

Estudio comparativo entre sistemas de monitorización *on-line* basados en espectrómetros y fotodiodos para la detección en línea de defectos de soldadura

Comparative study between on-line monitoring systems based on photodiodes or spectrometers for on-line welding defect detection

Jesús MIRAPEIX ⁽¹⁾, Rubén RUIZ, José J. VALDIANDE, Luis Rodríguez-Cobo, F. Anabitarte, J.M. López-Higuera, A. Cobo

1. Departamento TEISA, Edificio I+D Teleco, Universidad de Cantabria, Av. Los Castros s/n, 39005, Santander (Cantabria)

Persona de contacto: Jesús Mirapeix (jesus.mirapeix@unican.es).

RESUMEN:

En este trabajo se presenta un análisis experimental donde se compara el rendimiento del uso de fotodiodos dentro de un sistema de monitorización en línea de la calidad en soldadura, concretamente de arco. Dentro del ámbito de la espectroscopía óptica de plasmas aplicada a esta problemática, es típico el uso de espectrómetros CCD en el montaje óptico, ya que permiten un detallado análisis de los espectros del plasma de soldadura. Montajes basados en fotodiodos han sido empleados, pero típicamente orientados a detectar una defectología limitada, por ejemplo faltas de penetración. En este trabajo se ha estudiado la respuesta de un sistema basado en fotodiodos a diferentes defectos de soldadura simulados en el laboratorio. Los resultados indican que, especialmente mediante el uso de filtros ópticos centrados en regiones de interés, el uso de fotodiodos es viable para la detección de varios defectos de soldadura, lo que implica un importante ahorro frente a los montajes basados en espectrómetros CCD.

Palabras clave: espectroscopía óptica de plasmas, soldadura de arco, sistema de monitorización on-line, espectrómetro, fotodiodo, filtro óptico.

ABSTRACT:

An experimental analysis of the performance derived from the employment of photodiodes within an on-line welding quality monitoring system in comparison to the use of CCD-spectrometers is presented in this work. CCD-spectrometers are commonly chosen where plasma optical spectroscopy is to be applied for on-line welding diagnostics, given that they allow a detailed analysis of the welding plasma spectra. Setups based on photodiodes have been already studied, but they have been typically limited to the detection of some basic defects, e.g. lack of penetration. The response of a photodiode-based system to different weld flaws simulated in the laboratory has been analyzed in this contribution. The obtained results suggest that, especially if optical filters are included, the employment of photodiodes is suitable to detect several defects, thus implying a significant reduction in terms of system costs.

Key words: plasma optical spectroscopy, arc-welding, on-line monitoring system, spectrometer, photodiode, optical filter.

1.- Introducción

La monitorización en línea y, por tanto, en tiempo real de procesos de soldadura, tanto láser como de arco, es actualmente un problema sin una solución definitiva y, por consiguiente, una temática activa desde el punto de vista de investigación. La solución más extendida a nivel comercial la constituyen los sistemas basados en el seguimiento de la tensión y corriente de soldadura [1]. Se trata de enfoques fiables e interesantes para trabajar sobre una ventana de proceso, pero no son capaces de detectar, en términos generales, algunos defectos como los provocados por desvíos de trayectoria, perturbaciones del gas de protección, detección de elementos no deseados en la junta, etc. [2]. Existen otras soluciones basadas en diferentes enfoques, como el uso de visión artificial [3], el análisis de la emisión acústica generada durante el proceso [4] o la termografía infrarroja [5], por citar algunos ejemplos.

En este contexto la espectroscopía óptica de plasmas ha venido siendo investigada y aplicada en los últimos años, tanto en soldadura láser como de arco [6,7]. El enfoque típico se ha basado en el uso de espectrómetros para poder resolver de manera adecuada las líneas de emisión pertenecientes a los diferentes elementos constituyentes del plasma de soldadura. Estas líneas se emplean posteriormente para estimar la temperatura electrónica del plasma T_e [6,7], o bien algún otro parámetro espectroscópico que sirva de variable de monitorización, como la relación línea-continuo [8] o el valor RMS del espectro adquirido [2]. Frente al uso del espectrómetro, algunos autores, especialmente al comienzo de la investigación en este campo, emplearon fotodiodos en las bandas ultravioleta, visible e infrarrojo cercano para adquirir la radiación óptica del plasma y proceder a su posterior análisis. Este enfoque se ha utilizado principalmente para la detección de defectos tales como falta de penetración [9], pero su uso se ha visto relegado por los espectrómetros-CCD de bajo coste, y no se conoce ningún estudio en el que se analice de manera detallada su capacidad para detectar una defectología extensa en función de los rangos espectrales seleccionados. La principal ventaja del uso de fotodiodos se centra en

el gran ahorro que supone frente a un *setup* convencional basado en espectrómetros, ya que su coste puede cifrarse en algo menos de un orden de magnitud. En este trabajo se presenta un estudio comparativo entre la capacidad de detectar diferentes defectos de soldadura de arco por medio de un espectrómetro CCD y de un fotodiodo con el que se emplean filtros ópticos para seleccionar bandas espectrales de especial interés.

