

Optimización multiobjetivo de la soldadura automática bajo fundente del acero JIS 3116

Multiobjective optimization of an automatic submerged arc-welding process of JIS 3116 steel

Iván La Fé-Perdomo^I, Marcelino Rivas-Santana^I, Ramón Quiza-Sardiñas^I,
Patricia Zambrano-Robledo^{II}

I. Universidad de Matanzas, Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible-GIFAS. Matanzas. Cuba

II. Universidad Autónoma de Nuevo León. Centro de Investigación e Innovación de Ingeniería Aeronáutica-CIIIA. México

Correo electrónico: ivan.lafe@umcc.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 26 de noviembre de 2016

Aceptado: 2 de marzo de 2017

Resumen

En este artículo se logró el uso de un diseño ortogonal para la optimización multiobjetivo del proceso de soldadura bajo arco sumergido del acero JIS 3116, empleando el método de algoritmos genéticos. Se seleccionaron como variables independientes los regímenes del proceso: voltaje, intensidad de la corriente y velocidad de la soldadura. Además se tuvieron en cuenta los parámetros geométricos de la unión soldada como restricciones de la optimización. Como funciones objetivos del proceso fueron seleccionados: el coeficiente de depósito y la dilución. Los

resultados obtenidos fueron representados gráficamente en la frontera de Pareto y consecuentemente analizados, con el fin de seleccionar la solución adecuada para diferentes preferencias del proceso, permitiendo la comparación con parámetros empleados antes de la optimización.

Palabras claves: soldadura por arco sumergido, optimización multiobjetivo, algoritmo genético.

Abstract

This paper reports the use of an orthogonal array for multi-objective optimization of the submerged arc welding process of JIS 3116 steel, by using the genetic algorithm based-method. Three process parameters were selected as independent variables: arc voltage, current intensity and welding speed. In addition, the geometric parameters of the welded joint were considered as constraints of the optimization problem. Two objective functions were selected: the deposition rate and dilution. Finally, the obtained outcomes

were arranged in graphical form (Pareto's front) and analyzed to make the proper decision for different process preferences, allowing the comparison with the parameters used before the optimization task.

Key words: submerged arc-welding, multiobjective optimization, genetic algorithm.

Introducción

La soldadura por arco sumergido (*submerge darc welding*, SAW) es muy usada para la unión de tuberías de gas con grandes diámetros y en recipientes de alta presión [1]. Los parámetros del régimen de soldadura (voltaje, corriente, velocidad de avance del alambre, velocidad de la soldadura y el ángulo de la antorcha) juegan un papel fundamental en la determinación de la calidad de una unión soldada, esto puede definirse en términos de, calidad de la geometría del cordón de soldadura, la distorsión y las propiedades mecánicas de la unión [2].

Desde el punto de vista empírico, el efecto en las propiedades mecánicas en la SAW ha sido reportado por Singh *et al* [3] donde se hizo un estudio de la influencia que ejercen los parámetros de la soldadura por arco sumergido en las propiedades mecánicas del cordón. Kumanan *et al* [4] investigaron los parámetros del proceso SAW; donde se analizaron las variables: corriente, voltaje, velocidad y distancia del electrodo, usaron una matriz ortogonal L9 combinado con el análisis de regresión. Como resultado obtuvieron los modelos empíricos y los parámetros óptimos del proceso. Un procedimiento similar, en la parte de la modelación, fue realizado por Saluja y Moeed [5].

Un problema real que enfrenta el proceso de SAW a nivel industrial está relacionado con la selección de parámetros óptimos del régimen de soldadura que permitan alcanzar los estándares de productividad y calidad deseados.

Recientemente se han realizado varias investigaciones relacionadas con la optimización de los parámetros de la soldadura. Islam y colaboradores [6] combinaron los Algoritmos Genéticos (AG) y el Método de Elementos Finitos con el fin de minimizar la distorsión inducida en las estructuras soldadas. Feng y coautores

[7] estudiaron la relación entre la velocidad de la soldadura y la eficiencia térmica en la soldadura protegida por CO_2 y lograron establecer un modelo para la maximización de dicha eficiencia. La optimización de la resistencia de la unión soldada con la minimización del cordón de soldadura, fue la investigación realizada por [8], para ello utilizaron el método Grey-Taguchi aplicado a la soldadura transmitida por láser.

