

# Espectroscopía de imagen aplicada al monitorizado *on-line* de soldaduras de arco y láser

## Imaging spectroscopy for arc and laser welding on-line monitoring

Jesús MIRAPEIX, Pilar Beatriz GARCÍA-ALLENDE, Adolfo COBO, Olga M<sup>a</sup> CONDE, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA

Grupo de Ingeniería Fotónica, Dpto. TEISA, Universidad de Cantabria, Laboratorios de I+D+i en Telecomunicaciones, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander

Persona de contacto: Jesús MIRAPEIX (mirapeixjm@unican.es).

### RESUMEN:

El monitorizado espectroscópico de la emisión de plasmas térmicos generados en los procesos de soldadura industrial por arco y láser ha probado ser efectivo para detectar, en tiempo real, posibles defectos que afecten a la calidad final del proceso, ya que se ha demostrado una relación directa entre algunos parámetros espectroscópicos, como la temperatura electrónica del plasma, con la calidad del cordón resultante. En este artículo se propone el uso de la espectroscopía de imagen, que permite resolver espacialmente la información espectroscópica del arco o la pluma de soldadura. Se presentan resultados experimentales en los que se analizan las ventajas derivadas de disponer de información espacial de la columna del plasma de soldadura en las imágenes hiperespectrales obtenidas.

**Palabras clave:** Espectroscopía de imagen, Imagen hiperespectral, Soldadura de arco, Soldadura láser, Control de calidad.

### ABSTRACT:

The spectroscopic monitoring of the thermal plasma emission in arc and laser welding processes is an effective technique for real-time defect detection and quality control, as there is a direct correlation between some spectroscopic parameters, e.g. the plasma electronic temperature, and the resulting seam quality. In this paper, we propose to use imaging spectroscopy for this application to resolve the spatial information within the arc or the welding plume. Experimental welding tests are analyzed to elucidate whether the additional spatial information regarding the plasma column could be used to improve the monitoring system.

**Key words:** Imaging spectroscopy, Hyperspectral imaging, Arc welding, Laser welding, Quality control.

## 1.- Introducción

En la actualidad se emplean diferentes técnicas espectroscópicas para dar solución a un amplio rango de problemas, desde la investigación biomédica [1] hasta el análisis de obras de arte y hallazgos arqueológicos [2]. Un nicho de aplicación interesante reside en la monitorización de procesos industriales para el control de la calidad, por ejemplo, en

el sector agro-alimentario [3]. Una variante de las soluciones espectroscópicas *convencionales* es la denominada hiperespectral o de imagen, en la que la información espectral está resuelta espacialmente, lo que permite circunscribir el análisis espectral a determinadas zonas dentro de un área más amplia de trabajo. Algunas aplicaciones industriales ya se han beneficiado de esta técnica, por ejem-

plo en la industria alimentaria [4] y del tabaco [5].

El análisis espectroscópico de procesos de soldadura es un campo activo de investigación en la actualidad. En este caso la espectroscopía es “de emisión”, ya que en aquéllos se genera de manera natural radiación óptica proveniente del plasma de soldadura. Este análisis puede ofrecer información sobre la calidad resultante de los cordones, lo que puede ser de gran interés en sectores en los que la integridad estructural de las piezas resultantes es crítica, tales como el sector aeroespacial o el nuclear.

Una primera posibilidad de análisis espectroscópico consiste en obtener una estimación de la temperatura electrónica del plasma  $T_e$ , un parámetro cuyas variaciones pueden ser indicativas de problemas en el proceso y de posibles defectos [6]. Sin embargo, un sistema espectroscópico convencional que trate de obtener una estimación de este parámetro realizará necesariamente una integración en todo el área definido por la óptica de captura de luz. Se pierde por tanto la posibilidad de resolver espacialmente las propiedades del plasma (es decir, del arco o de la pluma de soldadura).

