



OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DEL PROCESO DE SOLDADURA BAJO FUNDENTE BASADO CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Daniel Rivas^a, Marcelino Rivas^b, Ramón Quiza^b, Rodolfo Haber^c

a) UEB Inversiones. Empresa Eléctrica Matanzas, San Carlos s/n entre Recurso y Refugio, Pueblo Nuevo, Matanzas, Cuba.

b) Grupo de Manufactura y Sostenible, Universidad de Matanzas. Autopista a Varadero Km 3, Matanzas, Cuba.

c) Centro de Automática y Robotica, CAR-CSIC. Ctra de campo Real Km 0.200. La Poveda. Madrid. España.

Resumen: El trabajo realiza un estudio de los métodos de optimización utilizados en investigaciones realizadas en la soldadura, observando que la mayoría de los autores no realizan la optimización con un enfoque de sostenibilidad. Se propone el método de optimización multiobjetivo de entropía cruzada y se obtiene la frontera de Pareto para dos funciones objetivos: potencia eléctrica específica y tiempo específico. Los resultados obtenidos muestran una propuesta interesante provocada por un punto de inflexión en la curva donde se garantiza los menores valores de potencia eléctrica específica y los menores valores de tiempo específico. El punto obtenido pertenece a un régimen de soldadura donde el proceso se hace más ventajoso desde el punto de vista de sostenibilidad.

Palabras claves: soldadura bajo arco sumergido, optimización multiobjetivo y sostenibilidad.

Abstract: This paper makes a research of the optimization methods used in researches made in the welding process, taking into account that most of the authors do not make the optimization with a sustainable approach. The method of multiobjective optimization of crossed entropy is proposed and the Pareto frontier is obtained for the objective functions: specific electric power and specific time. The obtained results showed an interesting approach resulting from an inflexion point in the curve where the lower values of specific electric power and the lower values of specific time are guaranteed. The point obtained belongs to a welding regime that improves the process from the sustainability point of view.

Keywords: submerged automatic welding, multiobjective optimization, and sustainability.

1. Introducción

Dentro de los procesos de manufacturas un lugar importante lo tiene, sin lugar a dudas, el proceso de soldadura, destacándose la soldadura automática bajo fundente (SAW) debido a las grandes ventajas que presenta, entre ellas se destacan: la alta productividad y calidad de la unión soldada. La bibliografía reporta una gran cantidad de artículos donde se obtienen los modelos de la geometría del cordón y se optimizan los parámetros del régimen de soldadura (velocidad (S), tensión (U) y corriente (I)) por ejemplo: Tarny y Yang (1998) utilizan el método

de Taguchi y el análisis de regresión múltiple para optimizar la geometría del cordón. Kolahan y Heidari (2009) utilizan algoritmos simulados para optimizar los parámetros del cordón en la soldadura (GMA). En (Nagesh and Datta, 2010) utilizaron redes neuronales para predecir el ancho y la altura del cordón durante la soldadura TIG. (Sudhakara, 2011) utiliza el método de algoritmos genéticos en la soldadura GTA. Los métodos planteados anteriormente son para una sola función objetivo lo cual simplifica el procedimiento perdiendo calidad en los resultados obtenidos, no considerando otros parámetros que influyen de forma significativa en el proceso. Para disminuir este efecto otros investigadores han utilizados los métodos de optimización multiobjetivos, tales como: (Paiva et al., 2010, Trevio, 2011, Moradpour et al., 2015). En sus investigaciones utilizan diferentes métodos, tales como: Taguchi-Grey, algoritmos de optimización de enjambre de partículas y algoritmos genéticos NSGA-II. La entropía cruzada (MOCE+) es otra técnica heurística la cual ha sido aplicada para solucionar problemas de optimización multiobjetivos con muy buenos resultados por (Bekker and Aldrich, 2011) y (Beruvides et al., 2016). Todas las investigaciones realizadas anteriormente presentan un enfoque tecnológico sin considerar el enfoque de sostenibilidad del proceso. (Verma and Rai, 2016) realizan un estudio de sostenibilidad de la fabricación aditiva y parten del enfoque de tres aspectos fundamentales: económico, social y medio ambiental. Los trabajos realizados por (Joung et al., 2013) presentan una caracterización de once indicadores para procesos de manufactura sostenibles. En el mismo trabajo se plantea el proceso de evaluación de la sostenibilidad compuesto por siete pasos: Conjunto de objetivos de sostenibilidad, selección de los indicadores, especificaciones a cumplir, proceso de medición, análisis de los datos, toma de la decisión y evaluación del impacto. (Joung et al., 2013) plantean un análisis de once indicadores de sostenibilidad para procesos de manufactura. En (Nouira et al., 2014) plantean que las tecnologías de los procesos de manufactura deben ser analizadas con un enfoque ambiental. En (Herrman et al., 2014) plantean algunos temas de sostenibilidad en fábricas del futuro. (Vimal et al., 2015) realizaron un estudio de sostenibilidad de la soldadura (SMAW) y desarrollaron un caso de estudio. (Yeo and Neo, 1998) cuantifican el impacto ambiental del proceso de soldadura. Ellos plantean que cuando se analizan las emisiones de humo de la soldadura son importantes tres factores: el volumen de la emisión, la composición y las medidas de las partículas, además plantean que la cantidad de humo emitida en la soldadura es pequeña, aspecto también reportado por (Drakopoulos et al., 2009), el cual midió la relación de formación de humo para la soldadura automática bajo fundente obteniendo un valor de 0.005 g/min.

