ya que esta bajada de corriente es casi de 65% de corriente nominal del proceso.

Como se observa en la imagen, estos dos descensos en la corriente provocan un estrechamiento en el cordón y también una falta de penetración (que es el fallo que en otra situación sería no deseable). Puede apreciarse también como la segunda caída produce un estrechamiento aún más pronunciado que se corresponde con lo observado en el mayor descenso en la pendiente de la curva. Con esto se deduce que se podría llegar a determinar, no sólo si se ha producido un fallo, sino también el grado de importancia del fallo producido durante la soldadura estudiando la curva medida por el FBG.

La tercera perturbación registrada es el corte en el gas de protección en  $t_3=7$  seg, que como en el anterior test se ha registrado como un aumento en la curva de temperatura, producida por la oxidación y el sobrecalentamiento de la pieza.

Como fue comentado anteriormente, con el fin de obtener una verificación de los datos medidos, se utilizó paralelamente un sistema basado en espectroscopía, con el que obtener el valor RMS de la radiación producida por el plasma. En el caso de este experimento los resultados de dicha medición fueron los siguientes.

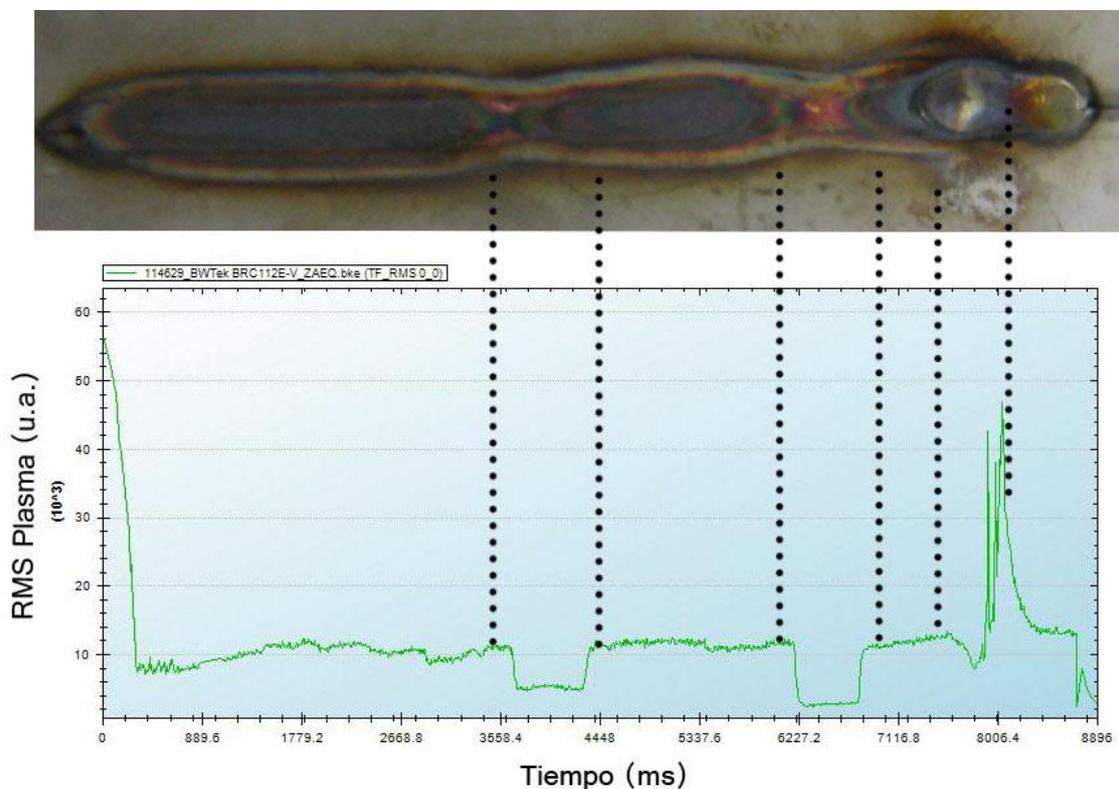


Ilustración 26 Correlación de la soldadura con los valores RMS obtenidos de la medición del espectro del plasma

En la figura siguiente se muestran los resultados de un tercer experimento, en el que las características fueron: corriente nominal  $I_H=100A$ , una bajada de corriente en el momento  $T_1=3$  seg de  $I_L=50A$ , y un corte del flujo del gas de protección en el momento  $T_2=5$  seg.