En este trabajo se propone el uso de espectroscopía de imagen para analizar el comportamiento del plasma en procesos de soldadura de arco, evaluando si la resolución espacial que proporciona esta técnica permite mejorar el comportamiento de sistemas espectroscópicos convencionales en su aplicación a la detección de defectos y control de calidad.

## 2.- Espectroscopía de emisión de plasmas

El análisis espectroscópico de plasmas térmicos se basa usualmente en la estimación de la denominada temperatura electrónica del plasma  $T_e$ . Este parámetro tiene sentido si se supone que el plasma es ópticamente delgado y está equilibrio termodinámico local, lo cual es típicamente asumido bajo ciertas condiciones para procesos de soldadura de arco [7].

La aproximación más usual se basa en la ecuación (1), a partir de las intensidades de dos líneas de emisión de un mismo elemento químico en el mismo estado de ionización [8]:

$$T_e = \frac{E_m(2) - E_m(1)}{k \ln \left[ \frac{E_m(1)I(1)A(2)g_m(2)\lambda(1)}{E_m(2)I(2)A(1)g_m(1)\lambda(2)} \right]} \quad (1)$$

En la ecuación (1),  $E_m$  es el nivel superior de energía de la línea con intensidad relativa  $I$ ;  $A$  es la probabilidad de transición,  $g_m$  el peso estadístico y  $\lambda$  la longitud de onda.

Sin embargo, esta aproximación proporciona valores de la temperatura electrónica del plasma con una importante incertidumbre. Una estimación más precisa se obtiene con el método de *Boltzmann-plot*, una regresión que considera las intensidades de múltiples líneas espectrales:

$$\ln \left( \frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m} \right) = \ln \left( \frac{hcN}{Z} \right) - \frac{E_m}{kT_e} \quad (2)$$

En la ecuación anterior,  $N$  es la densidad de población del estado  $m$  y  $Z$  la función de partición.

En los casos anteriores, se obtiene un único valor de  $T_e$ , que se corresponde con la integración, en toda la columna de plasma, a través de la óptica de captura, típicamente un colimador o bien una fibra óptica situados a una determinada distancia del arco. Sin embargo, es posible obtener un mapa de los valores de  $T_e$  en diferentes puntos del plasma utilizando un proceso de deconvolución, tal como la inversión de Abel [9], aunque es una técnica computacionalmente muy costosa. La utilización de instrumentación específica, esto es, un espectrómetro de imagen, permite obtener la información espectral y espacial buscada de forma directa.

## 3.- Experimentos

Para la realización de los trabajos experimentales, se ha empleado un sistema de adquisición cuyo elemento fundamental es un espectrómetro de imagen tipo *pushbroom* conectado entre una óptica de entrada y un sensor CCD bidimensional. Este instrumento permite obtener información espectral resuelta a lo

largo de la línea enfocada por la óptica de entrada, proporcionando una imagen bidimensional en la que uno de los ejes es el espacial y el otro el espectral. En la figura 1 se muestra un esquema del montaje experimental.



Fig. 1: Montaje experimental mostrando el espectrómetro de imagen enfocado al punto de soldadura.

La versión V10 del espectrómetro de imagen ImSpector (*Specim Ltd.*) fue seleccionada, con un rango espectral entre 400 y 1000 nm, a la cual se le acopló una óptica Navitar Zoom 7000. Como sensor del setup hiperespectral se empleó una cámara digital monocroma Pixelink PL-A741 MV, con un rango espectral de 350 a 1000 nm y una resolución de 640x480 píxeles.

Con respecto a los experimentos de soldadura realizados, cabe mencionar que se

utilizaron chapas de acero inoxidable AISI-304, en los cuales se efectuaron cordones *bead-on-plate* (sin junta) por medio de un sistema de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas). En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos para dos cordones con corrientes de soldadura de 26 y 50 A, respectivamente. Para todos los ensayos se seleccionó Argón como gas de protección, con un flujo de 12 l/min en condiciones normales de operación. Tal y como cabría esperar, al utilizar una corriente de soldadura mayor la radiación óptica del plasma es más intensa. Este hecho puede apreciarse en las imágenes hiperespectrales capturadas por el sistema representadas en las Fig. 2(a) y (b). Como se indica en la imagen, el eje vertical de las imágenes hiperespectrales se corresponde con el eje espectral (entre 400 y 1000 nm aproximadamente). El eje espacial se ajustó de tal manera que la totalidad de la columna del plasma de soldadura quedase dentro del rango de observación del sistema.