El objetivo del trabajo es realizar una optimización multiobjetivo (usando el método de entropía cruzada MOCE+) y considerando dos funciones objetivos: el tiempo específico (min/m), el cual se relaciona con la productividad y la energía eléctrica específica en (kW h/m), relacionada con el daño ambiental. El trabajo se divide en cuatro sesiones: resumen, introducción, materiales y métodos, análisis de los resultados y finalmente se exponen las conclusiones y propuestas de futuros trabajos a realizar.

2. Materiales y métodos

2.1 Definición del problema de optimización

Como variables de decisión fueron considerados los parámetros del proceso tensión (U, en v), corriente (I, en A) y velocidad de la soldadura (S, en m/h) y como funciones objetivos fueron seleccionadas el tiempo específico T_o en (min/m), el cual se relaciona con la productividad y la potencia eléctrica específica E_o en (kW - h/m), relacionada con el daño ambiental.

$$T_o = \frac{1}{S} \quad (1)$$

$$E_o = \frac{U \cos\phi L}{S} \quad (2)$$

Donde:

$\cos\phi = 0.7$

L= Longitud del cordón de soldadura (1 metro).

Como restricciones deben ser consideradas el ancho del cordón y la penetración, establecidas en las condiciones de diseño del caso estudiado, de modo que se garantice la resistencia de la unión soldada por lo que tenemos:

$$p = 2,2m$$

$$6,6m \leq B \leq 9,0m$$

2.2 Diseño del experimento

El material utilizado es el acero JIS 3116 con espesor 2.2 mm. Las propiedades mecánicas y composición química se rigen por la norma ASTM414-D. El electrodo utilizado viene clasificado por la norma AWS como EM12K, tiene un diámetro de 2 mm, se fabrican en rollos y están recubiertos por cobre. Como Fundente se utilizó el PV60-3, de tipo fundido, con una granulometría de 14 x 40 según las normas ASW A5.17 y ASME SFA-5.17. La máquina a soldar se muestra en la figura 1 con las siguientes características:

Velocidad de alimentación del alambre 30-300 m/h.

Diámetro del alambre 2-6,4 mm.

Velocidad de soldadura de 0,1-2 rpm.



Figura 1. Máquina de soldar.

Con el objetivo de obtener los modelos matemáticos necesarios se realizó el diseño de experimento. La literatura plantea que la relación que existe entre los regímenes de soldadura (U, I y S) y los parámetros del cordón (ancho (B) y penetración (P)) sigue un comportamiento lineal (Kumana et al., 2007), por lo que con vista a disminuir los experimentos se selecciona un diseño ortogonal L9. Los límites de los parámetros analizados fueron obtenidos con las recomendaciones de los catálogos y pruebas de validación experimental. Los experimentos realizados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Experimentos realizados.

