

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA ECUATORIAL DEL EXTINTOR DE 6KG (PI-6).

**Ing. Reynier Febles García¹, Dr.C. Marcelino Rivas Santana²,
M.Sc. Agustín Almería Baro³**

*1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca
Km.3, Matanzas, Cuba.*

Resumen.

Se propone un método híbrido de optimización para el proceso de soldadura ecuatorial del extintor PI-6, basado en las técnicas desarrolladas por Genichi Taguchi combinadas con Sistema de Inferencia Difusa (FIS). Este método se centra en determinar los juegos de parámetros para los tres niveles de las variables independientes y a partir de ello definir los nueve experimentos que se proponen posteriormente. Como es lógico no basta con tener los experimentos, ya que por sí solos no nos indican cual es el óptimo. Por ello con la ayuda del programa STATGRAPHIS obtenemos el modelo matemático que relaciona los parámetros de la soldadura (voltaje, amperaje y velocidad de la soldadura) con el ancho del cordón. Usando un método híbrido (Taguchi-FIS) se puede determinar, de forma rápida, los valores óptimos de regímenes de soldadura para obtener un mayor ancho del cordón de soldadura con menor calor introducido.

Palabras claves: Optimización; Voltaje; Amperaje; Velocidad de la soldadura; Cordón de soldadura.

1. Introducción

En la actualidad la soldadura es uno de los procesos más ampliamente usados para fabricación y reparación de diversos equipos en todo el campo de la ingeniería, por ello es de gran interés incrementar la calidad y prevenir fallas durante la fabricación o en servicio, para lo cual es necesario obtener información acerca de la forma, dimensiones y esfuerzos residuales. Mediante la simulación numérica, en particular mediante el método de los elementos finitos (Oñate 1992), podemos evaluar los diferentes parámetros y condiciones, sin necesidad de hacer un gran número de ensayos, algo que para las aplicaciones industriales es muy importante.

Según Ambedkar (2012). Soldar es un método eficaz y barato por la unión de metales. La soldadura ha tenido un impacto significativo en un gran número de industrias, levantando su eficacia operacional, productividad y vida de servicio. Soldar es uno de las técnicas de fabricación más comunes y la tendencia en la producción de las fábricas es la de automatizar este proceso para elevar los índices de productividad y calidad de la misma. Para la automatización se ha establecido una relación entre los parámetros del proceso y geometría de la costura de soldadura para predecir y controlar la calidad de la misma. Estas relaciones pueden desarrollarse usando técnicas del plan experimentales.

1.1 Métodos de Optimización.

Optimizar es encontrar el mínimo o el máximo de una función respecto a ciertas restricciones. Sin duda, alcanzar el mínimo o máximo es obtener la "mejor" solución entre otras soluciones factibles. Ahora bien, el mejor proceso debe ajustar el flujo de tareas, entradas y salidas de manera que entregue la mejor calidad al menor costo y en el menor tiempo. Optimización es el método matemático para determinar los valores de las variables que hacen máximo el rendimiento de un proceso o sistema.

Murugan (1993) mostró la relación entre los parámetros de entrada del proceso y la geometría del cordón en la soldadura GMAW mediante el desarrollo de un modelo matemático de cinco factores y cuatro niveles para la predicción de la geometría del cordón de soldadura dentro de la región óptima de los parámetros de control para el revestimiento de acero inoxidable.

La lógica difusa permite grados de veracidad que mide hasta qué punto un determinado objeto es incluido en un conjunto difuso. Los conjuntos difusos corresponden a las variables lingüísticas utilizadas en un lenguaje humano, (Wang, Ming-Der 2006). Xue, Y. et al. (2005) informaron de las posibilidades del método de regresión difusa en el modelado de la anchura del cordón en el proceso automático de soldadura por arco. En su artículo, desarrollaron un modelo para la predicción de las variables del proceso para la obtención de la anchura del cordón óptimo.

Tarng (2000) aplica la lógica difusa en el método de Taguchi para optimizar el proceso de soldadura por arco sumergido con múltiples características de rendimiento. Una matriz ortogonal, la relación de señal de ruido, el índice de rendimiento multi-respuesta y Análisis de Varianza (ANOVA) se emplearon para estudiar las características de rendimiento en el proceso de soldadura por arco sumergido. Los parámetros del proceso, es decir, corriente de arco, la tensión de arco, velocidad de soldadura, electrodo de protuberancia y de la temperatura de precalentamiento se han optimizado con las consideraciones de las características de rendimiento, incluyendo velocidad de deposición y dilución. Los resultados experimentales se proporcionan para confirmar la eficacia de este enfoque.

La filosofía de Taguchi es una herramienta eficaz para un sistema de fabricación de alta calidad según (Antony, F. 2001, Maghsoodloo, Ozdemir, G., Jordan, V. and Huang, C-H. 2004, Rowlands, Antony, J., Knowles, G. 2000, Unal, and Dean, Edwin B. 1991).

Barbera y Piñerocit (2010) han publicado un folleto de nomogramas de diseño ("Matrices ortogonales y gráficas lineales", de 1987, American Supplier Institute), que puede ser utilizado como una guía de diseño. Algunos de los arreglos ortogonales conocidos de Taguchison: (L9, L18, L27 y L36). Los diseños de Taguchison similares a los diseño factorial fraccional. Sin embargo, Taguchi ha introducido varias formas nuevas de concebir un experimento.

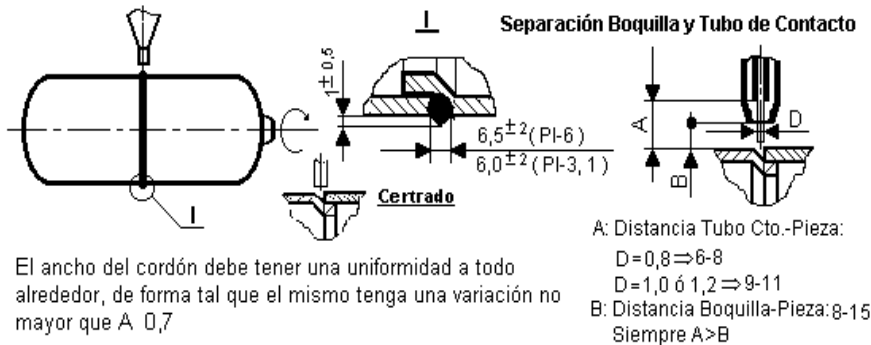
En los últimos tiempos se han utilizado, con gran aceptación, la combinación del método de Taguchi y métodos de inteligencia artificial, tales como: redes neuronales y lógica Difusa expuestos (Lin, Lin, C. L. 2005, Sharma 2010, Thillaivanan, Asokan. P., Srinivasan. K. N., Saravanan. R. 2010).