Las investigaciones analizadas anteriormente emplean el método de optimización mono objetivo, el cual no permite tener en cuenta la influencia de otros elementos que aumentarían el nivel de complejidad del problema y harían una caracterización más real del mismo. Para ello se usan los enfoques multiobjetivo, por ejemplo: calidad vs energía [9], costos vs energía [10], calidad vs costos [11], etc. Objetivos como: el ancho del cordón y la altura del refuerzo fueron considerados simultáneamente por Senthilkumar y colaboradores [12] en el proceso de soldadura por electrodo tubular (*flux-cored arc welding*, FCAW), emplearon los AG como técnica de optimización; la aplicación de esa misma técnica heurística al proceso FCAW fue el trabajo reportado por [13], lo que en esa investigación se minimizó el porcentaje de dilución, maximizándose la altura del refuerzo y el ancho del cordón. El algoritmo de optimización por enjambre de partículas fue el método de optimización empleado por [14], en su trabajo fueron considerados como variables de decisión del FCAW, la penetración, el ancho del cordón y el refuerzo.

Sobre la base de la revisión expuesta anteriormente, la siguiente investigación propone la aplicación del método de algoritmos genéticos para optimizar los parámetros del régimen de soldadura (voltaje, intensidad de la corriente y velocidad) de un proceso SAW en el acero JIS 3116, se consideran como objetivos la dilución y el coeficiente de depósito, el primero será minimizado mientras que el segundo será maximizado para incrementar el rendimiento del proceso. El análisis posterior de la frontera de Pareto facilitará la toma de decisiones y por ende permitirá mejorar los indicadores de energía y gasto de electrodo, los cuales inciden directamente en la productividad a nivel industrial del proceso.

Métodos y Materiales

El estudio experimental se realizó con el propósito de obtener las relaciones entre la geometría del cordón (ancho y penetración) y los parámetros del régimen de soldadura (intensidad, voltaje y velocidad).

El proceso de soldadura fue llevado a cabo sobre el material base, acero JIS 3116. Al mismo se le realizó un análisis para determinar su composición química; con un espectrómetro modelo LECO de descarga luminiscente con precisión de 0,01 % y rango de medición de longitud de onda de 165-460 nm. Los resultados de la composición química fueron: 0,02 % de carbono; 0,04 % de silicio; 0,20 % de manganeso; 0,08 % de azufre y 0,06 % de aluminio.

También se ejecutó un análisis de la micro estructura utilizando un microscopio óptico ZEISS™ Axio-Observer Z1M y un microscopio electrónico de barrido marca JEOL™ modelo JSM-6510LV a bajo vacío, usando el método de electrones retrodispersados (ver Fig. 1a y 1b). En la figura 1 se puede apreciar una estructura ferrítica característica de un acero de muy bajo por ciento de carbono.

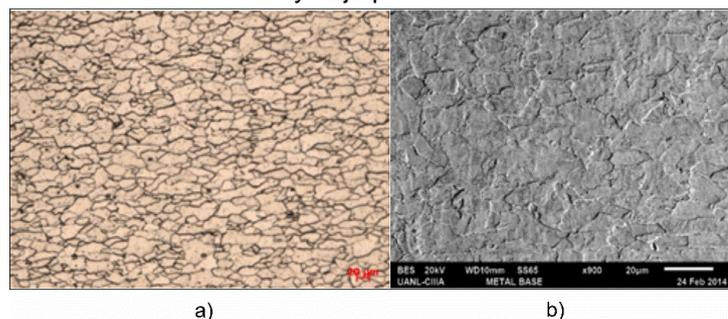


Fig. 1. Microestructura del metal base atacada con Nital (2ml de HNO_3 y 98 ml de etanol) (a) Microscopio óptico a 20X y (b) microscopio de barrido

Para determinar la resistencia mecánica del metal base se realizaron ensayos de tracción según la norma ASTM E8M, cuyos resultados mostraron un límite elástico de (242 ± 6) MPa y una tensión máxima de rotura de $(384,8 \pm 8,6)$ MPa. El valor medio de la micro dureza fue de $(226,56 \pm 2,57)$ HV.

