

# Evaluación de la calidad de soldadura mediante algoritmos de selección de características y de optimización

## Welding quality evaluation by means of feature selection and optimization algorithms

Jesús MIRAPEIX<sup>(1)</sup>, Pilar Beatriz GARCÍA-ALLENDE<sup>(2)</sup>, Olga M. CONDE<sup>(1)</sup>, Francisco ANABITARTE<sup>(1)</sup>, Luis RODRÍGUEZ-COBO<sup>(1)</sup>, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA<sup>(1)</sup>, Adolfo COBO<sup>(1)</sup>

1. Departamento TEISA, Edificio I+D Teleco, Universidad de Cantabria, Av. Los Castros s/n, 39005, Santander (Cantabria)
2. Centre for Robotic Surgery, Institute of Global Health Innovation, and Department of Surgery and Cancer, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

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

### RESUMEN:

Este trabajo es una continuación de una publicación anterior en la que se demostró la viabilidad de establecer un análisis de la calidad de procesos de soldadura basado en la generación de espectros sintéticos y en el posterior empleo de algoritmos de optimización para determinar la participación relativa de cada especie en el plasma. En dicho estudio se comprobó que existía una correlación directa entre los perfiles de participación y la aparición de defectos en los cordones, lo que permite, no sólo disponer de una técnica de monitorización alternativa, sino también aportar mayor información sobre el propio proceso y su dinámica. En esta contribución se proponen mejoras al modelo original, como el uso del algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) y de una etapa previa basada en un algoritmo de selección de características que permita seleccionar una región espectral determinada sobre la que llevar a cabo la optimización.

**Palabras clave:** espectroscopía óptica de plasmas, soldadura de arco, algoritmo de optimización, selección de características, optimización por enjambre de partículas

### ABSTRACT:

This work is a continuation of a previous paper where the feasibility of establishing an analysis of the quality of welding processes based on the generation of synthetic spectra and the use of optimization algorithms to determine the relative participation of the species in the plasma was demonstrated. In that paper the correlation between the participation profiles and the quality of the resulting seams was shown, allowing, not only to employ an alternative monitoring technique, but also to help in trying to understand the process itself and its dynamics. In this contribution new improvements are proposed to the original model, as the employment of the PSO (*Particle Swarm Optimization*) algorithm and a previous stage based on a feature selection algorithm able to facilitate a selection of the spectral region where the optimization should take place.

**Key words:** plasma optical spectroscopy, arc-welding, optimization algorithm, feature selection, particle swarm optimization.

## 1.- Introducción

El campo de investigación centrado en la espectroscopía óptica de plasmas con aplicación a la monitorización en línea de la calidad en procesos de soldadura es, a día de hoy, una línea con una actividad intensa, tanto desde el punto de vista académico como de implantación de soluciones en la industria. El motivo de este interés se centra, en primer lugar, en la existencia de una gran variedad de sectores implicados en el uso más o menos intensivo de este tipo de procesos, como pueden ser el sector aeronáutico, la fabricación de automóviles, de piezas pesadas para la industria en general o para el sector energético en particular, la construcción naval, la obra civil, las energías renovables, etc. En muchos de estos sectores los requerimientos en materia de calidad de las soldaduras resultantes son muy exigentes [1], teniendo que pasar certificaciones por parte de organismos internacionales y de los propios clientes, y emplear tiempo y dinero en el uso de procedimientos de evaluación no destructiva, como pueden ser los rayos-X, partículas magnéticas o líquidos penetrantes, o incluso destructiva, para determinar, una vez que el proceso de soldadura ha concluido, si los cordones cumplen o no los criterios de calidad preestablecidos. Uno de los aspectos clave en este sentido es la gran complejidad de la física inherente a este tipo de procesos [2,3], lo que obliga a los ingenieros a invertir mucho tiempo en la especificación de los parámetros idóneos para un nuevo proceso, para lo que habitualmente se emplean cupones de prueba [1]. En este contexto, la industria demanda un sistema que permita realizar una monitorización en línea de la calidad de las soldaduras, pudiendo avisar en tiempo real al operario de la aparición de un defecto, o incluso actuar sobre el sistema para tomar las medidas preventivas oportunas.