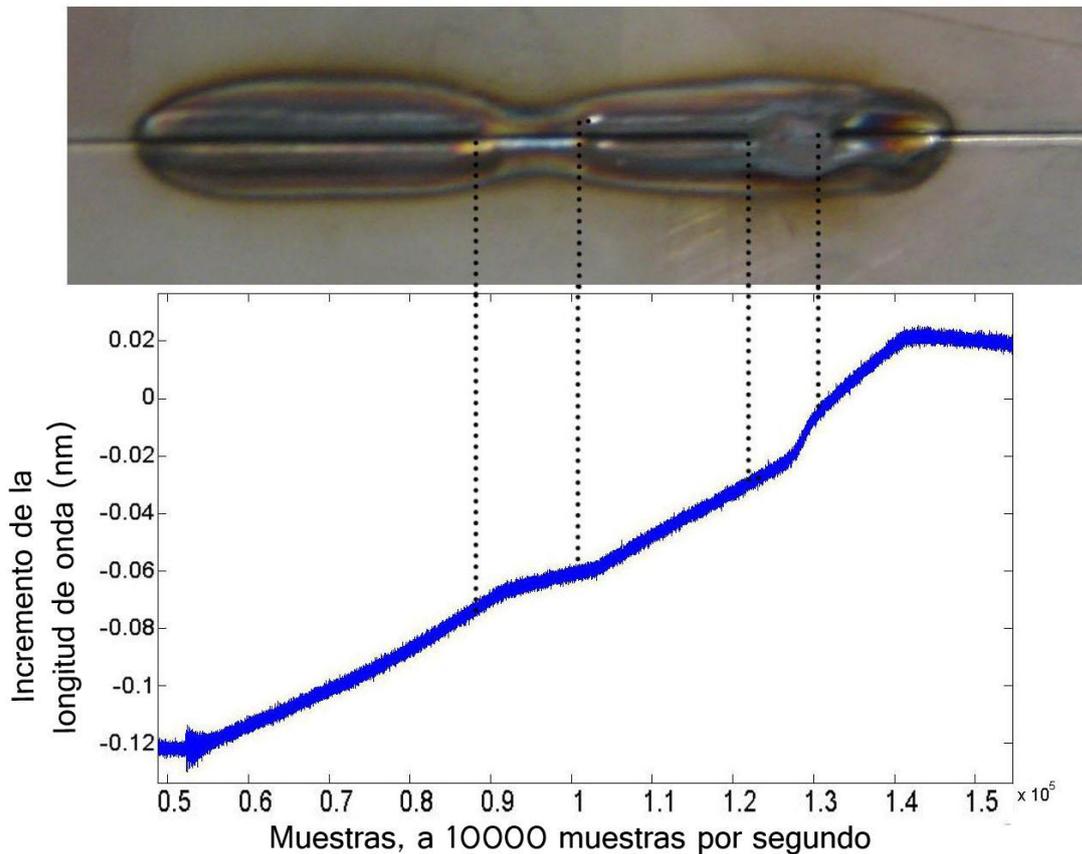


Ilustración 27 Resultado del cordón de soldadura correlado con los datos obtenidos del FBG en modo vela

En esta figura se muestra como los dos únicos cambios en la pendiente de la deriva térmica ocurren debidos a las dos perturbaciones provocadas. La primera tal y como se esperaba, una bajada de la pendiente provocada por la caída de corriente de  $I_H=100A$  a  $I_L=50A$ , y la segunda, el aumento de esta que acompaña al corte de gas de protección.

La validación experimental mediante la espectroscopía correla perfectamente las dos perturbaciones generadas con sus respectivas caídas en el valor RMS de las muestras del plasma.

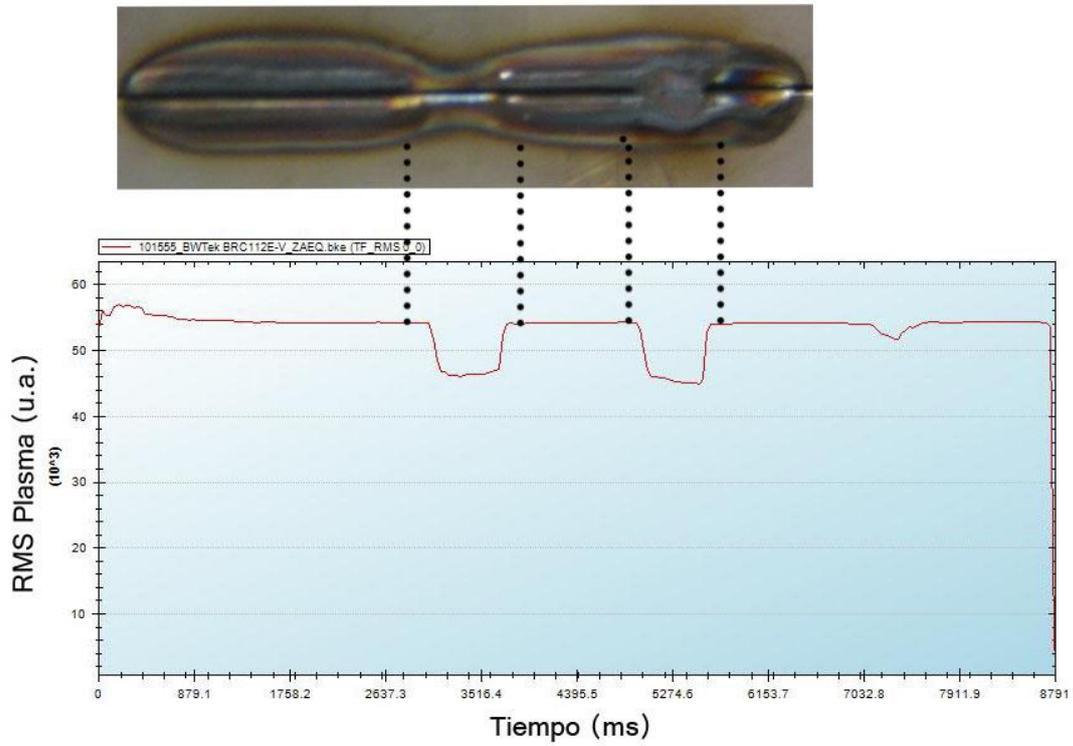


Ilustración 28 Correlación de la soldadura con los valores RMS obtenidos de la medición del espectro del plasma

Otro ejemplo se puede ver en la figura siguiente en la que se muestra la gráfica de los resultados medidos por el FBG para un test en el que se realizó una única falta, consistente en una bajada de corriente de  $I_H=100A$  a  $I_L=50A$ .