El electrodo para realizar la soldadura fue el tipo AWSEM12K, de diámetro 2 mm, con una resistencia a la tracción de $(800 \dots 1200)$ MPa y una composición química de: 0,12 % de C, 1,10-1,40 % de Mn, 0,06 % de Si, menos de 0,03 % de P y menos de 0,025 % de S. El mismo fue seleccionado por tener una composición química afín a la del metal base y una resistencia mecánica superior a este. El fundente utilizado fue PV60-3 de tipo fundido, con una granulometría 14X40 según las normas ASW A5.17 y ASME SFA-5.17 La máquina utilizada para la soldadura es un rectificador MZ-1-630 con cabezal ST-3-630 de polaridad invertida y corriente directa. Se mantuvo constante, durante todos los experimentos, la distancia de la boquilla a la pieza, en un valor de 19 mm.

Como factores experimentales se tomaron los parámetros del régimen de soldadura: voltaje, U ; intensidad de la corriente, I ; y velocidad de la soldadura, V_s . Para cada uno de estos factores se consideraron tres niveles: bajo, medio y alto, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del proceso y sus niveles

Parámetro	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Voltaje, U (V)	20	25	30
Intensidad de la corriente, I (A)	200	250	300
Velocidad, V_s (m/h)	41	59	85

El número mínimo de experimentos a realizar, N^{\min} , se calculó a partir de la cantidad de factores experimentales, F , y el número de niveles seleccionados, L , mediante la expresión:

$$N^{\min} = (L - 1) F + 1 = (3 - 1) \cdot 3 + 1 = 7 \quad (1)$$

A partir del resultado anterior, se seleccionó un arreglo ortogonal L9 con nueve experimentos y ocho grados de libertad. Los valores del ancho del cordón (b), la penetración (p), el área del metal base fundido y el área de la sección transversal del metal depositado se obtuvieron por el método metalográfico (ver Fig.2 y Tabla 2), realizado a cada experimento. Las dimensiones de b y p fueron medidas con el microscopio óptico de platina invertida modelo Axio-Observer Z1m, utilizando el sistema digital de captura y procesamiento de imágenes que ofrece una precisión de $\pm 5 \mu\text{m}$. Los experimentos fueron ejecutados aleatoriamente (ver Tabla 2).

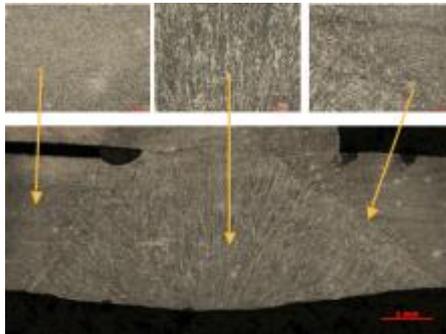


Fig. 2. Sección transversal de la soldadura. De izquierda a derecha: zona del metal base, zona soldada y zona afectada por el calor

Tabla 2. Matriz ortogonal L9 utilizada en la experimentación

No	Voltaje U (V)	Intensidad de la corriente I (A)	Velocidad V_s (m/h)	Ancho del cordón b (mm)	Penetración p (mm)	Área del metal base fundido A_{MB} (mm ²)	Área de la sección transversal del metal depositado A_D (mm ²)
1	20	200	41	7,85	1,50	4,14	5,79
2	20	250	59	7,33	1,91	4,75	5,99
3	20	300	85	6,63	2,44	5,26	5,01
4	25	200	59	7,53	1,53	3,46	5,16
5	25	250	85	6,83	2,22	4,45	5,25
6	25	300	41	10,60	2,98	10,52	10,68
7	30	200	85	6,47	1,70	3,32	3,99
8	30	250	41	10,68	2,87	10,55	9,15
9	30	300	59	10,03	2,91	10,19	8,67