La espectroscopía óptica de plasmas ha sido ampliamente investigada en su aplicación para esta problemática, dando lugar a una intensa actividad científica [4-7]. Si bien el enfoque convencional consiste en el cálculo de la temperatura electrónica del plasma para establecer una correlación directa entre el perfil de evolución temporal de dicho parámetro y la aparición de defectos en los cor-

dones; recientemente han aparecido nuevas propuestas que sugieren enfoques alternativos más destinados a comprender la propia dinámica del proceso que a la monitorización en sí misma. Sibillano et al. proponen en [8] el uso de la técnica de mapeo de covarianza (*Covariance Mapping Technique*) para estudiar la correlación entre las diferentes líneas de emisión de las distintas especies frente a la aparición de defectos de soldadura. En un artículo anterior se propuso un enfoque totalmente distinto para realizar un análisis basado en los espectros del plasma de soldadura [9], consistente en la generación de un espectro sintético que, mediante un proceso de optimización, es igualado al espectro experimental (real) variando para ello la participación de las diferentes especies que participan en el plasma, p.ej. Ar I, Ar II, Fe I, Mn I, etc.

El estudio realizado demostró la correlación existente entre los perfiles de participación relativa de las especies y la calidad de los cordones asociados, mostrando por ejemplo perturbaciones significativas asociadas a defectos tales como porosidades, discontinuidades en la junta, etc. Aunque los resultados resultaron interesantes y prometedores, el modelo propuesto en [9] mostró algunos problemas, siendo el principal la dependencia en la generación de los espectros sintéticos de las intensidades relativas de las líneas de emisión obtenidas de una copia local de la base de datos del NIST [10]. Esta solución presenta inconvenientes si se quieren emplear rangos espectrales anchos, tal y como quedó patente en el citado trabajo, donde precisamente la especie dominante en el rango estudiado (Ar II, 195 - 535 nm) ofrecía peores resultados en la detección de algunos defectos que otras especies menos significativas, como el Cr I.

En este trabajo, para resolver lo anteriormente comentado, se propone el uso de un algoritmo de selección de características, concretamente el SFFS (*Sequential Forward floating Selection*) [11] para identificar las bandas espectrales de los espectros del plasma de soldadura más discriminantes desde el punto de vista de la detección de defectos. De este modo, el nuevo modelo posibilita llevar a cabo el proceso de optimización so-

bre una *ventana* espectral a determinar, de menor anchura que la ofrecida por el espectrómetro empleado, lo que minimiza el efecto negativo del uso de las intensidades relativas del NIST. Por otro lado, en [9] se empleó el algoritmo CRS6 (*Controlled Random Search, Búsqueda Aleatoria Controlada*) [12] para la etapa de optimización. En este trabajo se propone su reemplazo por una implementación sencilla del algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization, Optimización por Enjambre de Partículas*) ampliamente empleado en diversos campos de aplicación [13]. Como se mostrará, el PSO presenta una mejora frente al CRS6 en términos de coste computacional, lo que puede ser de gran interés desde el punto de vista de la monitorización en tiempo real. En el apartado de resultados se presentarán tanto pruebas de campo como ensayos experimentales que permitirán discutir sobre el rendimiento de la solución propuesta.

## 2.- Algoritmos de optimización

El estudio de la implementación del CRS6 realizado en [9] arrojó unos valores promedio de tiempo de procesamiento de entre 0.11 y 0.79 segundos para cada muestra espectral analizada, dependiendo de la condición de parada seleccionada en cada caso. Para mejorar este rendimiento se consideró la inclusión en el modelo del algoritmo PSO, propuesto inicialmente en 1995 [12]. Este método está inspirado en el comportamiento *social* de las bandadas de pájaros o los bancos de peces y, como suele ocurrir con los algoritmos de optimización con mayor aceptación, ha sufrido diversos cambios desde su primera formulación, con nuevas versiones y aplicaciones. De hecho, el ámbito de aplicación del PSO es realmente amplio y abarca desde el análisis de imágenes y video, hasta el diseño de antenas o el sector energético, por mencionar sólo algunos ejemplos. Aunque muy escasas, existen algunas contribuciones en el campo de la monitorización de soldaduras, donde PSO es empleado para la fase de entrenamiento de redes neuronales [14] y para optimizar los valores de los parámetros del proceso [15].

La formulación original del PSO puede resumirse de la siguiente manera:

-1: inicializar el *array* inicial de partículas con posición y velocidad aleatorias (en el espacio de búsqueda  $D$ -dimensional).

-2: valorar la función de coste predefinida para cada partícula.

