

Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.
Facultad de Ingenierías.



OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN DE SOLDADURA DE CILINDROS DE GAS UTILIZANDO EL MÉTODO TAGUCHI – GREY.

Tesis Presentada en Opción al Título Académico de Máster en Ingeniería
Asistida por Computadora.

Autor: Ing. Félix Alberto Collazo Gómez.

Tutor: Dr.C. Marcelino Rivas Santana.

Matanzas, 2013.

RESUMEN.

La selección de los parámetros de la soldadura más apropiados es un aspecto importante en los procesos de soldadura por arco sumergido. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos mecánicos, térmicos y metalúrgicos involucrados en el proceso, obtener los modelos analíticos fiables es una tarea muy difícil. En este trabajo se propone el uso del método de optimización multiobjetivo de Grey-Taguchi para la optimización de los procesos de soldadura bajo arco sumergido de recipientes de gas de 10 kg. Tres parámetros (voltaje, intensidad de la corriente y velocidad de la soldadura) fueron seleccionados como variables dependientes y el ancho del cordón, la altura del refuerzo, la penetración de la soldadura y el calor introducido fueron los parámetros a optimizar. Un L9 (3³) arreglo ortogonal fue seleccionado y, consecuentemente se llevaron a cabo nueve experimentos. Los parámetros óptimos fueron obtenidos maximizando la respuesta y la señal de ruido. Un modelo de regresión lineal fue ajustado desde los resultados experimentales y el valor óptimo del ancho, la penetración y la altura del refuerzo del cordón fue predicho. Se ejecutó la validación de los experimentos y se obtuvo una buena correspondencia con los valores predichos. El estudio desarrollado puede arrojar una importante reducción en los costos de producción de los cilindros de gas.

Palabras claves: Soldadura bajo arco sumergido, Optimización, Método de Taguchi.

ABSTRACT.

Selection of the most proper welding parameters is a key issue in submerged arc welding processes. However, due to the complexity of the mechanical, thermal and metallurgical phenomena involved in the processes, obtaining reliable analytical models is a very difficult task. In this work it is proposed the use of the Grey relational analysis and Taguchi method design for optimizing the submerged arc welding process of a 10 kg gas recipient. Three parameters (voltage, current intensity and welding speed) were selected as independent variables and the heat affected zone, bead width, bead height, penetration was the optimization target. A L9 (3^3) orthogonal array was chosen and, consequently, nine experiments were carry out. The optimal parameter levels were obtained maximizing not only the response but also the signal noise ratio. A lineal regression model was adjusted from the experimental results and the bead width, bead height and penetration for the optimal parameters was predicted. A validation experiments was executed and a very good matching was found with the predicted value. The developed study can allow and important reduction in the production costs of the gas cylinders.

Keywords: Submerged arc welding, Optimization, Taguchi method.

TABLA DE CONTENIDO.

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.	iv
TABLA DE CONTENIDO.	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. Estado del Arte.....	4
1.1. Soldadura Bajo Fundente (SAW).	4
1.1.1. Fundamento de la Soldadura por Arca Sumergido (SAW).	4
1.2. Regímenes de trabajo utilizados en la Soldadura por Arco Sumergido.....	6
1.3. Influencia de los parámetros de soldadura: Voltaje, Corriente y Velocidad de soldadura sobre la geometría del cordón.	8
1.4. Características de los electrodos y tipos de fundentes usados en la Soldadura por Arco Sumergido.	10
1.5. Investigaciones realizadas en la optimización de los parámetros de soldadura.	12
1.5.1. Método de optimización multiobjetivo de Grey-Taguchi.	12
1.6. Conclusiones parciales del Capítulo.	13
CAPÍTULO 2. Materiales y Métodos.....	14
2.1. Propiedades químicas y mecánicas de los materiales utilizados.	14
2.1.1 Metal base (Chapa).	14
2.1.2 Metal de aporte (Electrodo).	15
2.1.3 Fundente.....	15