Tarng (2000), plantea la lógica Difusa aplicada en el método de Taguchi para perfeccionar el proceso de soldadura por arco sumergido.

2. Diseño experimental

2.1 Instrucción técnica para la soldadura ecuatorial utilizada en la Empresa CONFORMAT (I 10-2).

Croquis:



El ancho del cordón debe tener una uniformidad a todo alrededor, de forma tal que el mismo tenga una variación no mayor que A 0,7



Figura 1: Soldadura ecuatorial.

Figura 2: Maquina Criolla.

Descripción de la operación:

- 1.- Posicionar y centrar el extintor ensamblado en el dispositivo.
- 2.- Centrar el alambre para soldar.
- 3.- Colocar protector.
- 4.- Embragar la rotación y accionar la alimentación del alambre para soldar depositando un cordón a todo alrededor hasta que se produzca una monta de 25 a 35 mm.
- 5.- Girar el protector, simultáneamente al apagar el suministro de alambre para soldar, para evitar que quede soldado el mismo.
- 6.- Levantar el protector y retirar el producto.
- 7.- Cada 10 ó 15 extintores quitar salpicaduras a boquilla y aplicar spray de Silicón.

El régimen de soldadura depende de diversos factores: tipo de material base, tipo de alambre, tipo de unión y otros. Los regímenes aproximados para la soldadura automática de las uniones a tope, en el caso de los aceros al carbono y de baja y mediana aleación se deben reajustar de acuerdo a los datos de la tabla siguiente:

PI	Diámetro del alambre (mm)	Corriente de soldadura (A)	Tensión del arco (V)	Velocidad de soldadura (seg)	Flujo de CO ₂ (L/min)
1	0.8	70 – 80	17 – 18	19 – 20	7 – 8
	1.0	70 – 80	18 – 19	20 – 22	10 – 12
3	0.8	70 – 80	17 – 18	26 – 28	7 – 8
	1.0	100-110	18 – 19	28 – 30	10 – 12
6	1.0	100-110	18 – 20	44 – 46	7 – 8
	1.2	130-140	19 – 20	46 – 48	10 – 12
9	1.0	100-110	18 – 20	52 – 54	7 – 8
	1.2	130-140	19 – 20	54 – 56	10 – 12

Tabla 1: Valores tecnológicos recomendados para la soldadura automática con gas protector (MAG).

De los datos anteriores del PI-6 el más aceptado de acuerdo a las condiciones de la producción actual es el segundo caso, pero este difiere en algunos datos como son la velocidad de soldadura, la corriente de soldadura y el flujo de CO₂.

Teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores se fijaron los diferentes niveles y los parámetros que se mantendrán constantes, como son el flujo de CO₂ con 20 L/min, el diámetro del alambre con 1.2 mm y su velocidad de alimentación. Ver tabla 2.7

Símbolo	Parámetro	Unidad	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
U	Voltaje	(V)	19	20	21
I	Corriente	(A)	180	190	200
V	Velocidad	(cm/s)	0,81	1,28	1,44

Tabla 2: Parámetros del proceso y sus niveles.

2.2 Planificación del diseño experimental.

- Determinación del número de experimentos de Taguchi.

El número de experimentos mínimos a realizar se determina por la expresión:

$$N_{exp} = (L - 1) \cdot F + 1 \quad (2.1)$$

Donde:

L: número de niveles seleccionados.

F: cantidad de factores estudiados.

Se recomienda que para cuando la tendencia pueda ser no lineal el número de niveles sea 3 o más, seleccionamos L=3. En cuanto a los factores habíamos fijados anteriormente el voltaje, la corriente y la velocidad, por lo que tenemos F=3. De la expresión (2.1), tenemos:

$$N_{exp} = 7$$

- Selección del arreglo ortogonal de Taguchi.

Teniendo en cuenta los arreglos ortogonales de Taguchi más utilizados podemos seleccionar L9 (33), lo cual significa que se realizaran 9 experimentos con 8 grados de libertad a tres niveles y con tres variables o factores.

Los experimentos se realizaran según la tabla y de forma aleatoria.

Experimentos	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad de soldadura (cm/s)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tabla 3: Arreglo ortogonal de Taguchi L9 (3³).

2.3 Método híbrido utilizado en la optimización de los parámetros.

- **Aplicación de Sistema de Inferencia Difusa (FIS).**

- 1- Cálculo de relación señal-ruido(S / N) de los datos experimentales. Para calcular la relación S / N del porcentaje del material removido (material remove rate, MRR), el criterio es el mayor el mejor (HB) y para Ra ha sido seleccionado el criterio del menor el mejor (LB).

$$S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.2)$$

$$S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

(2.3)

- 2- La relación S / N ha sido normalizada basado en el criterio el mayor el mejor (HB).

$$xi(b) = \frac{y_i(k) - \text{mín}y_i(k)}{\text{máx}y_i(k) - \text{mín}y_i(k)}$$

(2.4)

$$xi(b) = \frac{\text{mín}y_i(k) - y_i(k)}{\text{mín}y_i(k) - \text{máx}y_i(k)} \quad (2.5)$$

- 3- La relación S / N normalizada correspondiente a las respuestas individuales que se han alimentado como entradas para un Sistema de Inferencia Difusa (FIS). Para cada uno de los parámetros de entrada de siete función de membresía tipo Gaussiana (MFs) que han sido elegida como: Muy bajo (VL), baja (L), parcialmente bajo (FL), Medio (M), parcialmente alto (FH), alta (H) y muy alta (VH). Con base en la asociación cartográfica de regla difusa FIS entradas múltiples combinadas en una sola salida denominado como Índice Característico Multi-objetivo (MPCI). La valoración lingüística de MPCI ha sido representado por siete función de membresía tipo Gaussiana (MFs) que han sido elegidas como: Muy bajo (VL), baja (L), parcialmente bajo (FL), Medio (M), parcialmente alto (FH), alta (H) y muy alta (VH). Estos valores lingüísticos se han transformado en valores precisos por el método de fuzzificación.