Para poder establecer una comparativa con el enfoque espectroscópico “tradicional”, en las Fig. 2(c) (d) se han incluido espectros del plasma de soldadura adquiridos simultáneamente mediante un setup adicional, constituido por un espectrómetro CCD (Ocean Optics USB2000) con un rango espectral entre 195 y 535 nm) y una fibra óptica de 2 m de longitud y 50  $\mu\text{m}$  de diámetro.

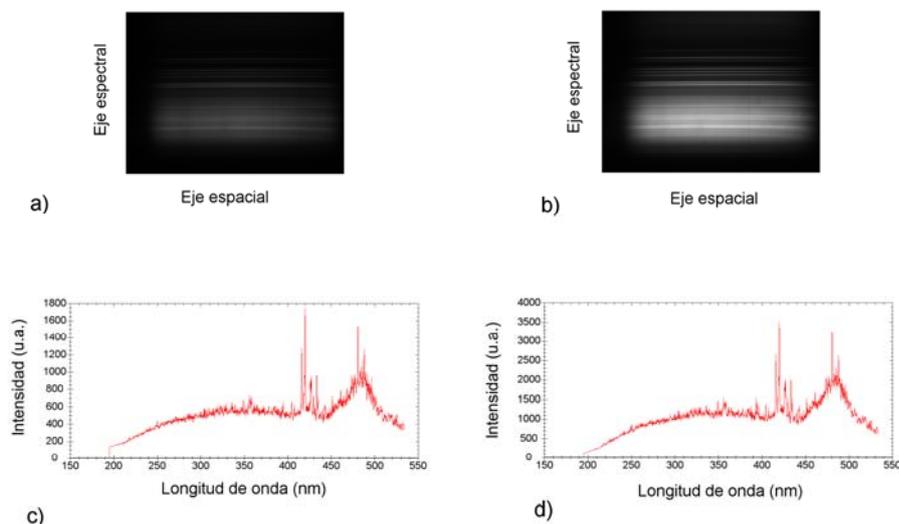


Fig.2: Imágenes hiperespectrales del plasma de soldadura para diferentes corrientes.

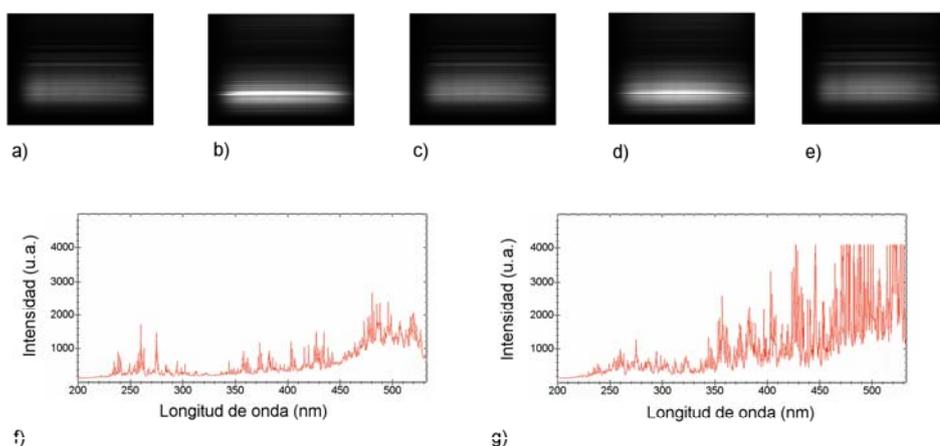


Fig.3: Espectros e imágenes hiperespectrales del plasma para cordón con defectos.