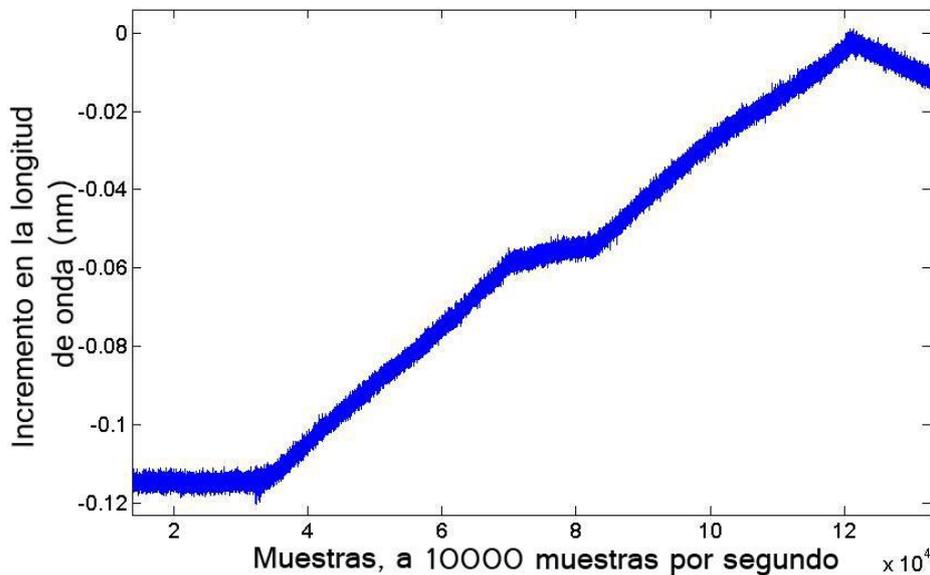


Ilustración 29 Resultados obtenidos por el FBG pasa soldadura en la que ha sido provocado una sola perturbación

Tal como se ha ido observando en los resultados mostrados anteriormente, se obtiene el resultado esperado, que es un único descenso en la pendiente de la curva de deriva térmica del proceso, ocasionada por un descenso puntual en la corriente de soldadura.

Al comparar esta gráfica con la de los anteriores experimentos se puede observar una mayor continuidad en la misma, debido a que sólo se ha introducido una perturbación en el test, y no tres como en los dos primeros, con lo que se consigue que el proceso sea mucho más estable, y se obtiene un caso que se puede acercarse más a un ejemplo real dado en un proceso industrial.

Los datos de la validación del test obtenidos mediante la espectroscopía se muestran a continuación. Se puede observar la correlación con la única perturbación generada, como un único descenso en el valor RMS.

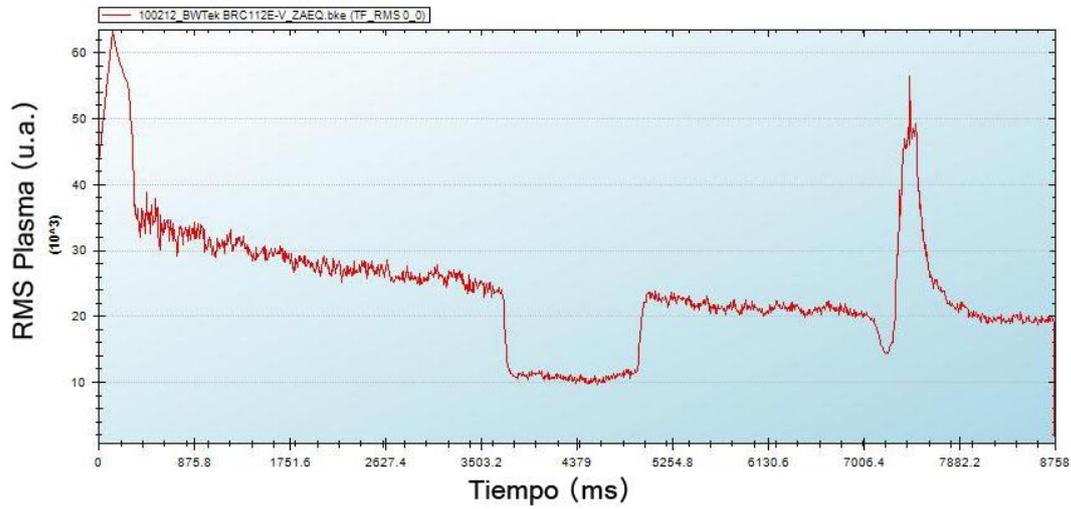


Ilustración 30 Valor RMS de las muestras grabadas por espectrómetro

### 3.3.3 Procesado de la señal

Como se ha visto en el anterior apartado, la detección de perturbaciones en la soldadura es posible con este sistema por inspección visual de la señal recogida por los FBGs. Aún así se ha realizado un procesado de esta señal con el fin de visualizar mejor los eventos ocurridos durante la soldadura.

Este procesado se ha llevado a cabo por medio de un simple programa realizado sobre la plataforma MATLAB. En él lo que se hace es recoger los datos obtenidos por el FBG, y determinar la pendiente en cada punto de la curva. Para ello se realiza un diezmado de la señal, ya que debido a la alta frecuencia de muestreo, el número de puntos recogidos es demasiado elevado para que el cálculo de la pendiente sea útil.

A continuación se muestra uno de los experimentos comentados en el anterior apartado.