2.2. Características Técnicas del Proceso.	15
2.2.1. Características técnicas de la máquina de soldadura por arco sumergido	15
2.2.2. Extensión del electrodo (Stickout)	16
2.2.3. Posición del electrodo	17
2.3. Recomendaciones utilizadas de la geometría del cordón.	18
2.4. Método de Optimización Multiobjetivo Grey-Taguchi.	19
2.4.1. Detalle experimental.	19
2.4.2. Procesamiento de los datos.	21
2.4.3. Parámetros del proceso y pruebas realizadas.....	23
2.5. Conclusiones parciales del capítulo.....	25
CAPÍTULO 3. Optimización del Proceso de Soldadura.	26
3.1. Método de Optimización Multiobjetivo Grey-Taguchi.	26
3.1.1. Evaluación de la condición del óptimo.	26
3.1.2. Análisis de Varianza.	30
3.1.2. Confirmación de los resultados.....	31
3.2. Comprobación del régimen de soldadura óptimo.	32
3.3. Conclusiones parciales del capítulo.....	62
CONCLUSIONES.	34
RECOMENDACIONES.	35
BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXOS.....	40

INTRODUCCIÓN.

La soldadura por arco eléctrico es un método eficaz y barato para la fabricación de piezas y estructuras metálicas. La misma ha tenido un impacto significativo en un gran número de industrias, incrementando su eficacia operacional y su productividad. Soldar es, por lo tanto, una de las técnicas de fabricación más comunes y la tendencia es automatizar este proceso para elevar los índices de productividad y calidad de la misma [S. Datta et al., 2010]

En el caso específico de los cilindros de gas se utiliza la soldadura por arco sumergido (submerged arc welding, SAW), ya que no sólo permite el uso de intensidades mayores, lo cual se traduce en un incremento en la productividad, sino también garantiza un mayor control sobre el arco, lo cual garantiza mayor uniformidad y menor cantidad de defectos en la costura. [Shigeo Oyama et al., 2007]

Naturalmente, el uso de un régimen de soldadura adecuado es indispensable para aprovechar todas las ventajas de la SAW. Sin embargo, la determinación de este régimen óptimo está lejos de ser un asunto sencillo ya que la propia naturaleza del proceso de soldadura, donde intervienen complejos procesos eléctricos, químicos y metalúrgicos, hace que su modelación sea extremadamente difícil, sin que hasta ahora se haya encontrado un modelo fenomenológico completamente satisfactorio, por lo que continúa siendo un tema de investigación de gran actualidad e importancia.

En la Fábrica ECILGAS de la Provincia de Matanzas se realiza una producción que una parte se destina al consumo nacional (sustituye importaciones) y la otra se destina a la importación, fundamentalmente a un convenio existente entre Cuba y Venezuela. Por tal motivo la cifra de

producción necesaria sobrepasa 360000 unidades anuales, tomando gran importancia la optimización de todos los parámetros que influyen en el proceso, siendo un aspecto a tener en cuenta la soldadura ecuatorial del cilindro.

En estos momentos se realizan varias pruebas y se propone un régimen de soldadura, pero no se fundamentan los valores propuestos con un método que garantice los valores óptimos del proceso.

Por lo que se propone como problema científico:

¿Cómo obtener los parámetros óptimos de la soldadura del cordón a partir de un método adecuado que garantice la exactitud de los resultados y eficiencia económica en condiciones de producción?

Para dar solución a este problema se ha planteado la siguiente hipótesis:

Si se aplica la metodología de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi es posible determinar el régimen óptimo de soldadura para los cilindros de gas licuado de petróleo de 10 Kg con la exactitud adecuada y menor número de experimentos. Lo cual satisface las condiciones de producción.

Con el objetivo de validar la hipótesis anterior, se ha trazado el siguiente Objetivo general:

Determinar el régimen óptimo de soldadura de los cilindros de gas licuado de petróleo de 10 Kg a través de un estudio experimental según el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto, se han planteado los siguientes Objetivos Específicos:

1. Realizar un análisis bibliográfico teniendo en cuenta los aspectos relacionados con el proceso de soldadura automática bajo fundente (SAW).
2. Caracterizar los materiales del electrodo, fundente, plancha y máquina de soldar.
3. Aplicar el estudio experimental según el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi.
4. Validar experimentalmente el régimen óptimo seleccionado en condiciones de producción.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.