-3: comparar la última evaluación de la función de coste de la partícula actual con su "previa mejor"  $p_{best}$ . Si el valor actual es mejor que  $p_{best}$  entonces se actualiza  $p_{best}$  y  $p_i$  (mejor posición) a la posición actual  $x_i$ .

-4: determinar la partícula del enjambre con mayor éxito hasta el momento ( $g_{best}$ ) y guardar en  $p_g$  su posición asociada.

-5: actualizar la velocidad y posición de cada partícula del enjambre en función de la siguiente expresión:

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1(p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2r_2(p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (1)$$

-6: si se satisface la condición de parada se sale del programa con el mejor resultado hasta el momento, en caso contrario se repite el proceso desde el punto 2.

Cada partícula del enjambre queda definida por su posición  $X_i$  y su velocidad  $V_i$  dentro del espacio de búsqueda  $D$ -dimensional, donde:

$$\begin{cases} X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \\ V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \end{cases} \quad (2)$$

En (1)  $w$  es el peso de inercia (que puede entenderse como la fluidez o viscosidad del medio donde se mueven las partículas),  $c_1$  y  $c_2$  son constantes positivas (tasa de aprendizaje) y  $r_1$  y  $r_2$  son funciones aleatorias en el rango  $[0,1]$ . En (1) se describe un algoritmo PSO básico, donde variaciones en  $w$ ,  $c_1$  y  $c_2$  pueden afectar de manera notable su comportamiento, incluso haciéndolo inestable. Valores típicos para estos parámetros pueden oscilar entre 0.4 y 0.9 para  $w$  y 2 para  $c_1$  y  $c_2$ . Por otro lado se aconseja limitar las velocidades de las partículas al rango  $[-V_{max}, +V_{max}]$ , si bien el valor de  $V_{max}$  depende de cada aplicación particular.

### 3.- Resultados experimentales

En primer lugar se evaluó el rendimiento de la implementación del algoritmo PSO frente a los resultados ofrecidos por CRS6. Siguiendo la metodología detallada en [9], se replicó un espectro experimental para generar una muestra con 150 espectros idénticos destinada a examinar la convergencia de ambas alternativas.

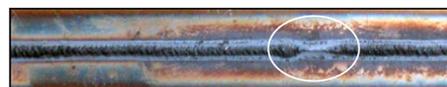
Part.	Iter.	Ar II		$t_{\text{procesado}}$ (s)
		(% participación)	Media	
20	20	24.02	5.86	0.0352
20	40	23.47	2.18	0.0657
20	60	23.80	0.73	0.0964
20	80	23.92	0.44	0.1261
20	100	23.96	0.21	0.1550
20	120	23.96	0.26	0.1883
20	140	23.99	0.08	0.2197
20	160	24	0	0.2480
10	100	23.97	0.18	0.08
10	120	23.99	0.08	0.09
10	140	24	0	0.11
10	160	23.99	0.08	0.12

Tabla 1: Rendimiento del PSO

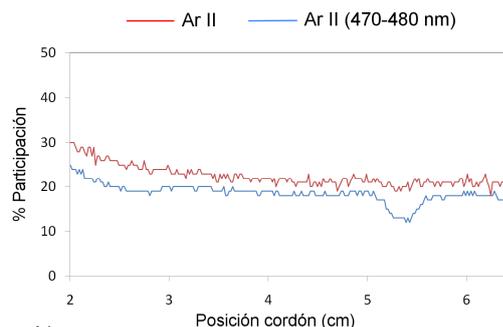
En la Tabla 1 *Part.* es el nº de partículas e *Iter.* el nº de iteraciones del algoritmo. Como puede apreciarse el valor óptimo de participación del Ar II (definiendo participación como la concentración relativa de las especies constituyentes del plasma) es 24, convergiendo el PSO a ese valor en función del número de iteraciones y de partículas escogidas. Los tiempos de procesado asociados varían entre 0.03 y 0.25 s por muestra, siendo éstos considerablemente inferiores a los ofrecidos por el CRS6 en [9]: de 0.11 a 0.79 s.

Una vez estudiado el impacto del uso del PSO en el modelo, se llevaron a cabo diversos experimentos de soldadura en el laboratorio para comprobar la respuesta de los perfiles de participación a diferentes defectos. Para ello se empleó el *setup* experimental de soldadura TIG descrito en detalle en [7]. Los espectros del plasma fueron capturados mediante fibra óptica y un espectrómetro-CCD

(USB2000 de *Ocean Optics*). En la Fig. 1 se muestra un primer resultado en el que se analiza un experimento ya contemplado en [9].



a)



b)

Fig. 1: a) cordón defectuoso; b) participación del Ar II con y sin enventanado.