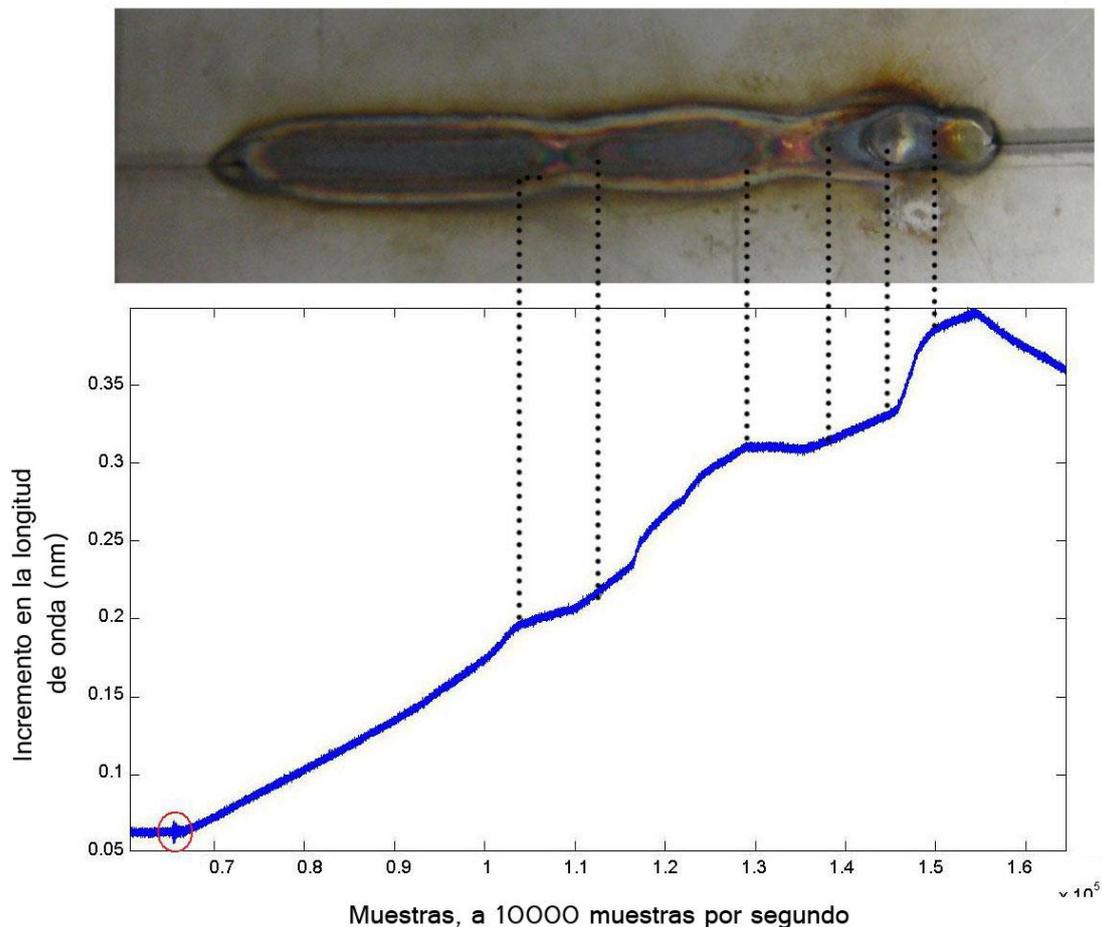


Ilustración 31 Resultados del experimento en comparación con el cordón final

En la siguiente figura se observa el resultado del procesado de la señal. Por un lado se ha dibujado la señal en sí, quedando ésta mucho más “fina” debido al diezmado, por otro lado se muestra la gráfica de la pendiente en cada punto de la señal.

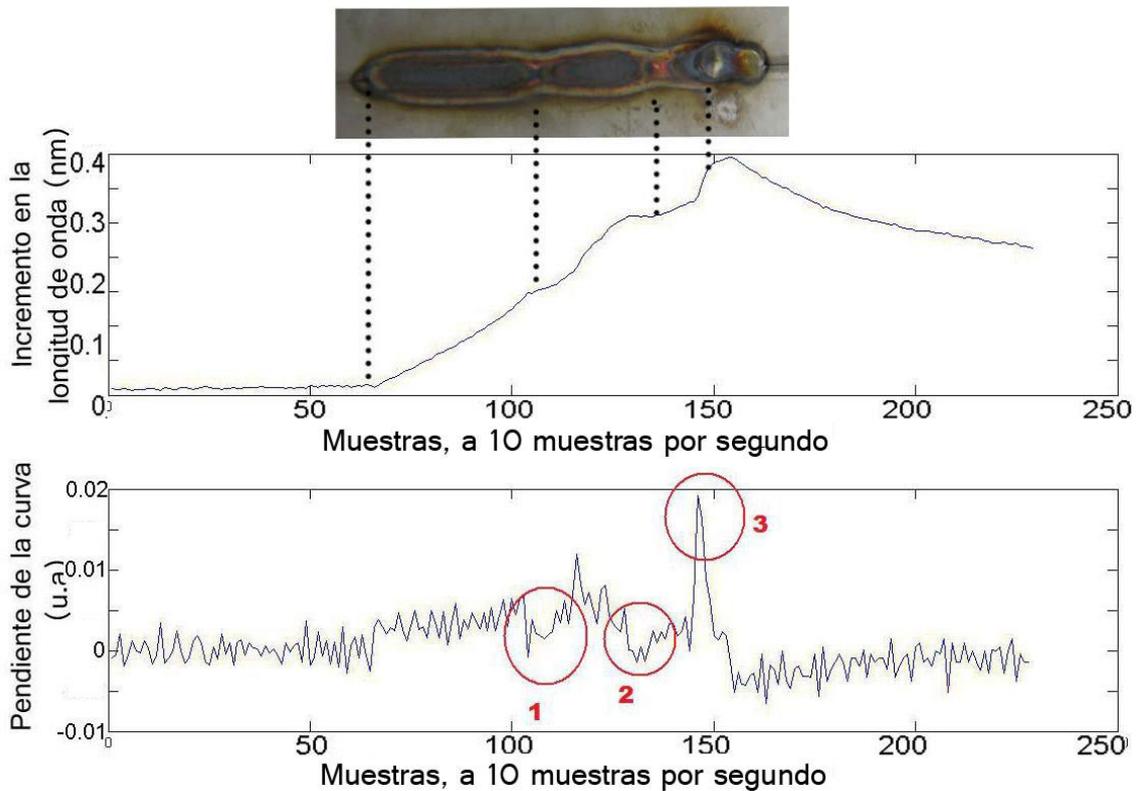


Ilustración 32 Comparación de la señal recogida con la pendiente en cada punto

Como ya se ha comentado, la generación de perturbaciones durante el proceso suele correlarse con cambios importantes en la temperatura del mismo, lo que a su vez se traduce en cambios en la pendiente de la señal recogida por los FBGs, por lo tanto los picos o depresiones más destacadas en la gráfica se pueden interpretar como fallos ocurridos durante el proceso.

En este caso en particular, se han destacado con tres círculos rojos los puntos en los que ha ocurrido un evento. Los dos primeros círculos señalan los puntos en los que ha ocurrido una bajada de corriente, lo que produce una caída en la pendiente de la curva, debido a la disminución de la temperatura del proceso. El tercer suceso corresponde a un pico de la gráfica, lo que indica un aumento rápido y significativo en la temperatura, en este caso debido al corte de gas de protección.