El objetivo de este capítulo es presentar una revisión crítica de la bibliografía científica publicada sobre la soldadura bajo arco sumergido (SAW) y la optimización de los parámetros de soldadura aplicando el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi, de forma tal que sirva de marco teórico-referencial al resto de la investigación.

1.1. Soldadura Bajo Fundente (SAW).

1.1.1. Fundamento de la Soldadura por Arco Sumergido (SAW).

La soldadura manual por arco eléctrico es un proceso bastante flexible, no exige equipos complejos y de grandes dimensiones, por eso puede ser ampliamente aplicado en las más variadas condiciones de producción para construir y reparar estructuras metálicas; pero su deficiencia principal reside en su productividad relativamente baja, sobre todo al soldar piezas de metal grueso. Es por eso, que la tendencia general en el desarrollo técnico de la soldadura es la automatización del proceso [Glizmanenko, 1981].

Uno de los más avanzados métodos en la tecnología de soldadura es la soldadura automática y semiautomática por arco sumergido, desarrollada y patentada por la Unión Soviética en 1930 [S. Humanan, 2007].

En la soldadura por arco sumergido el electrodo se alimenta hacia la pieza de forma continua y con velocidad controlada, en función del tipo de material a soldar, espesor de la pieza e intensidad de corriente, para mantener constante la longitud del arco. En todo momento se está aportando fundente en la cantidad y a la velocidad necesarias para la soldadura, de forma que el calor producido por el arco funda progresivamente parte de este fundente. Como resultado, se forma un manto de fúndete que flota sobre el baño de soldadura, proporcionando así mayor protección al cordón [Gunaraj et al., 1999] y [Datta et al., 2008]. El esquema de la soldadura por arco sumergido se muestra en la (Figura 1).

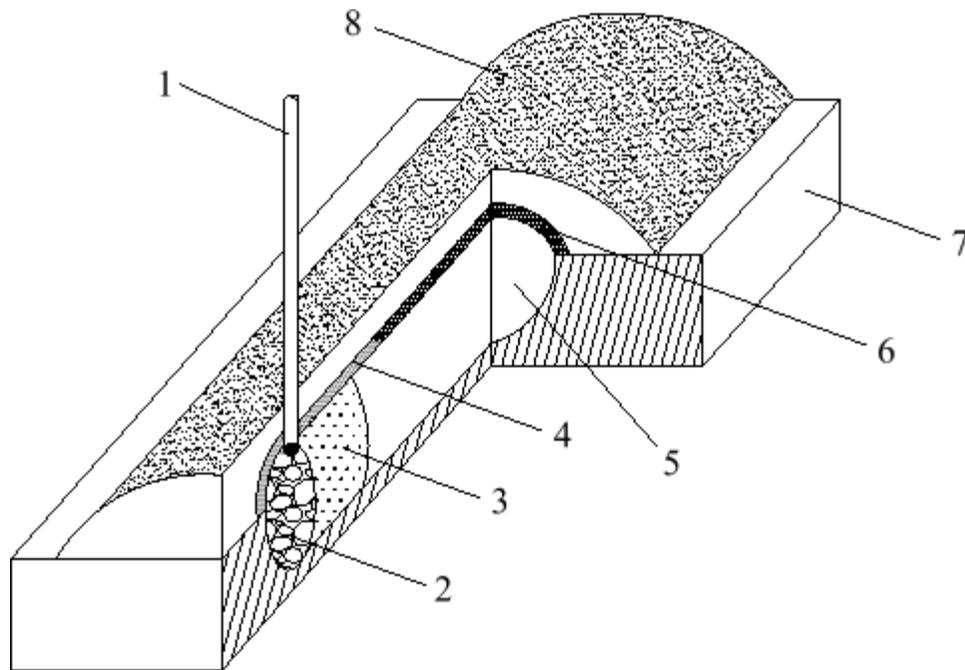


Figura 1: Esquema de la soldadura por arco sumergido.