<i>Experi mentos</i>	<i>Amperaje (I)</i> [A]	<i>Voltaje (U)</i> [V]	<i>Velocidad de soldadura (Vs)</i> [m/h]	<i>B</i> [mm]	<i>P</i> [mm]	<i>Eo</i> [kW - h/m]	<i>To</i> [min/m]
1	200	20	41	7.85	1.5	0,068	1,46
2	200	25	59	7.33	1.91	0,059	1,02
3	200	30	85	6.63	2.44	0,049	0,71
4	250	20	59	7.53	1.53	0,059	1,02
5	250	25	85	6.83	2.22	0,051	0,71
6	250	30	41	10.60	2.98	0,128	1,46
7	300	20	85	6.47	1.7	0,049	0,71
8	300	25	41	10.68	2.87	0,128	1,46
9	300	30	59	10.03	2.91	0,107	1,02

Para obtener una mejor forma de la geometría del cordón, la máquina es ajustada, desplazando el electrodo a una distancia de 25 mm del centro y sacando el electrodo de la boquilla una distancia de 16 mm.

Para la medición del coeficiente de deposición (D) las probetas fueron analizadas en el Centro de Investigación e Innovación de Ingeniería Aeronáutica (CIIA), de Monterrey, México. Antes de realizar el análisis metalográficos, las probetas fueron atacadas con una solución de nital al 2 %, posteriormente se midieron los parámetros B y P. La figura 2 muestra una de las probetas analizadas.

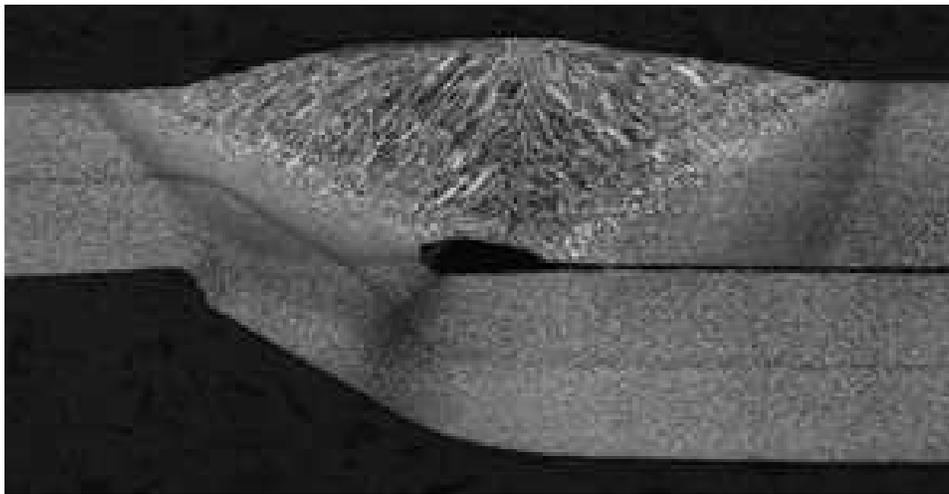


Figura 2. Análisis metalográfico de la probeta para determinar la geometría del cordón.

2.3 Modelación

Los modelos obtenidos de los experimentos mostrados en la Tabla 1 para los parámetros del cordón B y P se muestran en las ecuaciones (3) y (4).

$$B = 3.50 + 0.01801I + 0.179U - 0.0693S \quad , \quad (3)$$

$$P = -1.70 + 0.0120I + 0.0543U - 0.00696S \quad , \quad (4)$$

En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis de varianza y el coeficiente de regresión.

Tabla 2. Coeficiente de regresión y valor de la probabilidad del análisis de ANOVA.

<i>Modelo</i>	<i>Coficiente R²</i>	<i>ANOVA p(F)</i>
Ancho del cordón B, en mm	0.9937	0.0000
Penetración P, en mm	0.9515	0.0010

2.4 Método de optimización

El método de optimización utilizado fue el de entropía cruzada. Los parámetros utilizados y el algoritmo propuesto se exponen en (Beruvides et al., 2016). El límite de convergencia fue de 0.001, factor de suavizado de 0.5, número de interacciones, $N=50$, tamaño de la población, $Z=10$. Con el objetivo de analizar la convergencia de la frontera se realizaron 50.