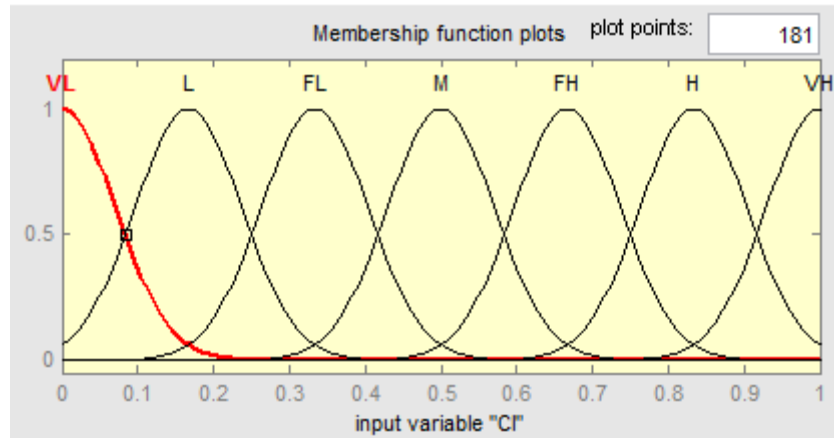


Figura 3: Función de membrecía de entrada.

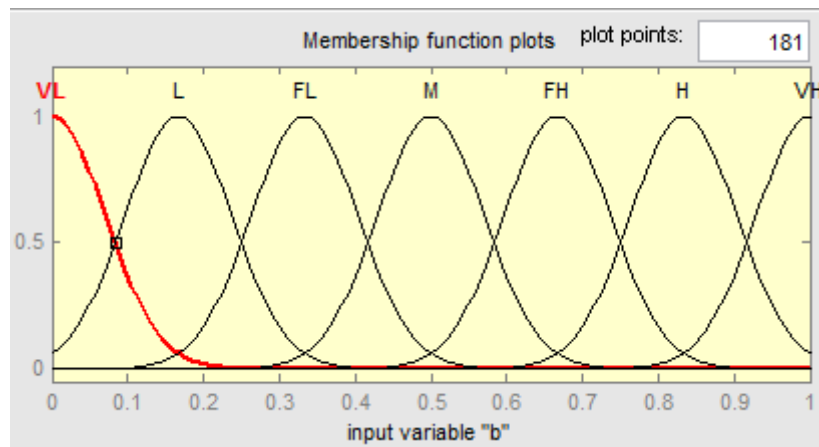


Figura 4: Función de membrecía de entrada.

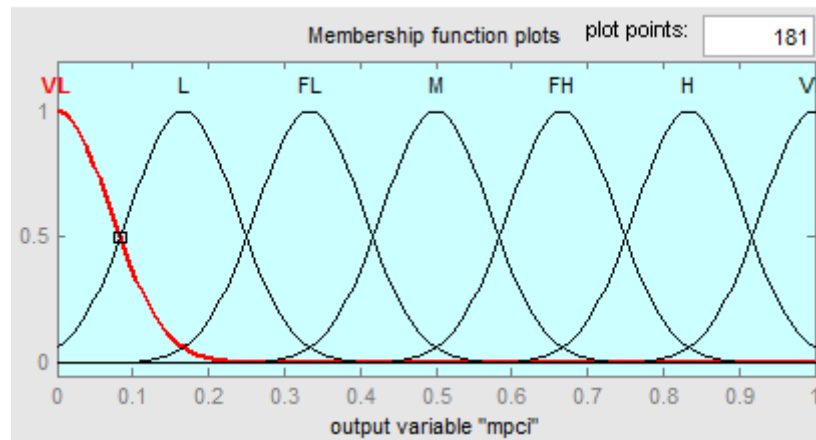


Figura 5: Función de membrecía de salida.