1 - Alambre, 2 - Pozo de fusión, 3 - Soldadura líquida, 4 - Escoria líquida,
5 - Depósito líquido, 6 - Escoria sólida, 7 - Material base, 8 - Fundente.

Ventajas de este proceso:

- Gran carga de corriente con la cual se puede cargar el alambre.
- Grandes avances entre 10 y 300 metros por horas.
- Versatilidad en los diámetros del alambre, de 2 a 13 mm.
- Se puede soldar con varios alambres a la vez.
- Gran carga de fusión de 3 a 80 Kg. por hora.
- No hay deslumbramiento.
- El proceso no provoca gases ni vapores que contaminen el ambiente.
- Bajas tensiones en la soldadura.
- Bajo costo de mano de obra por Kg. de soldadura depositado.

Desventajas de este proceso:

- El cordón de soldadura no es visible durante el proceso.
- Cristalización gruesa en forma de tallos.
- Problemas de grietas en caliente.
- Posición de soldadura únicamente horizontal.

1.2. Regímenes de trabajo utilizados en la soldadura por arco sumergido.

Por regímenes de trabajo de soldadura automática se entiende la corriente de soldadura, la tensión de arco, la velocidad de soldadura, tipo de polaridad y tipo de corriente [Glizmanenko, 1981].

Normalmente en los procesos se suelda con corriente continua y polo positivo [Little, 2004]: Por los siguientes motivos:

- Buena penetración.
- Buena apariencia.
- Buena ignición.
- Arco estable.
- Poca tendencia a poros.
- Hasta 900 amperes. (Por encima de este amperaje se forman campos magnéticos tan fuertes que contraen el cordón y el sople magnético es muy grande).

La corriente alterna se utiliza cuando se suelda con múltiples alambres y con corrientes mayores a 900 amperes.

La corriente continua con polo negativo se utiliza para los revestimientos duros. Esta polaridad tiene la menor penetración y además permite mayor carga de fusión. También el consumo de fundente es menor, este factor debe tomarse en consideración cuando se utilizan fundentes activos. [Yang et al., 1992].

La tensión tiene su mayor influencia en la geometría del cordón, mayor tensión más ancho el cordón y mayor consumo de fundente [Murugun et al., 1993].

La corriente es la de mayor influencia en el proceso, esta determina la penetración, la carga de fusión y la geometría de cordón [Nagesh et al., 2002].

La velocidad de soldadura influye en la geometría del cordón [Murugun et al., 1999], pero su mayor influencia está presente en el calor introducido a la pieza, la pérdida calorífica, el consumo de fundente, mordedura, grietas y poros [Murugun et al., 1999].

1.3. Influencia de los parámetros de soldadura: voltaje, corriente y velocidad de soldadura, sobre la geometría del cordón.

Para obtener buenas uniones soldadas es fundamental una correcta regulación de los parámetros de soldadura [Ghosh et al., 2007].

Intensidad de corriente de soldadura; es el parámetro de mayor influencia ya que determina la tasa de deposición e influye en la forma y penetración del cordón. Una intensidad excesiva de la corriente produce un cordón estrecho con sobre espesor o exceso de penetración. Por el contrario, una intensidad demasiado baja produce arcos inestables y falta de penetración (Figura 2).

Un aumento de la intensidad, sin variar otros parámetros, da lugar a:

- Aumento de la penetración.
- Aumento de la densidad de corriente.
- Aumento de la velocidad de alimentación del hilo.
- Aumento de la tasa de deposición.

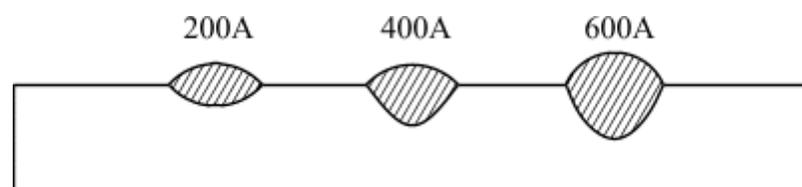


Figura 2: Influencia de la intensidad de corriente en la geometría del cordón.