3 Análisis de los resultados

De la aplicación del método de entropía cruzada se obtiene la frontera de Pareto para las funciones objetivos de potencia eléctrica y tiempo específico, de la misma se observa un punto de inflexión que garantiza un régimen de soldadura con los menores valores de potencia eléctrica específica y los menores valores de tiempo específico.

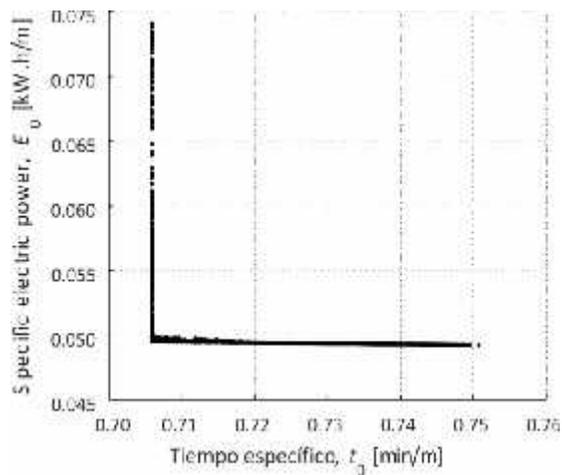


Figura 3. Frontera de Pareto.

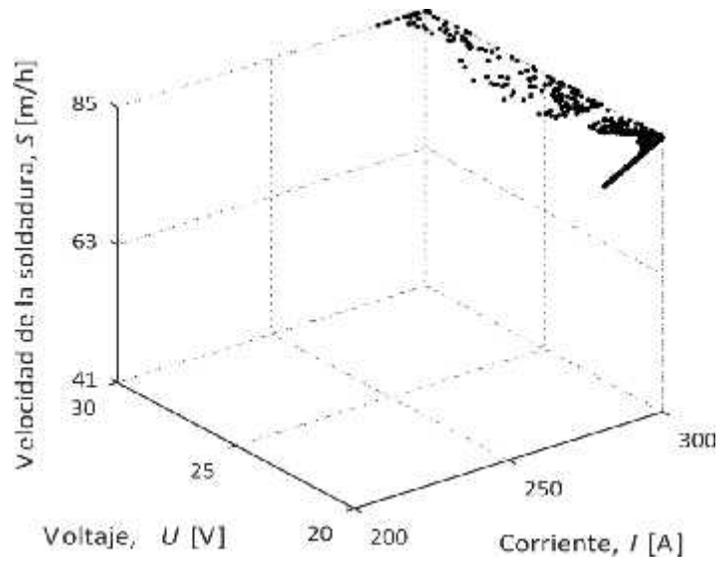


Figura 4. Variables.

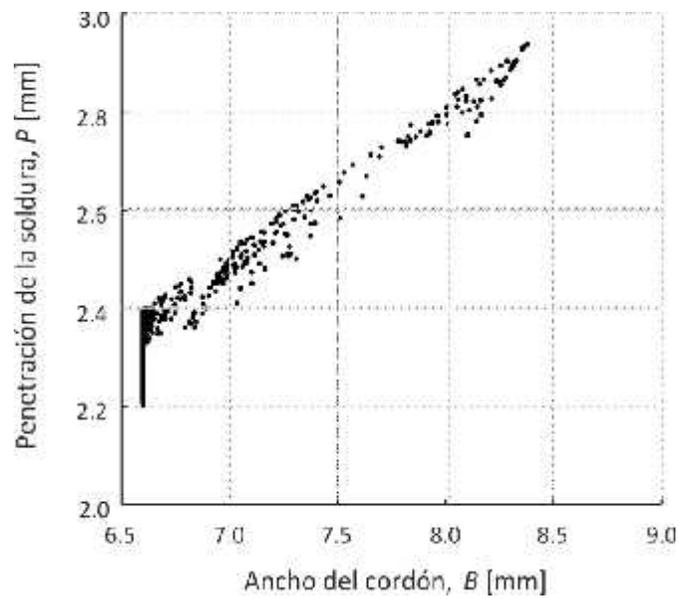


Figura 5. Restricciones.