Modelación de las variables que intervienen en el proceso

Una vez realizados los experimentos fue necesario modelar las relaciones que existen entre el ancho del cordón (b), la penetración (p) y el régimen de soldadura (U , I y V_s). Estos parámetros fueron utilizados para obtener los modelos empíricos mediante la regresión lineal múltiple con la ayuda del software STATGRAPHICS Plus 5.0.

Los modelos obtenidos se muestran en las ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6, siguientes:

$$p = -1,7003 + 0,0120I + 0,0543 - 0,0070V_s \quad (2)$$

$$b = 3,5046 + 0,0180I + 0,0693V_s \quad (3)$$

$$A_D = -0,1627 + 0,0314I + 0,1675U - 0,0851V_s \quad (4)$$

$$A_{MB} = -8,9073 + 0,0501I + 0,0906V_s \quad (5)$$

$$A_{ST} = A_D + A_{MB} \quad (6)$$

Planteamiento del problema de optimización

Para el proceso analizado son tomadas como variables de decisión las relaciones: a , b , c , el voltaje (U), la intensidad de la corriente (I) y la velocidad de la soldadura (V_s) con sus respectivos intervalos experimentales y como funciones objetivos el coeficiente de depósito (D_R) (ecuación 8) [6], calculado como el producto del área del metal depositado sobre la superficie de metal base (A_D), por la velocidad de la soldadura, por el peso específico del material del alambre, este objetivo será maximizado para aumentar la productividad del proceso. El segundo objetivo de la optimización es la dilución (D) (ecuación 9) (expresada en porcentaje) [6] que se define como, la relación entre el área del metal fundido (A_{MB}) y el área soldada total (A_{ST}) (ecuación 6) y será minimizado para disminuir los costos. Para los valores mínimos y máximos de las ecuaciones de restricción (ecuaciones 2 y 3) se utilizó la norma NC EN 1442:2008 donde: la penetración ($p \geq 2,2$) y el ancho del cordón ($6,6 \leq b \leq 9$).

$$20 \leq U \leq 30 \quad (a)$$

$$200 \leq I \leq 300 \quad (b)$$

$$41 \leq V_s \leq 85 \quad (c)$$

$$D_R = A_D V_s \rho \quad (8)$$

donde ρ es el peso específico del material del alambre.

$$D = \frac{A_{MB}}{A_{ST}} 100(\%) \quad (9)$$

Implementación del algoritmo genético

La implementación del algoritmo genético se realizó con la utilización del software MatLab R2013a, el método utilizado es el NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm*) [15], siendo este uno de los algoritmos evolutivos más utilizados en la optimización multiobjetivo. NSGA-II (ver Pseudocódigo) construye una población de individuos competitivos, ordena cada individuo de acuerdo con un criterio de dominancia, aplica operadores evolutivos (selección, cruzamiento y mutación) para crear una nueva descendencia. Este método utiliza la distancia de agrupamiento en la selección de los operadores para mantener la diversidad en la población. El ordenamiento y la distancia de agrupamiento inciden en el operador de cruzamiento, el cual guía el proceso de selección. En la selección, un individuo es considerado mejor que otro, si y solo si, tiene menor rango, o si teniendo el mismo rango, tiene mayor distancia de agrupamiento.

Pseudocódigo del algoritmo genético usado (NSGA-II)

procedimiento NSGA-II

Generar aleatoriamente la población inicial (N)

Evaluar funciones objetivos

Ordenar población inicial basado en la dominancia de Pareto

Calcular distancia de agrupamiento para la población inicial

Ciclo para $i = 1$ *hasta* E (número de iteraciones)

Generar descendencia (torneo, cruzamiento y mutación)

Mezclar la población actual con la descendencia

Ordenar población mezclada basado en la dominancia de Pareto

Calcular distancia de agrupamiento para la población mezclada

Seleccionar los N mejores individuos para formar una nueva población

fin del ciclo para

fin del procedimiento

El algoritmo fue implementado con un tamaño de población de 1000 muestras, y un número máximo de iteraciones igual a 200. La población inicial fue creada siguiendo una distribución aleatoria uniforme. El cruzamiento fue hecho mediante la técnica de punto simple. Para la mutación se aplicó una probabilidad de 0,01.