2.- Espectroscopía óptica de plasmas

Como se comentó en la sección anterior, la temperatura electrónica del plasma T_e es el parámetro espectroscópico típicamente elegido para ser usado como variable de monitorización. Para su estimación pueden seguirse diferentes técnicas, siendo la comúnmente empleada una aproximación derivada del conocido como *Boltzmann-plot* [10] que permite utilizar únicamente un par de líneas de la misma especie (mismo elemento en el mismo estado de ionización) en el proceso. Aunque diversos autores han demostrado la correlación existente entre los perfiles de T_e y los eventos asociados a la calidad de los cordones resultantes [6,7], existen otras alternativas que pueden resultar igualmente interesantes. De especial interés en términos de su utilización para una monitorización en tiempo real puede resultar la conocida como "línea-continuo", donde la línea empleada no necesita ser identificada (asociada a su especie correspondiente), lo que es costoso desde el punto de vista de la carga computacional del sistema [8]. De hecho, el método línea-continuo está originalmente pensado como una alternativa al cálculo de T_e según la siguiente expresión:

$$\frac{\varepsilon_l(\lambda)}{I_c} = 2.0052 \times 10^{-5} \frac{A_m g_m}{Z_i} \frac{1}{T_e \xi} \exp\left(\frac{E_i - E_m}{kT_e}\right) \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

donde ε_l es la intensidad asociada a la línea integrada sobre el perfil de ésta, I_c es la intensidad de la radiación de fondo (continuo) a la longitud de onda de la línea seleccionada (sin integrar), Z_i es la función de partición de los iones, ξ el factor de corrección libre-ligado del continuo, E_i el potencial de ionización y $\Delta\lambda$ el ancho de banda. Para obtener la temperatura a partir de (1) es necesario emplear un método iterativo. En cualquier caso

dicho enfoque no tiene sentido en un ámbito de análisis en tiempo real, por lo que en [11] se propuso utilizar directamente la relación entre la intensidad de la línea y la del continuo asociado I_L/I_C como parámetro de monitorización.

Otra alternativa que puede resultar apropiada para estudios preliminares, especialmente cuando no se conocen los elementos que participan en el proceso o las líneas de emisión idóneas para el análisis, consiste en calcular el valor RMS del plasma para cada captura espectral:

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2}, \quad (2)$$

siendo n es el número de píxeles del CCD del espectrómetro y x_i la intensidad correspondiente al píxel i -ésimo. S_{RMS} constituye una medida indirecta de la energía del espectro del plasma dentro del rango espectral considerado, estando relacionado también con la potencia total del arco eléctrico, y por tanto con el aporte térmico del proceso.

Estos parámetros espectroscópicos se emplearán durante el análisis de los experimentos de laboratorio para establecer la comparación entre los resultados del espectrómetro y los fotodiodos.

3.- Resultados experimentales

Para llevar a cabo los experimentos de laboratorio se empleó un montaje de soldadura de arco ampliamente descrito en [12], utilizando chapas de acero inoxidable AISI-304 de diferentes espesores. Desde el punto de vista óptico el espectrómetro seleccionado fue un *BWTEK BCR112E* con 2048 píxeles y un rango espectral de 200 a 975 nm. El fotodiodo (Si) escogido fue un *DET36A (Thorlabs)*, que se empleó conectado directamente a un colimador enfocado en la columna del plasma de soldadura. La señal eléctrica del fotodiodo se transmitió a un PC por medio de una unidad adquisidora de datos (*National Instruments USB-6009*) junto con un circuito amplificador de ganancia variable. A la entrada óptica del fotodiodo se colocaron, en función de los experimentos, uno de los tres filtros ópticos seleccionados, con longitudes de onda de 480, 766 y 780 nm, y ancho de

banda de aproximadamente 10 nm. En la Fig. 1 se muestra una imagen del montaje óptico descrito.



Fig. 1: Imagen y detalle del montaje óptico.