Como muestra las figuras 3, 4 y 5 existe una buena convergencia en la frontera de Pareto, en todos los casos las restricciones se cumplen y en la figura 5 se observa que el punto de inflexión de la frontera de Pareto coincide con los regímenes de: $I = 300 \text{ A}$, $U = 20 \text{ V}$ y $S = 85 \text{ m/h}$.

4. Conclusiones

La aplicación del método de entropía cruzada ofrece resultados satisfactorios para la optimización multiobjetivo de la soldadura bajo fundente. La introducción de la función objetivo que tiene en cuenta la potencia eléctrica específica permite realizar un análisis desde el punto de vista medio ambiental, ya que con la disminución de la misma se disminuyen los daños medioambientales (disminución de las emisiones al medio ambiente por concepto de la producción de la energía, disminuye la cantidad de calor que se genera, menor cantidad de gases, menor producción de escoria y menor gasto de electrodo. El punto de inflexión de la frontera de Pareto brinda un resultado muy interesante ya que permite obtener un régimen de soldadura que garantiza los menores valores de potencia eléctrica específica con los menores valores de tiempo específico. Este punto se corresponde con el régimen de: $I = 300 \text{ A}$, $U = 20 \text{ V}$ y $S = 85 \text{ m/h}$. En futuros trabajos se debe profundizar en la evaluación medio ambiental a través de los indicadores establecidos e incluir en el proceso de optimización otras funciones objetivos.

Referencias

- BEKKER, J. & ALDRICH, C. 2011. "The cross-entropy method in multi-objective optimisation: An assessment". *European Journal of Operational Research*, 211, pp.112-121.
- BERUVIDES, G., QUIZA, R. & HABER, R. 2016. "Multiobjective optimization based on an improved cross-entropy method. A case study of a micro-scale manufacturing process". *Inform. Sciences*, pp.161-173.
- DRAKOPOULOS, S., SALONITIS, K., TSOUKANTAS, G. & CHRYSSOLOURIS, G. 2009. "Enviomental impact of ship hull repair". *International Journal Sustainability Manufacturing*. , 1, pp.361-374.
- HERRMAN, C., SCHMIDT, C., KURLE, D., BLUME, S. & THIEDE, S. 2014. "Sustainability in Manufacturing and Factories of the Future". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. , 1, pp.283-292.
- JOUNG, C., CARRELL, J., SARKAR, P. & FENG, S. C. 2013. "Categorization of indicators for sustainable manufacturing". *Ecological indicators*, 24, pp. 148-198.
- KOLAHAN, F. & HEIDARI, M. 2009. *Engineering and Technology*, 59, pp.138-141.
- KUMANA, S., RAJA, E. D. & GOWTHAMAN. 2007. "Determination of submerged arc welding process parameters using Taguchi method and regression analysis". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 14, pp.177-183.
- MORADPOUR, M. A., HASHEMI, S. H. & KHALILI, K. 2015. "Multi-objective optimization of welding parameters in submerged arc welding of API X65 steel plates". *Journal of iron and steel research international*. , 22, pp.870-878.
- NAGESH, D. S. & DATTA, G. I. 2010. *Appl. Soft. Comput*, 10, pp.897-907.

- NOUIRA, I., FREIN, Y. & HADJ-ALOUANE, A. B. 2014. "Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand". . International Journal Production Economics, 150, pp.188–198.
- PAIVA, A. P., COSTA, S. C., PAIVA, E. J. & BALESTRASSI.P.P. 2010. "Multi-objective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores". International Journal of Advanced Manufacturing Technology., 50, pp.113-125.
- SUDHAKARA, R. 2011. European Journal of Scientific Research 62, pp.76-94.
- TARNG, Y. S. & YANG, W. H. 1998. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 14, pp.549-554.
- TREVIO, L. M. 2011. Expert Systems with Application. , 38, pp.8015-8053.
- VERMA, A. & RAI, R. 2016. "Sustainability-induced dual-level optimization of additive manufacturing process.". International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- VIMAL, K., VINODH, S. & RAJA, A. 2015. "Modelling, assessment and deployment of strategies for ensuring sustainable shielded metal arc welding processe - a case study". Journal of Cleaner Production, 93, pp.364-377.
- YEO, S. & NEO, K. 1998. "Inclusion of enviromental performance for decisi3n making of welding processes". Journal of Materials Processing Technology, 82, pp.78-88.