Resultados y Discusión

Modelación

En la tabla 3 se muestran los coeficientes de correlación (R^2) y los valores de probabilidad (p -value) asociados al análisis de varianza (ANOVA) hecho a cada modelo. Como se puede observar todos los modelos ajustados explican más del 95 % de variabilidad en sus respectivas variables dependientes, también se puede comprobar que como el valor de la probabilidad es menor que 0,01 existe una relación estadísticamente significativa entre la variables a un nivel de confiabilidad del 99 %. También se puede corroborar que los errores

asociados a la calidad de los modelos (SEE y MAE) poseen valores pequeños lo que garantiza una mejor aproximación en las predicciones.

Tabla 3. Resultados estadísticos de los modelos

Variable dependiente	Coefficiente de correlación (R^2)	ANOVA Valor de p , $p(F)$	Estimación estándar de los residuales (SEE).	Error medio absoluto (MAE)	Nivel de confiabilidad del modelo (%)
b	0,99	0,0000	0,1732	0,1044	99
ρ	0,95	0,0010	0,1673	0,0959	90
A_D	0,965	0,0004	0,5371	0,3110	95
A_{MB}	0,98	0,0001	0,5113	0,3043	99

Optimización

Como consecuencia de la optimización multiobjetivo, se obtiene el gráfico de Pareto (ver Fig. 3), que contiene todos los individuos no dominados. Los resultados mostrados demuestran que no existe una solución única, debido a que los dos objetivos considerados (la dilución y el coeficiente de depósito) son contradictorios entre sí, lo que se explica en que el incremento de uno causará el decremento del otro. Por lo que cada punto de la frontera de Pareto es considerado igualmente óptimo, pero la conveniencia de utilizar indistintamente uno u otro depende de las condiciones específicas de la producción.

Cabe resaltar que el punto 1 corresponde con el mayor porcentaje de dilución (aumentando los costos del proceso) y mayor coeficiente de depósito; esta selección es la indicada para situaciones que requieran de un incremento en la productividad. Por otra parte el punto 2 es el que corresponde con un régimen donde se obtienen los menores valores de ambos objetivos, en esta situación se sacrifica la productividad a fin de disminuir los gastos de fabricación.

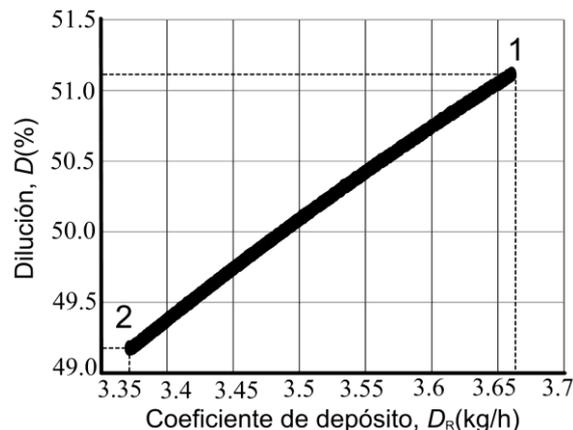


Fig. 3. Frontera de Pareto

El resto de los puntos son casos intermedios, entre los cuales podría buscarse un compromiso razonable entre los dos objetivos a optimizar. Por supuesto que este compromiso dependerá no solo de consideraciones de costo y productividad propiamente dichas, sino de otras como la disponibilidad de tiempo y personal y de los suministros de consumibles (electrodos) y materiales.