El defecto resaltado en la Fig. 1 (a) fue provocado por una perturbación en el flujo de gas de protección, lo que originó la discontinuidad en el cordón en  $x \approx 5.5$  cm. El perfil de participación del Ar II obtenido considerando el espectro sintético sobre todo el rango espectral ofrecido por el espectrómetro (195 – 535 nm) apenas muestra una respuesta asociada al defecto, pese a ser la especie dominante en el rango bajo estudio, debido a las consideraciones anteriormente discutidas. En la Fig. 1 (b) se presenta también el resultado del perfil de participación del Ar II si sólo se considera una ventana espectral entre 470 y 480 nm. Cabe mencionar que el estudio realizado con el algoritmo de selección de características SFFS escogió la banda espectral en 476.55 nm como una de las idóneas para discriminar entre espectros asociados a soldaduras correctas y defectuosas. Como puede apreciarse, el resultado mejora notablemente las prestaciones del modelo, ya que el perfil del Ar II exhibe en este caso una clara perturbación vinculada al defecto.

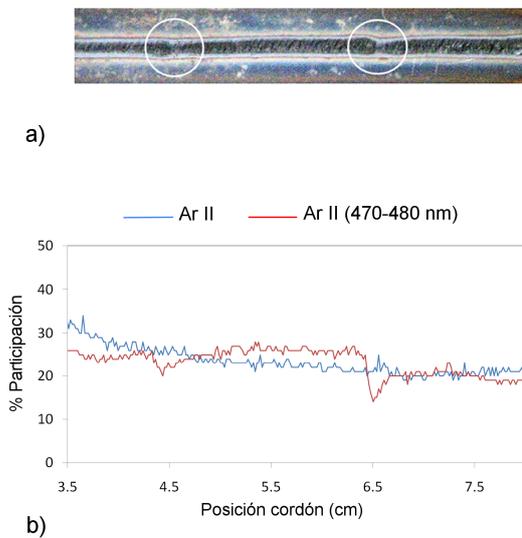


Fig. 2: a) cordón defectuoso; b) participación del Ar II con y sin enventanado.

En la Fig. 2 se presenta un nuevo ejemplo con un cordón con dos defectos leves y puntuales. De nuevo puede observarse como la respuesta de la señal de monitorización mejora de manera significativa frente a la derivada del uso del rango espectral completo del espectrómetro.

Conviene mencionar que la banda espectral seleccionada es una de las que mejores resultados ofrece, pero durante la fase de estudio experimental se han comprobado otras ventanas que también mejoran los resultados del modelo original.

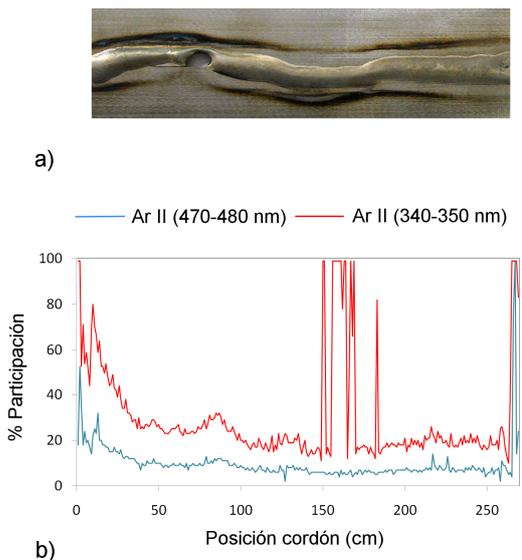


Fig. 3: Cordón defectuoso por desvío de trayectoria.

En la Fig. 3 se presenta el estudio realizado con una prueba de campo cuyas características están recogidas en [16]. El defecto de estudio en este caso es desvío de trayectoria de la antorcha sobre la junta, siendo el material a soldar Inconel-718. Se puede observar en la Fig. 3 (b) como la respuesta de la banda entre 340 y 350 nm, también seleccionada por SFFS, presenta perturbaciones más significativas que la centrada en 475 nm. La detección de este tipo de defecto resulta especialmente interesante, dado que los sistemas basados en sensores tradicionales que miden la tensión y la corriente de soldadura encuentran dificultades para detectarlos [16].