Tensión de soldadura, los valores de tensión más habituales suelen oscilar entre 25 y 35 voltios. Un aumento de la tensión, sin modificar otros parámetros (Figura 3), da lugar a:

- Aumento de la longitud del arco.
- Aumento de la anchura del cordón.
- Disminución de la penetración.
- Aumenta la cantidad de escoria fundida.

Si la tensión es demasiado alta, produce:

- Cordones demasiado anchos, favoreciendo la formación de grietas.
- Soldaduras cóncavas con tendencia a agrietarse.
- Un aumento en el consumo de fundente.
- Aumento del número de elementos de aleación procedentes del fundente que pasan a formar parte del baño de fusión.
- Aumenta las mordeduras.

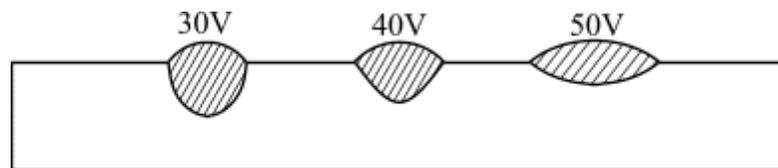


Figura 3: Influencia de la tensión de soldadura en la geometría del cordón.

Velocidad de soldadura, después de la intensidad es la variable que más afecta al proceso (Figura 4). Si es demasiado alta, produce:

- Una disminución del calor aportado por unidad de longitud del cordón de soldadura.

- Una disminución en la cantidad de metal de aportación depositado.

Por el contrario, si es demasiado baja:

- El cordón de soldadura tendrá un espesor excesivo, lo que favorece la formación de grietas.
- Se forman baños de fusión demasiado grandes y es más fácil la inclusión de escoria en el material depositado.

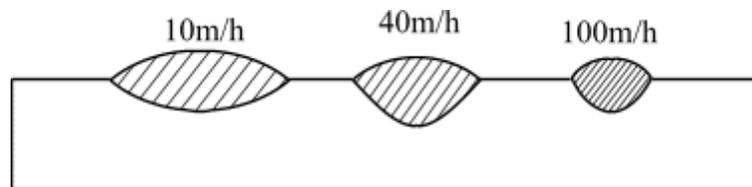


Figura 4: Influencia de la velocidad de soldadura en la geometría del cordón.

1.4. Características de los electrodos y tipos de fundentes usados en la soldadura por arco sumergido.

Los electrodos se clasifican según su composición química, existiendo electrodos para la soldadura de aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros aleados, aceros inoxidable y otras aleaciones. Estos hilos de acero se encuentran recubiertos de cobre, para evitar la corrosión, aumentar la conductividad eléctrica y reducir el rozamiento con los rodillos del sistema de alimentación.

También se pueden encontrar electrodos en forma de fleje, especiales para depósitos por recargue, que se suministran en bobinas.

El diámetro del hilo depende del intervalo en el que se encuentre la intensidad de soldadura (Tabla 1):

Tabla 1: Diámetro de electrodo según intervalo de Intensidad.

<i>Diámetro(mm)</i>	<i>Intervalo de intensidad(A)</i>
1,6	130-300
2	200-400
2.4	250-500
3.2	300-600
4	400-800
4.8	500-1000
5.6	600-1200
6.4	700-1600

Los fundentes para arco sumergido juegan un papel importante en la soldadura por arco sumergido, estos han sido diseñados para proteger la fusión del alambre a través del arco eléctrico. Los fundentes deben proteger el depósito de metal fundido de los gases de la atmósfera, limpiar las impurezas del metal de base, modificar la composición del alambre a depositar y dar una buena apariencia a la superficie del depósito. Además se debe quitar fácilmente la escoria después de la soldadura [Ma et al., 2005].

Existen dos tipos de fundentes para el proceso de Arco Sumergido:

- El fundente fundido se fabrica de minerales que se funden en un horno eléctrico. Esta fundición se vacía formando granos sin una forma definida y su aspecto es como el del vidrio molido. Por su fabricación del tipo de fundición, estos fundentes son normalmente neutros porque ya reaccionaron durante su proceso de fabricación y casi no tienen poder de reaccionar con la soldadura durante su uso.
- Los fundentes aglomerados se fabrican también de una mezcla de minerales y ferroaleaciones que se aglomeran a elevadas temperaturas, pero por debajo de su punto de fusión. Por esta razón, todavía tienen poder de acción durante el proceso de la soldadura.