Para la validación del método de optimización propuesto se seleccionó de la gráfica de Pareto una variante correspondiente a un punto medio de la curva. Esto permitió realizar la comparación con los parámetros utilizados, además se pudieron calcular los indicadores de consumo de energía y gasto de electrodo. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado de la validación del algoritmo propuesto

Variantes	Voltaje U(V)	Intensidad de la Corriente I(A)	Velocidad de la soldadura V_S (m/h)	Consumo de energía C_E (kW-h)	Gasto de electrodo G_E (kg)
Taller	30,00	360,00	88,80	0,1007964	0,0658755
Variante	28,37	246,19	74,34	0,0778428	0,0482213

De la tabla 4 se puede plantear que es posible disminuir el consumo de energía en un 22,8 % y el gasto de electrodo en un 26,8 % con la utilización del punto medio de la frontera de Pareto, manteniendo los parámetros de calidad del cordón en los valores establecidos (para el caso analizado $b = 7,86$ mm y $\rho = 2,27$ mm).

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran la correlación entre los parámetros del régimen de soldadura con el ancho del cordón y la penetración. Estos coinciden con la literatura en los comportamientos, pues se incrementan los valores de p y b con el aumento del voltaje y la intensidad de la corriente, y disminuyen con el incremento de la velocidad.

El método propuesto para la optimización multiobjetivo del proceso de SAW demostró la conveniencia de emplear dos objetivos conflictivos entres sí, con el fin de maximizar la productividad del proceso (coeficiente de depósito); mientras que el consumo de energía y la cantidad de metal fusionado son minimizados. Este procedimiento establece una vía eficiente para la selección de las soluciones más apropiadas, ya que evita la repetición del proceso de búsqueda.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México, por la ayuda brindada en el uso del equipamiento experimental de esta investigación.

Referencias

- Moradpour M, Hashemi S, Khalili K. Multi-objective Optimization of Welding Parameters in Submerged Arc Welding of API X65 Steel Plates. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2015;22(9):870-8.
- Katherasan D, Elias J, Sathiyar P, et al. Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Procedia Engineering*. 2012;38:3913-26.
- Singh R, Garg R, Shukla D. Parametric effect on mechanical properties in submerged arc welding process - A review. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2012;4:747- 57.
- Kumanan S, Raja E. Determination of submerged arc welding process parameters using Taguchi method and regression analysis. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2007;14:177-83.
- Saluja R, Moeed K. Modeling and parametric optimization using factorial desing approach of sumerged arc bead geometry for butt joint. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012;2:505-8.
- Islam M, Buijk A, Rais-Rohani M, et al. Simulation-based numerical optimization of arc weldind process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014;84:54-64.
- Feng J, Li L, Chen Y, et al. Effects of welding velocity on the impact behavior of droplets in gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(11):2163-72.
- Kumar N, Rudrapati R, Pal P. Multi-objective Optimization in through Laser Transmission Welding of Thermoplastics using Grey-based Taguchi Method. *Procedia Materials Science*. 2014;5:2178-87.
- Khan M, Romoli L, Dini G, et al. A simplified energy-based model for laser welding of ferritic stainless steels in overlap configurations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011;60(1):215-8.
- Liu L, Hao X, Song G. A New Laser arc Hybrid Welding Technique Based on Energy Conservation. *Materials Transactions*. 2006;47(6):1611-4.
- Torres L, Reyes F, López V, et al. Multi-objective optimization of a welding process by the estimation of the Pareto optimal set. *Expert Systems with Applications*. 2011;38(7):8045-53.
- Senthilkumar B, Kannan T, Madesh R. Optimization of flux-cored arc welding process parameters by using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;2:1-7.
- Kannan T, Murugan N, Sreeharan B. Optimization of Flux Cored Arc Welding Process Parameter Using Genetic and Memetic Algorithms. *Journal for Manufacturing Science and Production*. 2013;13(4):239-50.
- Katherasan D, Elias J, Sathiyar P, et al. Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Procedia Engineering*. 2012;38:3913-26.
- Deb K, Pratap A, Agarwal A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transections on Evolutionary Computation*. 2002;6(2):182-97.