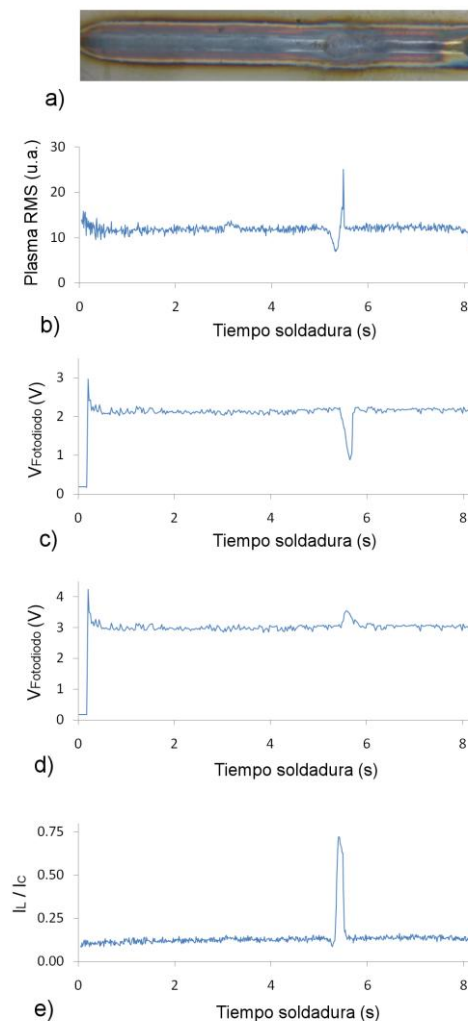


Fig. 2: Soldadura defectuosa (perturbación en el gas de protección).

En la Fig. 2 se presentan los resultados derivados de un experimento en el que se simuló una perturbación en el gas de protección (Argón). La Fig. 2(b) muestra el resultado de la señal Plasma-RMS, donde se aprecia una clara perturbación asociada al defecto, al igual que en la Fig. 2(e), donde se ha empleado el método línea-continuo. Las Figuras 2(c) y (d) muestran los resultados obtenidos con los fotodiodos, en el primer caso con el filtro de 766 nm y el segundo con el de 780 nm. Como puede apreciarse la respuesta al defecto es sensiblemente mejor para el primer filtro. Esto puede explicarse por las líneas de emisión incluidas en las respuestas en ambos casos, existiendo una línea relevante de Ar I dentro del rango del filtro de 766 nm (en 763.5 nm); mientras que el segundo filtro la contribución principal vendrá dada por la radiación de continuo, al no contener ninguna línea significativa.

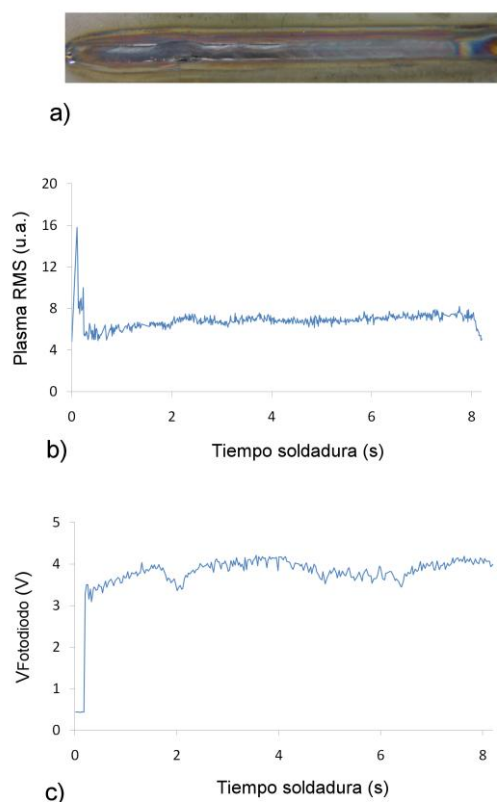


Fig. 3: Soldadura defectuosa (chapas con diferentes espesores).

Otra situación analizada fue la resultante de una soldadura realizada entre dos chapas con diferentes espesores. En la Fig. 3(a) puede apreciarse una sección claramente defectuosa

al comienzo del cordón. Si bien existe una ligera perturbación en la señal RMS del espectrómetro (Fig. 3(b)), el defecto es más aparente en el perfil del fotodiodo con el filtro de 766 nm de la Fig. 3(c).