1.5. Investigaciones realizadas en la optimización de los parámetros de soldadura.

1.5.1. Método optimización multiobjetivo de Grey-Taguchi.

El método de Taguchi es una herramienta eficaz para resolver problemas de optimización en la industria [Maghsoodloo et al. 2004], [H et al. 2000]. Este método utiliza un buen diseño experimental, llamado arreglo ortogonal y señal de ruido (S/N ratio), con una función objetivo que puede ser optimizada o maximizada dentro del diseño experimental [D et al, 2007], [L et al, 2007].

Sin embargo este método no es capaz de resolver problemas de optimización multiobjetivos. Combinándolo con el método de análisis Grey puede resolverse este problema. Con este enfoque pueden ser resueltos problemas de optimización multiobjetivos simultáneamente [S. et al, 2009], [S-H. et al, 2006].

El método de análisis Grey basado en Taguchi, responde a múltiples procesos de optimización que pueden ser convertidos en simples respuestas de optimización donde el total del método de análisis Grey sirve como función objetivo o responde a la función que puede ser optimizada - maximizada.

El método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi puede ser utilizado para optimizar los parámetros de un proceso de soldadura por arco sumergido, considerando los parámetros de múltiples soldaduras [Tarnng, et al 2002].

1.6. Conclusiones parciales del Capítulo.

El estudio de bibliografía especializada, ha permitido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Para obtener buenas uniones soldadas es fundamental una correcta regulación de los parámetros de soldadura.
2. Versatilidad en los diámetros del electrodo, de 2 a 13 mm.
3. Gran productividad en comparación a otros métodos de soldadura.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este Capítulo se hace una descripción de las propiedades químicas y mecánicas de los materiales utilizados, las características técnicas de las máquinas de soldadura utilizadas en el proceso, las normas de fabricación del cilindro para gas y el método de Optimización Multiobjetivo Grey-Taguchi.

2.1. Propiedades químicas y mecánicas de los materiales utilizados.

2.1.1. Metal base (chapa).

Se utilizan discos de chapa de Acero para embutido, laminadas en caliente, con propiedades no apreciable de envejecimiento, deben estar decapadas y ligeramente engrasadas, con un diámetro de 530 mm y un espesor de 2,2 mm. La composición química y propiedades mecánicas se rigen por la norma ASTM 414 - D (Tabla 2 y 3).

Deben venir acompañadas de un Certificado de Calidad, de forma tal que permita conocer por paquete la composición química y propiedades mecánicas.

Tabla 2: Propiedades mecánicas del metal base.

<i>Propiedades Mecánicas</i>		
<i>Limite Elástico</i>	<i>% de Elongación</i>	<i>Resistencia a la tensión</i>
387 Mpa	26	458 Mpa

Tabla 3: Propiedades químicas del metal base.

Análisis Químico											
%Al	%C	%Co	%Cr	%Cu	%Mn	%Si	%Ni	%P	%S	%Ti	%V
0,036	0,06	0,019	0,01	0,05	0,57	0,02	0,02	0,008	0,005	0,001	0,003

2.1.2. Metal de aporte (electrodo).

El electrodo utilizado viene clasificado por la norma AWS como EM12K, tiene un diámetro de 2 mm, se fabrican en rollos, están recubiertos por cobre y tienen una composición química que se muestra en la (Tabla 4):

Tabla 4: Propiedades químicas del metal de aporte.

Análisis Químico					
%C	%Mn	%Si	%Cu	%P	%S
0,105	0,105	0,200	0,16	0,015	0,014

Cada rollo debe venir acompañado de un Certificado de Calidad.

2.1.3. Fundente.

Fundente para soldadura por arco sumergido, denominado como Flux PV60-3, de tipo fundido, con una granulometría de 14 x 40. Normas aplicables al mismo ASW A5.17 y ASME SFA-5.17.