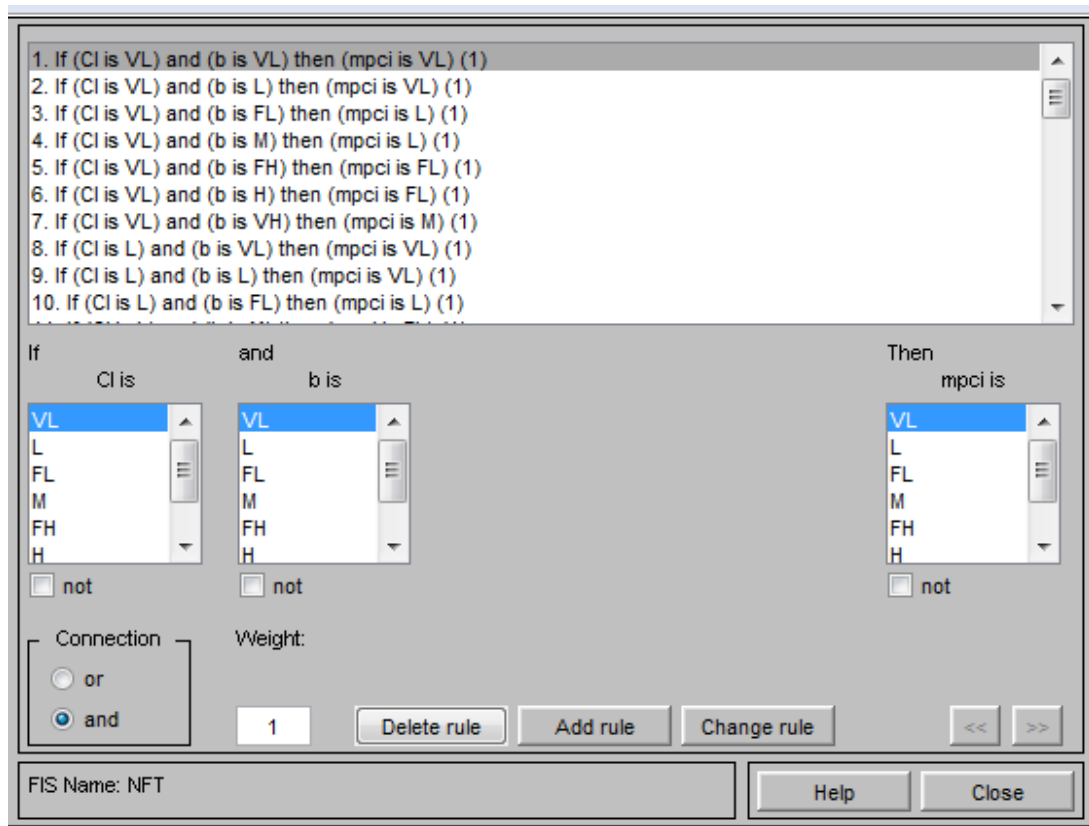


Figura 6: Editor de reglas

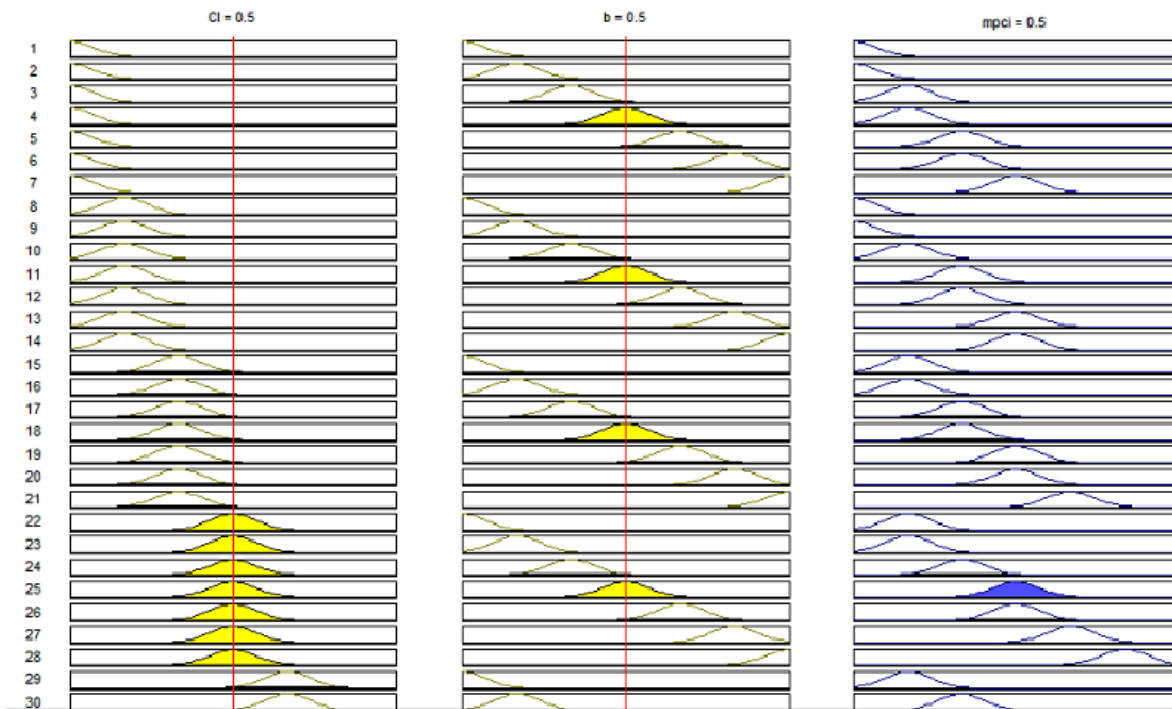
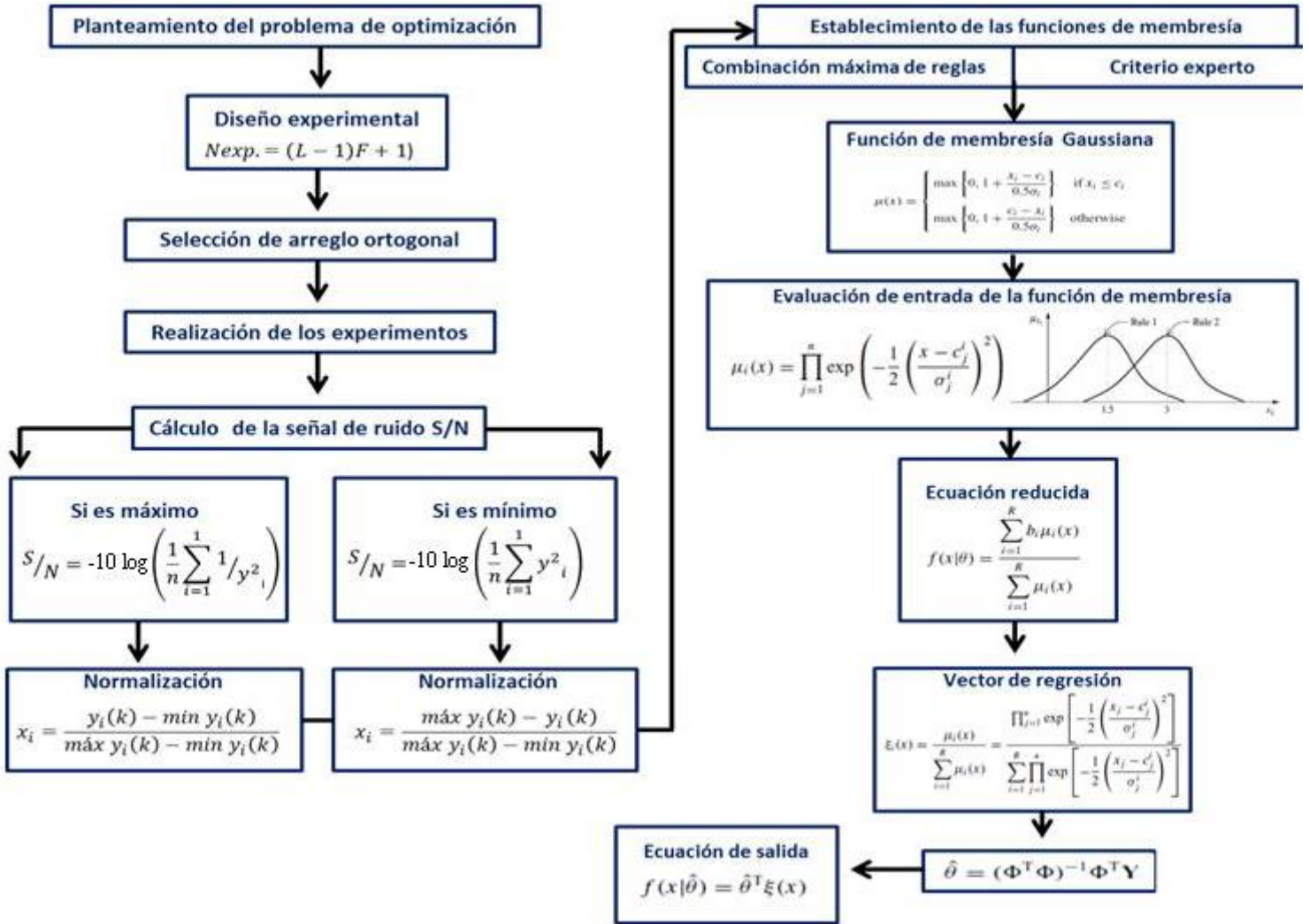