La capacidad de la espectroscopía de imagen para detectar la aparición de defectos de soldadura *on-line* fue puesta a prueba en el experimento representado en la Fig. 3. Para el cordón realizado con una corriente constante de 37 A se simularon dos perturbaciones sobre el flujo de gas de protección, reduciendo éste de 12 a 2 l/min durante aproximadamente medio segundo en 2 ocasiones (Fig. 3(b) y (d)). En la secuencia de imágenes hiperespectrales mostrada puede apreciarse claramente el efecto de la perturbación sobre el gas Ar. En las Fig. 3(f) y (g) se han incluido espectros correspondientes a soldadura correcta y defectuosa, respectivamente, adquiridos mediante el setup espectroscópico adicional.

Es interesante hacer notar como una de las principales potencialidades de la espectroscopía de imagen en este ámbito reside en la posibilidad de seleccionar determinadas regiones de interés o ROIs (*Region of interest*) sobre el espacio de la imagen, lo que permitiría una significativa reducción en el tiempo de procesado por muestra, siendo este un parámetro de especial relevancia en multitud de procesos de soldadura industriales, especialmente en el caso de la soldadura láser. Por otro lado, cuando se lleve a cabo la selección de una determinada ROI, será necesario hacer un estudio previo en el que se investigue la capacidad de discriminación de la ventana espacial y espectral seleccionada, ya que se sabe que no todas las combinaciones de estas dos dimensiones son igualmente

sensibles al efecto que los diversos defectos de soldadura pueden generar en el plasma.

Un estudio a este respecto se presenta en la Fig. 4, donde se estudia la respuesta espectral de la radiación del plasma de soldadura para el cordón con los defectos por perturbación del gas de protección. Dicha respuesta se ha generado promediando diferentes regiones espaciales del plasma de soldadura, desde la parte más externa hasta el centro de la columna del plasma de soldadura. A la vista de los resultados obtenidos puede concluirse que la longitud de onda óptima para la discriminación de este tipo de defectos sería la situada en el entorno de los 567 nm. Con respecto a la región espacial del plasma, para el caso estudiado sería conveniente seleccionar la región comprendida por los píxeles 636-640, ya que para ambos cortes de gas la respuesta a la citada banda espectral resulta significativa.

#### 4.- Conclusión

En el presente trabajo se ha explorado la posibilidad de utilizar la espectroscopía de imagen para la monitorización *on-line* de la calidad en procesos de soldadura, concretamente de arco. La espectroscopía óptica de plasmas es a día de hoy una de las más prometedoras soluciones de cara a conseguir una monitorización *on-line* de procesos de soldadura de arco y láser de manera eficiente y fiable. La radiación óptica proveniente del plasma de soldadura que se genera en estos procesos aporta información valiosa sobre la

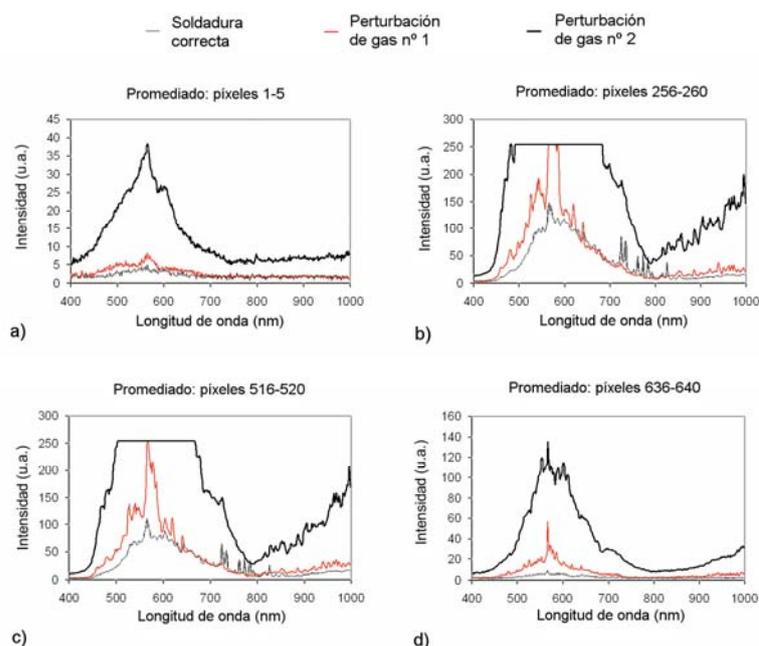


Fig.4: Respuestas espectrales promediadas para diferentes regiones del plasma de soldadura