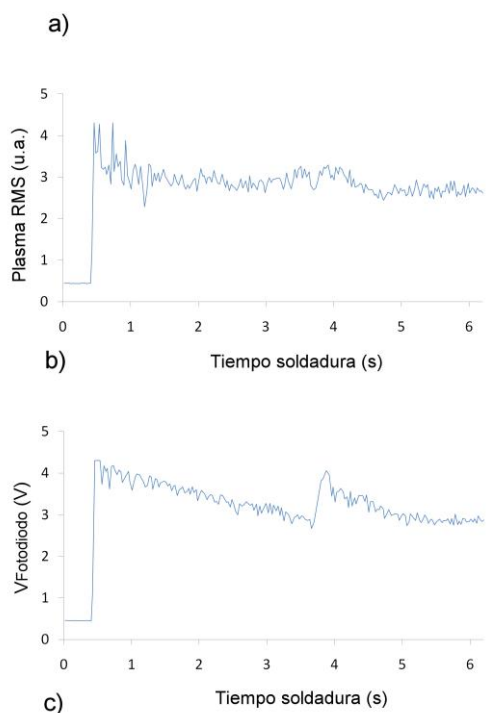


Fig. 4: Soldadura defectuosa (presencia de suciedad en la junta).

En muchos procesos de soldadura donde la calidad es un aspecto relevante la limpieza de las chapas, que en muchas ocasiones son tratadas (por ejemplo con acetona) y soldadas en áreas limpias, es un punto clave para evitar la aparición de defectos. En el cordón de la Fig. 4(a) se colocó un poco de pintura en la junta, simulando de este modo la presencia de suciedad. El resultado es una soldadura claramente defectuosa, siendo la pintura arrastrada por el arco durante el proceso. Las gráficas de las Fig. 4(b) y (c) se corresponden a las señales provenientes de los fotodiodos sin y con filtro (480 nm), respectivamente.

te. Como puede apreciarse, el uso del filtro mejora sensiblemente la detección del defecto estudiado.

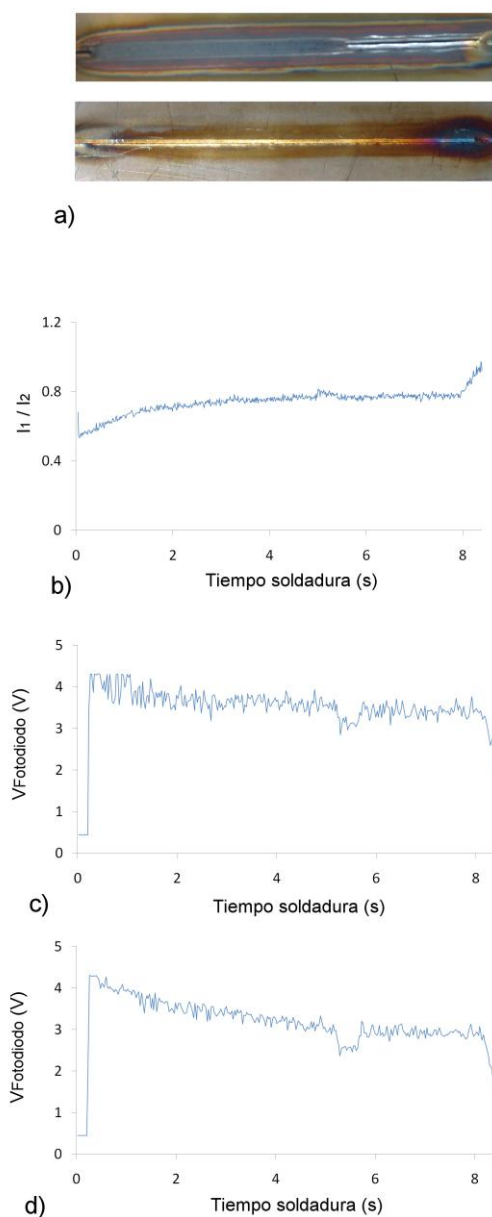


Fig. 5: Soldadura defectuosa (variación en la corriente de soldadura).

En la Fig. 5(a) se presentan tanto la parte superior como inferior de un cordón en el que, en la parte superior, se aprecia claramente una sección defectuosa. Curiosamente la simulación de este defecto (variación en la corriente de soldadura de 105 a 95 A) no abarcó toda la sección que puede apreciarse en la imagen, si no que duró algo menos de un segundo, como se puede observar en los

perfiles de las Figuras 5 (c) y (d). En estas se ilustra como el uso del filtro óptico (en este caso de 480 nm) mejora la respuesta de la señal de monitorización resultante, al ser ésta menos ruidosa y, por tanto, mejor desde el punto de vista de una detección automática de los defectos sobre los perfiles. En la Fig. 5 (b) se muestra el perfil I_1 / I_2 con las intensidades de las líneas de Ar II en 480.60 y 487.99 nm.