Figura 7: Aplicación grafica de la regla.

- 4- Los valores precisos de MPCII se optimizan mediante el uso de la filosofía de Taguchi.

- **Diagrama en Bloque.**



3. Análisis de los resultados

3.1 Modelos matemáticos y selección de los parámetros óptimos de la soldadura.

3.1.1 Resultados experimentales obtenidos.

En el análisis realizado se toman como parámetros de la geometría del cordón de soldadura:

- Ancho del cordón (b) [mm].

- Calor Introducido (CI) [cal/cm].

El diseño experimental y los valores medios se muestran en la tabla 3.1.

Experimentos	U (V)	I (A)	V (cm/s)	b (valor medio) (mm)	b1	b2	b3
1	19	180	0,81	7,37	7,2	7,6	7,3
2	19	190	1,28	5,0	4,9	5,0	5,1
3	19	200	1,44	4,57	4,3	4,5	4,9
4	20	180	1,28	6,27	6,1	6,3	6,4
5	20	190	1,44	4,63	4,3	4,7	4,9
6	20	200	0,81	9,6	9,2	9,7	9,9
7	21	180	1,44	5,0	5,0	4,9	5,1
8	21	190	0,81	8,8	8,8	8,9	8,7
9	21	200	1,28	7,1	7,1	7,0	7,2

Tabla 4: Diseño experimental usando el arreglo ortogonal L9 (33) y resultados obtenidos.

3.1.2 Función pérdida y su señal de ruido S/N.

Teniendo en cuenta que lograr un mayor depósito de material (mayor ancho del cordón y refuerzo de la soldadura y menor calor introducido) garantiza valores de resistencia superiores utilizamos el criterio “el mayor-el mejo para el ancho del cordón y el menor-el mejor para el calor introducido.

En este caso la función pérdida y la señal de ruido pueden ser expresada por las ecuaciones: (2.2 y 2.3).

Donde:

n- número de experimentos.

yi- valor experimental de la característica.

La señal de ruido tanto para la geometría del cordón como el calor introducido fue calculada para los 9 experimentos (Ver tabla 5).

Experimentos	U (V)	I (A)	V (cm/s)	b (mm)	CI (cal/cm ²)	S/N (b)	S/N (CI)
1	19	180	0,81	7,37	861,33	17,35	-58,703
2	19	190	1,28	5,0	575,34	13,98	-55,198
3	19	200	1,44	4,57	538,33	13,00	-54,621
4	20	180	1,28	6,27	573,75	15,94	-55,174
5	20	190	1,44	4,63	538,33	13,32	-54,621
6	20	200	0,81	9,6	1007,41	19,65	-60,064
7	21	180	1,44	5,0	535,50	13,98	-54,575
8	21	190	0,81	8,8	1004,89	18,89	-60,042
9	21	200	1,28	7,1	669,38	17,03	-56,513

Tabla 5: Razón de la señal de ruido S/N.

A continuación han sido normalizadas las señales de ruido (Tabla 6)

U	I	V	S/N(Nb)	S/N(NCI)	MPCI valores preciso
19	180	0,81	0,654	0,248	0,415
19	190	1,28	0,147	0,886	0,317
19	200	1,44	0,000	0,992	0,317
20	180	1,28	0,443	0,891	0,610
20	190	1,44	0,048	0,992	0,316
20	200	0,81	1,000	0,000	0,485
21	180	1,44	0,147	1,000	0,329
21	190	0,81	0,886	0,004	0,385
21	200	1,28	0,606	0,647	0,608

Tabla 6: Normalización de la S/N.

MPCI		S/N de MRR normalizada						
		VL	L	FL	M	FH	H	VH
S/N de Ra Normalizada	VL	VL	VL	L	L	FL	FL	M
	L	VL	VL	L	FL	FL	M	M
	FL	L	L	FL	FL	M	M	FH
	M	L	L	FL	M	M	FH	H
	FH	L	FL	FL	M	FH	H	H
	H	L	FL	M	FH	FH	H	VH
	VH	FL	FL	M	FH	H	H	VH