#### 4.- Conclusiones

En este artículo se han presentado mejoras a un trabajo anterior basado en la generación de espectros sintéticos y en el uso de algoritmos de optimización orientado a la monitorización de la calidad en procesos de soldadura. En primer lugar se ha sustituido el algoritmo de optimización original, el CRS6, por una versión básica del PSO, mostrando unos resultados muy similares con respecto a la convergencia de ambos, pero unos tiempos de procesamiento significativamente inferiores para el PSO, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de uso de la técnica como herramienta en tiempo real. Por otro lado, el modelo original presentaba una problemática con respecto a los perfiles de participación del Ar II, ya que éstos no indicaban adecuadamente la aparición de algunos defectos. Estudios iniciales señalaron la posibilidad de que tal efecto fuese provocado por el uso de las intensidades relativas del NIST en la generación de los espectros sintéticos, ya que su validez se restringe a un estrecho rango espectral. Para subsanar esta situación se ideó reducir el rango espectral sobre el que se lleva a cabo la optimización y, por consiguiente, donde se estima la participación relativa de las especies. Como herramienta para realizar este “enventanado” espectral se ha empleado un algoritmo de selección de características, en concreto el SFFS, que indica aquellas bandas espectrales con mayor poder de discriminación entre espectros asociados a soldaduras correctas y defectuosas. Como líneas futuras se plantea la búsqueda

de una solución alternativa para poder obviar el uso de las intensidades relativas en los espectros sintéticos, así como el uso del modelo para tratar de cuantificar la presencia de elementos en compuestos.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido cofinanciado por medio del proyecto TEC2010-20224-C02-02 y las becas AP2009-1403 y AP2007-02230. Los autores agradecen al personal de ITP su ayuda durante las pruebas de campo, así como a Juan M<sup>a</sup> Etayo de Tecnalia y José J. Valdiande del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

### Referencias

- [1] A. COBO, J. MIRAPEIX, F. LINARES, J.A. PINEY, D. SOLANA, J.M. LOPEZ-HIGUERA, "Spectroscopic Sensor System for Quality Assurance of the Tube-To-Tubesheet Welding Process in Nuclear Steam Generators", IEEE Sensors J., vol. 7, pp. 1219-24, 2007.
- [2] T.W. EAGAR, "Physics of arc welding processes", in Proc Int Inst Weld Congr, vol. 61, 1990.
- [3] C. S. WU, M. USHIO, M. TANAKA, "Analysis of the TIG welding arc behaviour", Computat Mater Sci, vol. 7, pp. 308-314, 1997.
- [4] 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.
- [5] P. SFORZA, D. DE BLASII, "On-line optical monitoring system for arc welding" NDT E. Int., vol. 35, pp. 37-43, 2002.
- [6] A. ANCONA, V. SPAGNOLO, P.M. LUGARA, M. FERRARA, "Optical sensor for real-time monitoring of CO<sub>2</sub> laser welding process", Appl. Opt., vol. 40, pp. 6019-25, 2001.
- [7] J. Mirapeix, A. Cobo, O.M. Conde, C. Jauregui, 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.
- [8] T. SIBILLANO, A. ANCONA, V. BERARDI, E. SCHINGARO, P. PARENTE, P.M. LUGARA, "Correlation spectroscopy as a tool for detecting losses of ligand elements in laser welding of aluminium alloys", Opt Lasers Eng, vol. 44, pp. 1324-35, 2006.
- [9] J. MIRAPEIX, A. COBO, D.A. GONZÁLEZ, J.M. LOPEZ-HIGUERA, "Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis", Opt. Express, vol. 15, pp. 1884-97, 2007.
- [10] National Institute for Standards and Technology (NIST) atomic spectra database, [http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main\\_asd](http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd).
- [11] 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.
- [12] M. M. ALI, A. TÖRN, S. VIITANEN, "A numerical comparison of some modified controlled random search algorithms," J Global Optim. 11, pp. 377-385, 1997.
- [13] J. KENNEDY, R.C. EBERHART, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw (Perth, Australia), 4, pp. 1942-48, 1995.
- [14] P. ZHANG, L. KONG, W. LII, J. CHEN, K. ZHOU, "Real-time monitoring of laser welding based on multiple sensors", Chinese Control and Decision Conference, pp. 1746-48, 2008.
- [15] P. SATHIYA, S. ARAVINDAN, A. NOORUL HAQ, K. PANEERSELVAM, "Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques", Journal of Materials Processing Technology 209, pp. 2576-84, 2009.
- [16] 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.