4.- Conclusión

En este trabajo se ha presentado un análisis comparativo de los resultados ofrecidos por un sistema de monitorización de la calidad de soldadura basado en el uso de un espectrómetro CCD o de fotodiodos con filtros ópticos. Los resultados de los diferentes experimentos, donde se han simulado varios defectos de soldadura, indican la viabilidad del empleo de montajes basados en fotodiodos para la detección de una defectología extensa. Se ha demostrado que el uso de filtros ópticos mejora de manera sensible las señales de monitorización resultantes, siendo éstas menos ruidosas y permitiendo una detección más clara de los defectos.

Resulta evidente que la selección de un espectrómetro permite un análisis espectroscópico más complejo y completo, pudiendo acceder a las diferentes líneas de emisión de las especies que participan en el plasma. Sin embargo, en este trabajo se ha demostrado que el uso de fotodiodos junto a filtros ópticos permite detectar diferentes defectos, lo que puede ser de interés en muchos escenarios donde un ahorro de costes en el sistema de monitorización sea recomendable. Para el montaje óptico utilizado en este artículo existe una diferencia de un orden de magnitud en el coste de ambos montajes.

En función de los resultados presentados, sería interesante realizar un estudio más exhaustivo de las bandas espectrales a seleccionar por medio de los filtros ópticos, quizás por medio de una estrategia basada en algoritmos de selección de características, como la sugerida en [8]. La realización de pruebas de campo en diferentes entornos sería interesante para validar la propuesta aquí descrita.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido cofinanciado por medio del proyecto TEC2010-20224-C02-02 y las becas AP2009-1403 y AP2007-02230.

Referencias

- [1] L. LI, D.J. BROOKFIELD, W.M. STEEN, "Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process", *Measurement Science & Technology*, vol. 7, pp. 615-26, 1996.
- [2] J. MIRAPEIX, A. COBO, J. FUENTES, M. DAVILA, J.M. ETAYO, J.M. LOPEZ-HIGUERA "Use of the Plasma Spectrum RMS Signal for Arc-Welding Diagnostics", *Sensors*, vol. 9(7), pp. 5263-5276, 2009.
- [3] R. KOVACEVIC, Y.M. ZHANG, S. RUAN, "Sensing and control of weld pool geometry for automated GTA welding", *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, vol. 117, pp. 210-22, 1995.
- [4] H. GU, W.W. DULEY, "Statistical approach to acoustic monitoring of laser welding", *J Phys D*, vol. 29, pp. 556-60, 1996.
- [5] B. Venkatraman, B. Raj, M. Menada, "Online Infrared detection of inclusions and lack of penetration during welding", *Materials Evaluation*, vol. 63, no. 9, pp. 933-937, 2005.
- [6] P. SFORZA, D. DE BLASIIS, "On-line optical monitoring system for arc welding" *NDT E. Int.*, vol. 35, pp. 37-43, 2002.
- [7] A. ANCONA, V. SPAGNOLO, P.M. LUGARA, M. FERRARA, "Optical sensor for real-time monitoring of CO₂ laser welding process", *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 6019-25, 2001.
- [8] P.B. GARCIA-ALLENDE, J. MIRAPEIX, O. M. CONDE, A. COBO, J.M. LOPEZ-HIGUERA, "Defect Detection in Arc-Welding Processes by Means of the Line-to-Continuum Method and Feature Selection", *Sensors*, vol. 9, pp. 7753-7770, 2009.
- [9] J.O. Connolly, G.J. Beirne, G.M. O'Connor, J.T. Glynn, A.J. Conneely, "Optical monitoring of laser generated plasma during laser welding", *Proceedings of SPIE 3935*, pp. 132-38, 2000.
- [10] H.R. GRIEM, *Principles of Plasma Spectroscopy*, (Cambridge University Press, 1997).
- [11] J. Mirapeix, A. Cobo, S. Fernandez, R. Cardoso, J.M. Lopez-Higuera, "Spectroscopic analysis of the plasma continuum radiation for on-line arc-welding defect detection", *J. Phys. D*, vol. 41, pp. 135202-10, 2006.
- [12] J. Mirapeix, A. Cobo, O.M. Conde, C. Jaúregui, J.M. López-Higuera, "Fast algorithm for spectral processing with application to on-line welding quality assurance", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 2623-2629, 2006.