Tabla 7: Matriz de reglas difusas

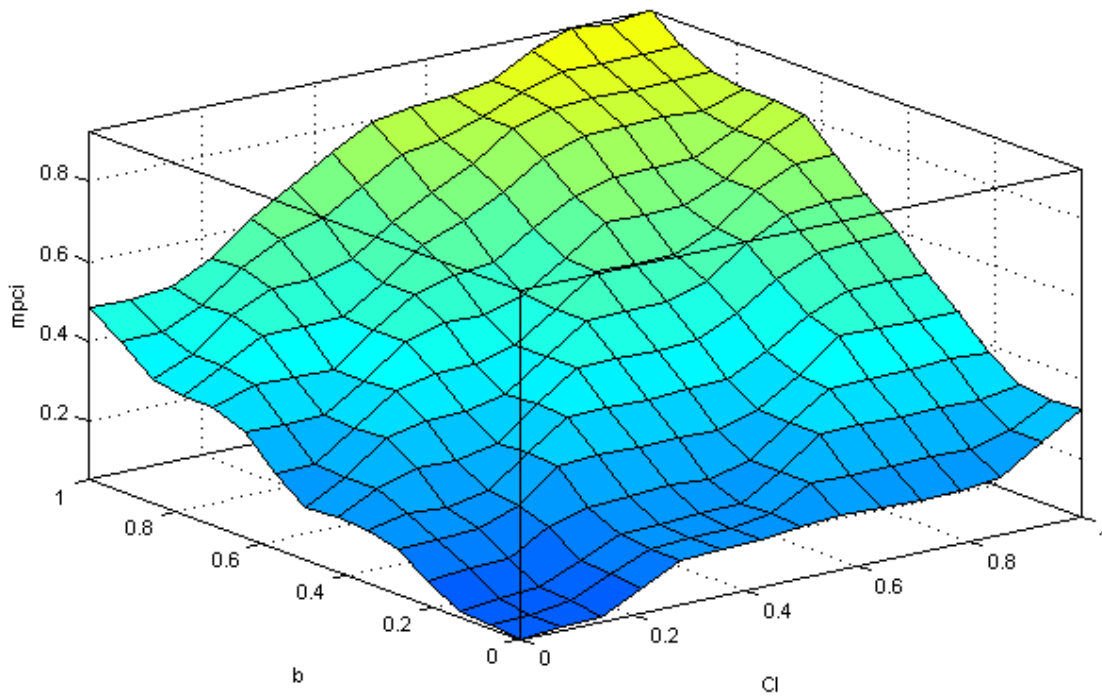


Figura 8: Visor de superficie.

Posteriormente es necesario calcular la media de todos los S/N correspondientes a los parámetros U, I y V para cada nivel. (Ver Tabla 8).

Símbolo	Parámetro del proceso	S/N (dB)			Media total. (S/N)
		nivel 1	nivel 2	nivel 3	
U	Voltaje (V)	9,199	7,196	7,405	7,828
I	Corriente (A)	6,862	9,425	6,198	
V	Velocidad (cm/s)	7,423	6,862	9,880	

Tabla 8: Media de las S/N (dB) para el ancho del cordón b y el calor introducido (CI).

Por tanto los parámetros óptimos para el máximo ancho del cordón y el menor calor introducido corresponden con:(U2 I3 V2).

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran la relación entre los niveles y la señal de ruido para cada parámetro del ancho (b) del cordón.

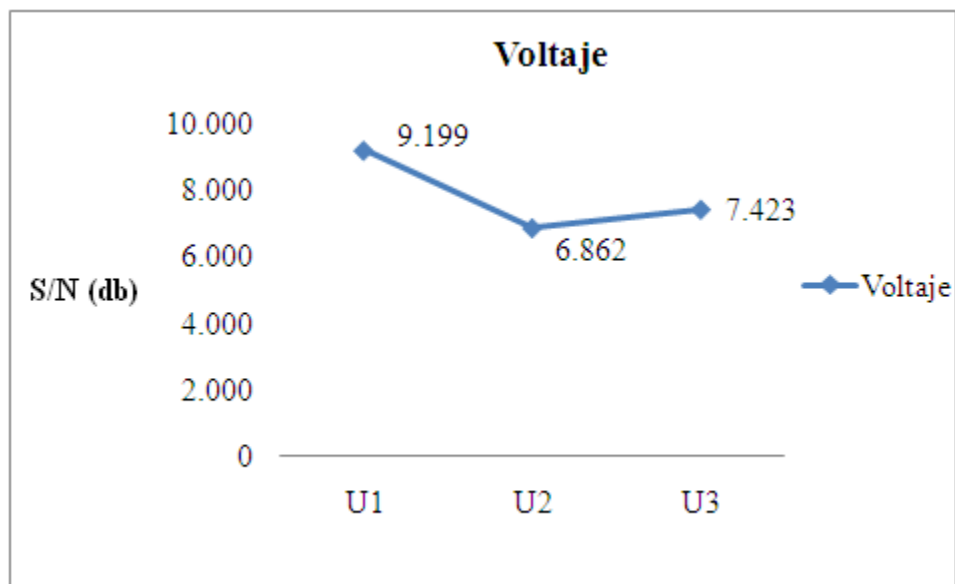


Figura 9: Gráfica de S/N contra voltaje para b.

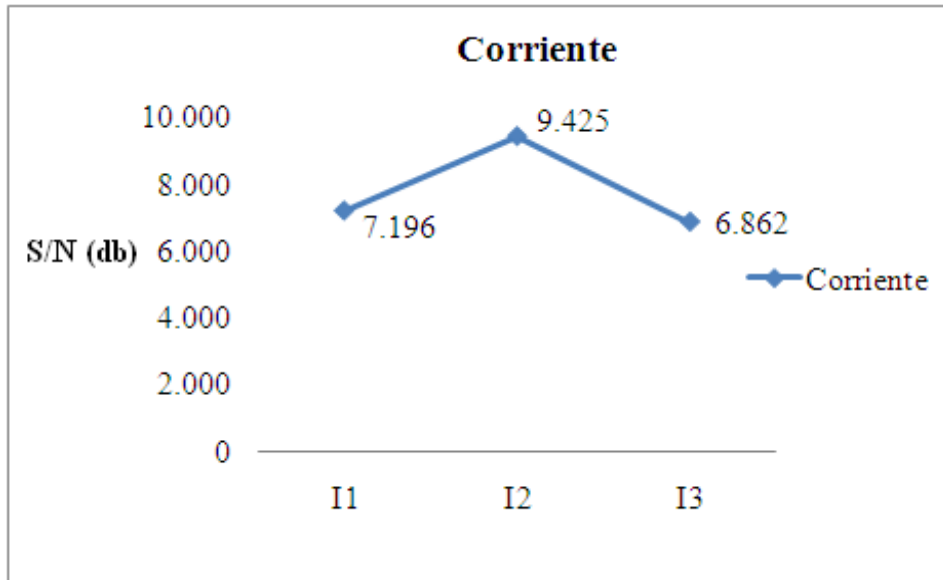


Figura 10: Gráfica de S/N contra corriente para b.