A la vista de estos resultados se puede afirmar que mediante esta tecnología se puede, no sólo monitorizar el proceso de soldadura para la detección de perturbaciones en el mismo, sino que además se es capaz, al menos en este caso en particular, de distinguir si el evento corresponde a un tipo de perturbación o a otra.

Como segundo ejemplo se ha escogido el test estudiado en el apartado anterior en el que se ha generado una bajada de corriente de  $I_H=100A$  a  $I_L=50A$ . La gráfica de los datos recogidos por el FBG es:

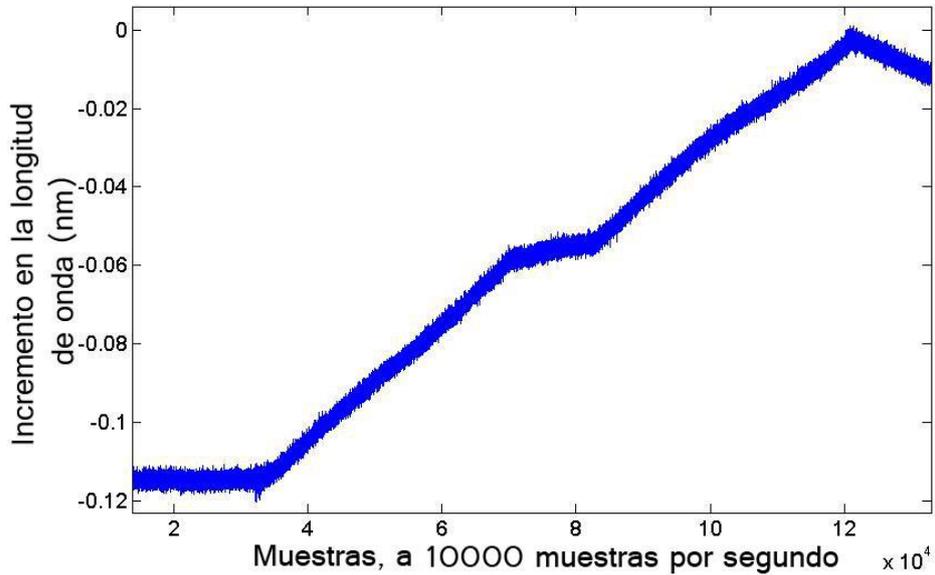


Ilustración 33 Resultados obtenidos por el FBG pasa soldadura en la que ha sido provocado una sola perturbación.

Los resultados obtenidos tras el procesado de esta señal son:

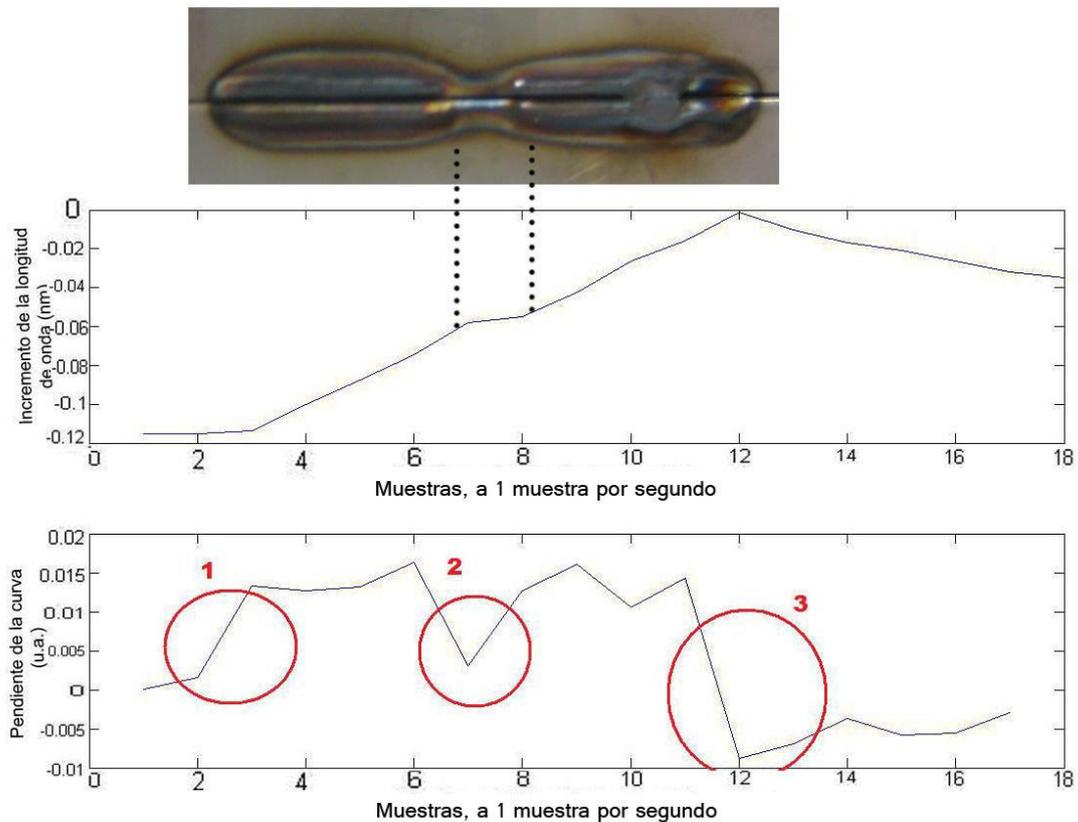


Ilustración 34 Comparación de la señal diezmada con los resultados obtenidos tras procesado

En la segunda gráfica de la figura anterior, la correspondiente a la pendiente de la señal, se han reseñado mediante círculos los tres eventos detectados tras el procesado. Primero y el tercero corresponden al inicio y fin del proceso, por este motivo el primero coincide con una pendiente positiva, que significa un aumento en la temperatura del proceso. El tercero por su parte tiene una pendiente negativa, lo que significa el fin y enfriamiento del proceso.