dinámica del proceso. No obstante, existen aún ciertos aspectos a mejorar, como la incertidumbre relativa a la selección e identificación de las líneas de emisión del plasma, o la disminución en el tiempo de procesado requerido por muestra, especialmente cuando se trata de soldadura láser.

En este marco, la espectroscopía de imagen puede ser una alternativa a tener en cuenta, ya que las imágenes hiperespectrales obtenidas mediante esta técnica permiten disponer de información espacial acerca de la columna del plasma de soldadura. Esta información puede ser utilizada para seleccionar regiones de interés en las que, disminuyendo de manera muy significativa los requerimientos de procesado, la discriminación entre soldaduras correctas y la aparición de defectos sea posible. De hecho, en el presente artículo se ha presentado un estudio en este sentido, identificando la banda espectral y la región espacial del plasma de soldadura óptimos para llevar a cabo una eficiente discriminación de un defecto originado por una perturbación sobre el gas de protección.

Nuevos estudios dirigidos al análisis de diferentes defectos de soldadura se están realizando con el objeto de dilucidar la validez de

esta técnica para ser empleada en un sistema de monitorización industrial.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido cofinanciado por medio del proyecto TEC2007-67987-C02-01.

### Referencias

- [1] G. MUELLER, E. ROHDE, J. BEUTHAN, K. DORSCHER, U. BINDING, H.G. EBERLE, "Optoelectronic diagnostics in biomedical engineering," *Laser Phys.*, vol. 13, pp. 196-206, 2003.
- [2] P. VANDENABEELE, H.G.M. VANDENABEELE, L. MOENS, "A decade of Raman spectroscopy in art and archaeology," *Chem. Rev.*, vol. 107, pp. 675-686, 2007.
- [3] B.A. WEINSTOCK, J. JANNI, L. HAGEN, S. WRIGHT, "Prediction of oil and oleic acid concentrations in individual corn (*Zea mays* L.) kernels using near-infrared reflectance hyperspectral imaging and multivariate analysis," *Appl. Spectrosc.*, vol. 60, pp. 9-16, 2006.
- [4] B. PARK, K.C. LAWRENCE, W.R. WINDHAM, D.P. SMITH, P.W. FELDNER, "Hyperspectral imaging for food processing automation," *Proc. SPIE* vol. 4816, pp. 308-316, 2002.

- [5] P.B. GARCIA-ALLENDE, O.M. CONDE, J. MIRAPEIX, A. COBO, J.M. LOPEZ-HIGUERA, "Quality control of industrial processes by combining a hyperspectral sensor and Fisher's linear discriminant analysis," *Sens. Actuators, B Chem.*, vol. 129, pp. 977-984, 2008.
- [6] P. SFORZA, D. DE BLASIIS, "On-line optical monitoring system for arc welding," *NDT E. Int.*, vol. 35, pp. 37-43, 2002.
- [7] G.N. HADDAD, A. J.D. FARMER, "Temperature determinations in a free-burning arc:1. Experimental techniques and results in argon," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1189-1196, 1984.
- [8] A. MAROTTA, "Determination of axial thermal plasma temperatures without Abel inversion," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 27, pp. 268-272, 1993.
- [9] J.A. AGUILERA, C. ARAGON, "Characterization of a laser-induced plasma by spatially resolved spectroscopy of neutral atom and ion emissions. Comparison of local and spatially integrated measurements," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 59, pp. 1861- 1876, 2004.