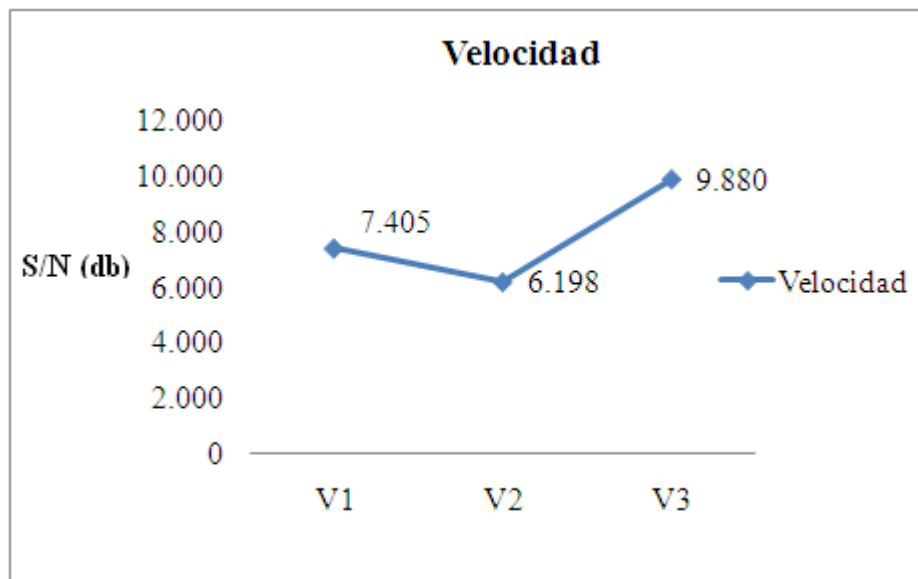


Figura 11: Gráfica de S/N contra velocidad para b.

3.1.3 Análisis estadístico.

Como resultado del análisis de regresión en STATGRAPHIS se obtiene el modelo:

$$b = -8,09 + 0,04 \cdot I + 0,68 \cdot U - 5,96 \cdot V \quad (3.1)$$

El modelo obtenido presenta un buen ajuste para un 93,99% de confiabilidad, siendo significativas todas las variables analizadas. Lo cual demuestra la influencia de los parámetros en el proceso, siendo mayor en el caso de la velocidad.

El error normal de la estimación muestra la desviación normal de los residuos de 0,47159. Este valor puede usarse para construir los límites de la predicción para las nuevas observaciones.

La relación entre los valores predichos y observados muestran un buen comportamiento esto se observa en la figura 12.

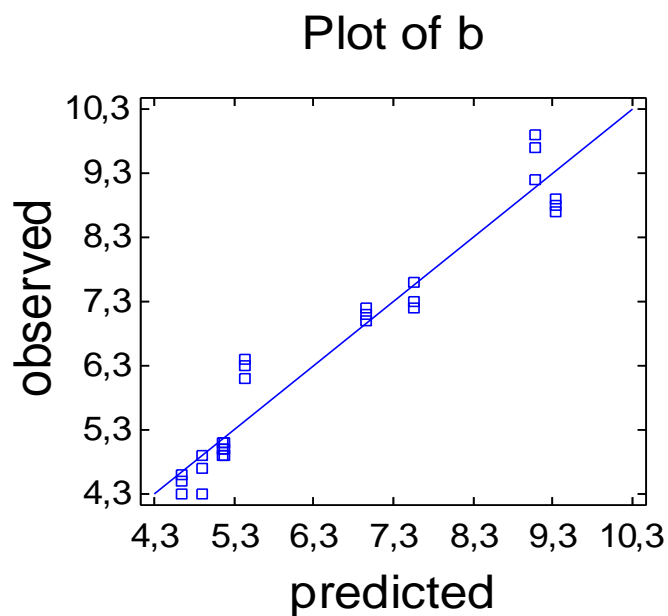


Figura 12: Valores predichos vs observados de b.

	Parámetros del proceso inicial.	Valor predicho.
Nivel.	U=20 V I=190 A V=1.28 cm/s	U2I3V2
Ancho del cordón (mm).	6.2	6,28

Tabla 13. Valores óptimos de régimen de soldadura.

Conclusiones

Empleando el método híbrido (Taguchi-FIS) se logró optimizar los regímenes de soldadura los cuales nos garantizan un mayor ancho del cordón de soldadura con menor calor introducido, teniendo como resultado una velocidad de soldadura (V) de 1.28 cm/s con una intensidad de la corriente (I) de 200 A y un voltaje (U) de 20 V, lo que proporciona un ancho del cordón de 6,28 mm con un calor introducido de 637,50 cal/cm². Después de realizar un análisis de los resultados obtenidos mediante modelos matemáticos se llegó a la conclusión que en la empresa los regímenes de soldadura que se emplean según estos resultados son casi óptimos. A raíz de un análisis realizado durante la implementación del método en este proceso se pudo concluir que el mismo puede ser aplicado a los otros procesos de la empresa y así disminuir el costo de fabricación y obtener productos con mejor calidad.

Bibliografía.

- Al-Aomar R. A. Robust Simulation-Based Multicriteria Optimization Methodology. Winter Simulation Conference 2002.
- Ambedkar B.R. (2012). Parametric Effect on Mechanical Properties in Submerged arc welding process - A review. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 02 February 2012.
- Antony Ja.A, F. (2001). Teaching the Taguchi Method to Industrial Engineers. Work Study 50 pp. 141-149.
- Barbera R. PJ (2010). Dr. Genichi Taguchi. Padre de la Calidad. Universidad de Caragobo:.
- Chander R.S, Seow, H. P., & Cheong F. L. (1997). Journal Material Processing Technology 72 pp. 124-128.
- Chen DC, Chen, C. F. (2007). Journal Material Processing Technology. 190 pp. 130-137.
- Correia D.S, Gonçalves, Sebastião, S. C. Jr. and Ferraresi, V. (2004). GMAW Welding Optimization Using Genetic Algorithms. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 26 pp. 28-33.
- Datta S, Bandyopadhyay, A., Pal, P. K. (2008). International Journal of Advanced Manufacturing Technology 39 pp. 1136-1143.
- Fung, Kang, P.C. (2005). Journal Material Processing Technology 170 pp. 602-610.
- Ghosh A., Chattopadhyaya, S. and Sarkar, P. (2007). Effect of input parameters on weld bead geometry of SAW process, Proceeding.
- Goutam N, Datta S, Bandyopadhyay A, Bandyopadhyay A, Kumar P (2010). Analyses of hybrid Taguchi methods for optimization of submerged arc Weld. Jadavpur University, INDIA: Department of Mechanical Engineering.
- Group UM (1999). Welding Material Control. Technical Application Brief 2 pp. 1-5.
- Gunajar V, Murugan., N (2000). Weld J pp. 286-338.
- INFRA . Manual de Conceptos Básicos en Soldadura y Corte.
- I 10-2, Instrucción Técnica para Soldadura Ecuatorial.
- J PR (1982). Taguchi technique for quality engineering (McGraw-hill Book Company).
- Jackson C.E, Shruballs, A. E. (1953). Weld J 32 pp. 172-178.