El círculo marcado con un "dos" indica la detección de la perturbación en la soldadura, la bajada de corriente de  $I_H=100A$  a  $I_L=50A$ . Esto se explica como un menor calentamiento en la pieza, lo que lleva a una pendiente negativa como se puede observar.

## 4. Conclusiones y líneas futuras

A la vista de los resultados obtenidos se detallan tanto las conclusiones a las que se han llegado tras el estudio experimental, como las posibles líneas futuras que quedan abiertas para la investigación.

Durante la ejecución de este proyecto se ha intentado realizar la detección de diferentes perturbaciones en la soldadura monitorizando variables físicas que rodean al proceso, para ello se han utilizado dos configuraciones diferentes para los sensores FBG: por un lado varios de estos sensores en una única fibra, y pegados directamente en las piezas a soldar, por otro lado un único sensor colocado en un soporte plástico a escasos centímetros del plasma, con el que se monitorizan las perturbaciones generadas por el plasma en el aire circundante al mismo.

Los resultados obtenidos pueden ser considerados como satisfactorios ya que se ha demostrado experimentalmente la capacidad de dichos sensores para captar cambios en las propiedades físicas del proceso.

En un principio lo que se quiso medir fueron las ondas sonoras generadas por el plasma por medio de un micrófono, tras varias pruebas se evidenció la dificultad para la realización de un sistema sensor mediante este enfoque, ya que no se consiguió el aislamiento de la señal deseada respecto al ruido que rodea el proceso.

Posteriormente se decidió implementar el sistema sensor utilizando redes de difracción grabadas en fibra óptica (FBG). Con ello se quería medir las ondas de choque en el aire circundante al plasma. Una vez realizados varios experimentos y a la vista de los datos se ha constatado la sensibilidad de dichos sensores para medir la temperatura del proceso.

Gracias a ello ha sido posible observar la curva de temperatura del proceso, y ver en ella cambios originados por fallos en la estabilidad del proceso, es decir, perturbaciones o posibles fallos en la soldadura. Con esto que queda demostrada la capacidad de los FBG para la detección de fallos en el proceso de soldadura.

A la vista de los resultados se destaca la configuración del FBG en “modo vela” o sin contacto, ya que con él se han obtenido mediciones mucho más claras y precisas. Pero esa no es la única ventaja, pensando en su aplicación práctica en la industria es mucho más cómodo ya que no hay que modificar las piezas en ningún sentido, ni es necesario realizar un proceso de pegado, lo cual puede resultar un estorbo además de contraproducente.

Este trabajo corresponde al comienzo de un proceso que podría llegar a la implementación de un sistema *online* y autónomo para la monitorización del proceso de soldadura. Por lo tanto quedan abiertas posibles líneas futuras de investigación en las que se podría diseñar un software capaz de recoger los datos que se graban por el interrogador al que está conectada la fibra óptica, y mediante un sencillo algoritmo se detecten cambios en la pendiente de la curva térmica del proceso, los cuales se podrían atribuir no solo a perturbaciones en la soldadura, sino también a eventos como por ejemplo el comienzo o fin de la generación del cordón.

Un sistema para la monitorización *online* realizado mediante esta tecnología resultaría realmente interesante para la industria, ya que dotaría al proceso de soldadura de una gran ventaja en cuanto a la productividad del mismo. Se disminuirían los costes en tiempo y dinero asociados a las pruebas a las que se exponen las piezas a posteriori (ensayos no destructivos).

Además, este sistema se podría implementar de una forma realmente sencilla, que su colocación no afectaría a las piezas o a la maquinaria, y que cualquier técnico podría manejarlo fácilmente con una mínima formación.

## Anexo

A continuación se muestra la instrumentación utilizada para la realización de los test en el laboratorio:

### ESPECTRÓMETROS

#### Ocean Optics USB2000



Espectrómetro CCD  
Dimensiones: 89 x 63 x 34 mm  
Peso: 190 gramos  
Detector: Sony ILX511  
Nº píxeles: 2048  
Rango espectral: 195 – 535 nm  
Tamaño píxel: 14 x 200  $\mu\text{m}$   
Tamaño ranura: 1 mm  
Conector óptico: SMA 905  
Resolución óptica:  $\sim 0.3$  nm  
Tiempo integración: 3 ms a 65 s  
Resolución A/D: 12 bit

Ilustración 35 Espectrómetro Ocean Optics USB2000

**Ocean Optics HR4000**

Ilustración 36 Espectrómetro CCD: Ocean Optics HR400

Espectrómetro CCD  
Dimensiones: 149 x 105 x 45 mm  
Peso: 570 gramos  
Detector: Toshiba TCD1304AP  
Nº píxeles: 3648  
Rango espectral: 370 – 500 nm  
Tamaño píxel: 8 x 200  $\mu\text{m}$   
Tamaño ranura: 1 mm  
Conector óptico: SMA 905  
Resolución óptica:  $\sim 0.03$  nm  
Tiempo integración: 10  $\mu\text{s}$  a 65 s  
Resolución A/D: 14 bit