- Jeyapaul R, Shahabudeen, P. and Krishnaiah, K. (2005). Quality Management Research by Considering Multi-Response Problems in the Taguchi Method-A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26 pp. 1331-1337.
- Kim D, Kang, M. and Rhee, S. (2005). Determination of Optimal Welding Conditions with a Controlled Random Search Procedure. *Welding Journal* pp. 125-129.
- Kim D, Rhee, S., Park, H. (2002). Modeling and Optimization of a GMA Welding Process by Genetic Algorithm and Response Surface Methodology. *International Journal of Production Research* 40 (7) pp. 1699-1711.
- Kim D, Rhee S. (2003). Optimization of GMA Welding Process using the Dual Response Approach. *International Journal of Production Research*, Volume 41, Number 18, pp. 4505-4515 41 (18) pp. 4505-4515.
- Kim D, Rhee S. (2004). Optimization of Gas Metal Arc Welding Process using the Desirability Function and the Genetic Algorithm. *Journal of Engineering Manufacture* 218 (1) pp. 35-41.
- Kumanan S, Dhas Raja, J. E. (2007). Determination of submerged arc welding process parameters using Taguchi method and regression analysis. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* 14 pp. 177-183.
- Kumanan 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.
- Lim S.H, Lee, C-M., Chung, W.J. (2006). *International Journal of Precision -Engineering and Manufacturing* 7 pp. 18-23.
- Lin J.L, Lin, C. L. (2005). *Journal Material Processing Technology* 160 pp. 9-14.
- Maghsoodloo S, Ozdemir, G., Jordan, V. and Huang, C-H. (2004). Strengths and Limitations of Taguchi's Contributions to Quality, Manufacturing, and Process Engineering. *Journal of Manufacturing Systems* 23 pp. 73-126.
- Montgomery D.C. (1991). *Design and Analysis of Experiments*, Wiley. Singapore.
- Murugun N, Parmar, R.S., Sud, S.K. (1993). Effect of submerged arc welding process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing. *Journal of Material Processing Technology* 37 pp. 767-780.
- Nagesh D, Datta, G.L. (2002). Prediction of weld bead geometry and penetration in shield metal arc welding using artificial neural network. *Journal of Material Processing Technology* 123 pp. 303-312.
- Oñate E. (1992). *Cálculo de Estructura por el Método de Elementos Finitos*. Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería.

- Price W.L. (1977). A Controlled Random Search Procedure for Global Optimization. *The Computer Journal* 20 (4) pp. 367-370.
- Rowlands H, Antony, J., Knowles, G. (2000). "The TQM Magazine". 12 pp. 78-83.
- S PG (1993). *Taguchi Methods: A hand-on approach*. Addison-Wesley, Massachusetts, USA.
- Saluja R, Moeed K. M. (2012). Modeling and Parametric Optimization using Factorial Design Approach of Submerged Arc Bead Geometry for Butt Joint. *International journal of Engineering Research and Applications* 2 pp. 505-508.
- Sathiya, P, Aravindan, S. and NoorulHaq, A (2004). Friction Welding of Austenitic Stainless Steel and Optimization of Weld Quality. *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering*.
- Shahi A, Pandey S. (2008). Modelling of the effects of welding condition on dilution of stainless steel cladding produced by gas metal arc welding. *Journal of Material Processing Technology* 196 pp. 339-344.
- Sharma V. (2010). Multi response optimization of process parameters based on Taguchi - fuzzy model for coal cutting by water jet technology. *International Journal on design and Manufacturing Technologies* 4 pp. 10-14.
- Tarng Y.S, Juang, S. C., Chang, C. H. (2002). The Use of Grey-Based Taguchi Methods to Determine Submerged Arc Welding Process Parameters in Hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology* 128 pp. 1-6.
- Tarng Y.S, Yang, W. H. and Juang, S. C. (2000). The Use of Fuzzy Logic in the Taguchi Method for the Optimization of the Submerged Arc Welding Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16 pp. 688-694.
- Thillaivanan A, Asokan. P., Srinivasan. K. N., Saravanan. R. (2010). Optimization of operating parameters for EDM process based on the Taguchi method and artificial neural network. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, Vol. 2(12), pp. 6880 - 6888. 2 (12).
- Tsai J.T, Liu, Tung-Kuan and Chou, Jyh-Horng (2004). "Hybrid Taguchi-Genetic Algorithm for Global Numerical Optimization". *Evolutionary Computation, IEEE Transactions* 8 (4) pp. 365-377.
- Unal, R, Dean, Edwin B. *Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview* 1991.
- Vijian P, Arunachalam, V.P. (2006). *Journal of Materials Processing Technology* 180 pp. 161-166.

- Wang, Jen T, Jean, Ming D. (2006). Optimization of Cobalt-Based Hardfacing in Carbon Steel using the Fuzzy Analysis for the Robust Design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28 pp. 909-918.
- Xie Y.M. et al. (2007). *Journal of Zhejiang University Science A* 8 pp. 805-811.
- Xue Y, Kim, I. S., Son, J. S., Park, C. E., Kim, H. H., Sung, B. S., Kim, I. J., Kim, H. J. and Kang, B. Y. (2005). Fuzzy Regression Method for Prediction and Control the Bead Width in the Robotic Arc-Welding Process. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 164-165, pp. 1134-1139. 164-165 pp. 1134-1139.
- Yang L.J, Chandel, R. S. (1993). *Weld J* 72 pp. 11-18.
- Yang L.J, Chandel, R. S., Bibby, M. J. (1993). *Weld J* 72 pp. 11-18.
- Zhang J.Z, Chen, J. C., Kirby, E. D. (2007). *Journal of Materials Processing Technology* 184 pp. 233-239.