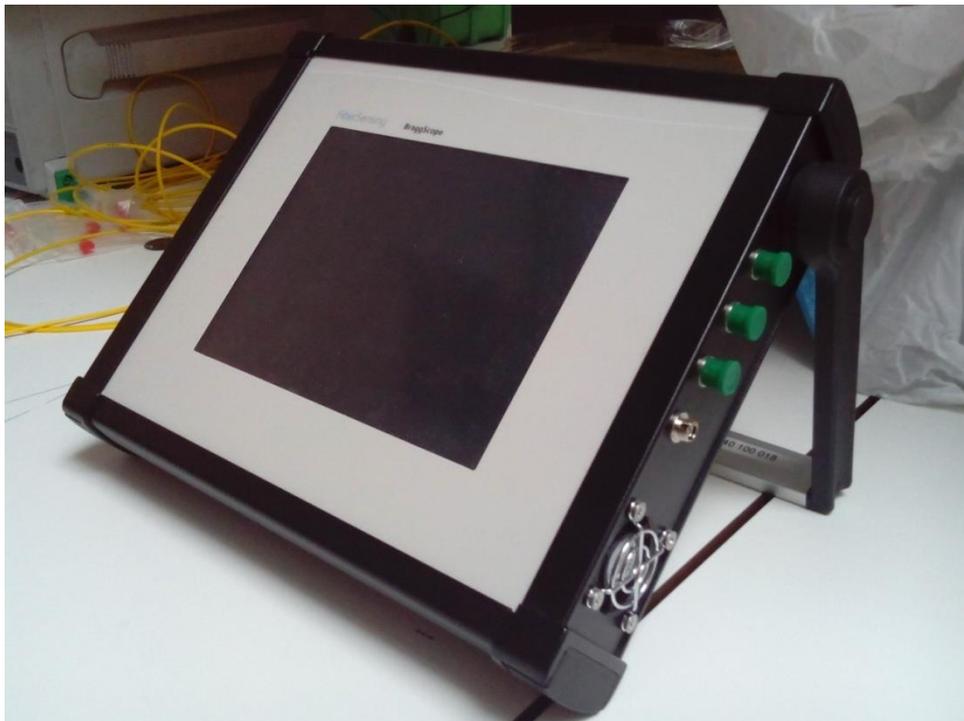
**UNIDADES INTERROGADORAS**

Ilustración 37 Unidad interrogadora FibersensingBraggScope

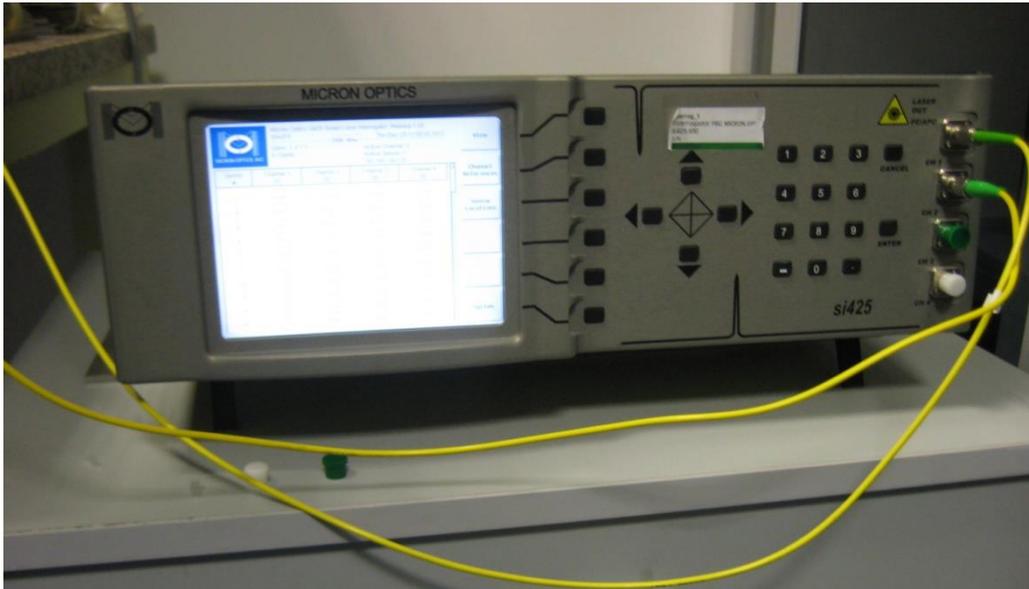


Ilustración 38 Unidad interrogadora Micron

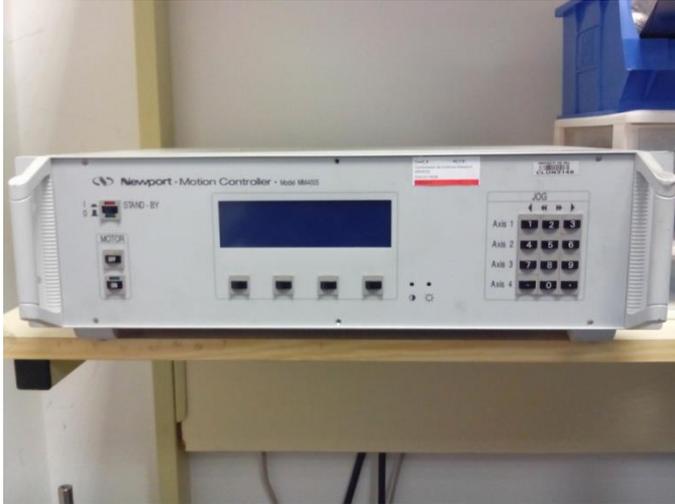
#### FUENTE DE ALIMENTACION TIG



Ilustración 39 Fuente de alimentación Mastertig 2200 de Kempfi

Kempfi Mastertig 2200  
Rango: 5 A / 10 V - 220 A / 18.8 V  
Ignición mediante arco alto voltaje y frecuencia  
Control de rampa y pulsador  
Dimensiones: 385 x 152 x 410 mm  
Peso: 16 kg

## 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

Trayectorias lineales y circulares (interpolación)

Ilustración 40 Controlador de motores Newport MM4005

## CONTROL DE GAS DE PROTECCIÓN

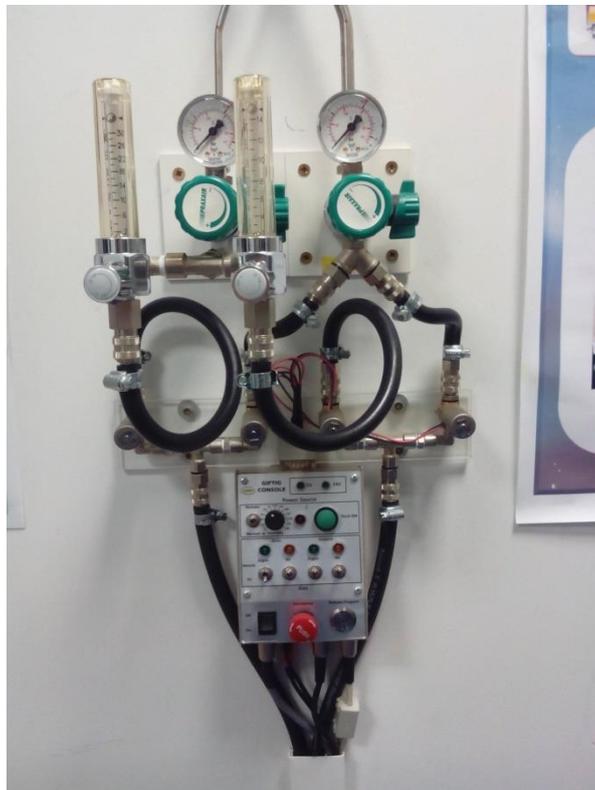


Ilustración 41 Control de flujo de gas de protección

**ANTORCHA TIG**

Kemppi TTC 220

DC: 220 A

Refrigeración por gas

Diámetro electrodos: 1 a 3.2  
mm

Gas/corriente: 1/4

Ilustración 42 Antorcha TTC 200 de Kemppi

SOFTWARE DE CONTROL WELDSTORM

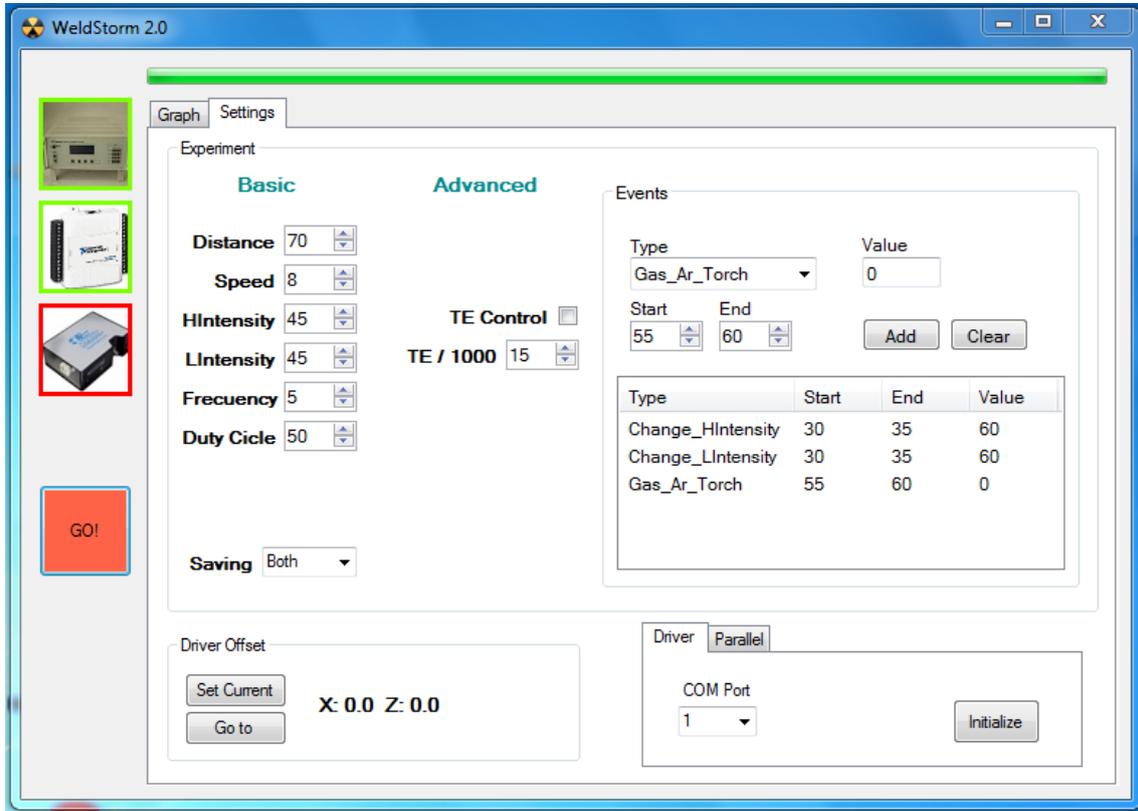


Ilustración 43 Captura de pantalla de software de control Weldstorm

## Bibliografía:

- [1] J. Mirapeix Tesis Doctoral: “Contribuciones a la supervisión y optimización de procesos de soldadura mediante espectroscopía óptica de plasmas”
- [2] <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/12133-Sistemas-de-control-y-monitorizacion-para-la-soldadura.html>
- [3] David Ibañez Cervera “Monitorización del proceso de soldadura mediante visión artificial y fuentes de iluminación láser y LED”
- [4] Suarez J C, Remartínez B, Menéndez J M, Guemes A and Molleda F 2003 Optical fibre sensors for monitoring of welding residual stresses J. Mater. Process. Technol. 143–144 316–20
- [5] PMGP Moreira<sup>1</sup>, O Frazao<sup>2</sup>, S M O Tavares<sup>1</sup>, M A V de Figueiredo<sup>1</sup>, M T Restivo<sup>1</sup>, J L Santos<sup>2</sup> and P M S T de Castro<sup>1</sup> Temperature field acquisition during gas metal arc welding using thermocouples, thermography and fibre Bragg grating sensors
- [6] V Richter-Trummer<sup>1</sup>, S O Silva<sup>2</sup>, D F C Peixoto<sup>1</sup>, O Frazão<sup>2</sup>, P M G P Moreira<sup>3</sup>, J L Santos<sup>2</sup> and P M S T de Castro<sup>1</sup>  
  
Fibre Bragg grating sensors for monitoring the metal inert gas and friction stir welding processes
- [7] Approaches based on plasma optical spectroscopy for real-time quality analysis of welding processes  
José Julián Valdiande Gutiérrez. Departamento de Fotónica, Universidad de Cantabria.