Este tipo de fundente es el utilizado con el electrodo EM12K. Cada saco de fundente debe venir acompañado de un Certificado de Calidad.

2.2. Características técnicas del proceso.

2.2.1. Características técnicas de la máquina de soldadura por arco sumergido.

Las figuras 5 y 6 muestran la máquina donde se realizaron las soldaduras de los nueve experimentos. La misma tiene 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 5. Posicionador de Soldadura.



Figura 6. Transformador de potencia.

2.2.2. Extensión del electrodo (Stickout).

La extensión del electrodo es la distancia que existe entre la boquilla y la superficie a soldar (Figura 7).

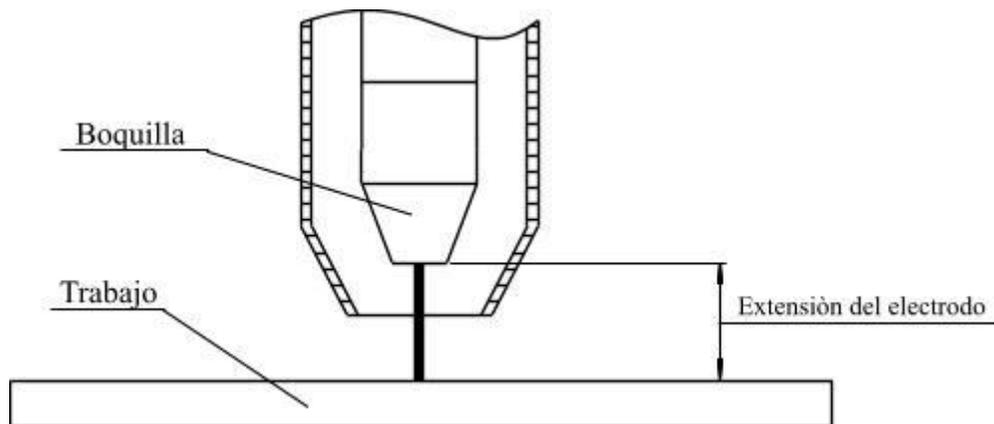
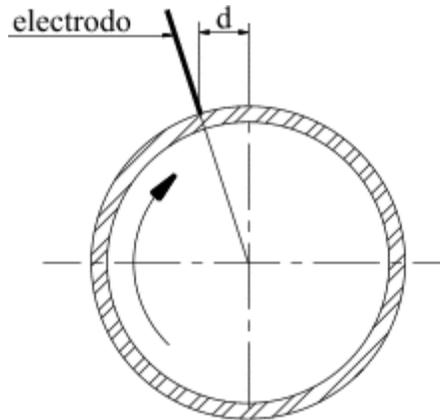


Figura 7: Esquema de la extensión del electrodo (Stickout).

Un aumento o disminución de esta distancia, influye directamente en la penetración de la soldadura. Los cilindros del experimento se soldaron con una extensión de electrodo de 16 mm, siguiendo la regla de ocho veces el diámetro del electrodo.

2.2.3. Posición del electrodo.

Para obtener una mejor forma de la geometría del cordón, el electrodo se desplaza a una distancia de 25 mm del centro y se inclina hacia el mismo como muestra la (Figura 8).



Diametro	Desplazamiento (d)
25-76	9,5-19
76-457	19-25
457-914	32-38

Figura 8: Posición del electrodo.

2.3. Recomendaciones utilizadas de la geometría del cordón.

La tabla 5 muestra los valores recomendados para la geometría del cordón de soldadura. Estos valores se tomaron de las normas vigentes en la fábrica para la construcción del cilindro de 10 Kg., el espesor de chapa

(e) en el lugar de la soldadura es de 2,44 mm. En la figura 9 se muestra un croquis de un ejemplo tipo de una soldadura circunferencial a tope acodada.

Tabla 5: Valores recomendados por las normas para la geometría del cordón.

Normas	Ancho Ac (mm)	Penetración P (mm)	Refuerzo Ar (mm)
NC EN 1442:2012.	$8 \geq Ac \geq 3e$	Completa	$Ar \leq Ac/4$
CGA C-3 : 2005	8 - 9	Completa	0,5 - 0,7

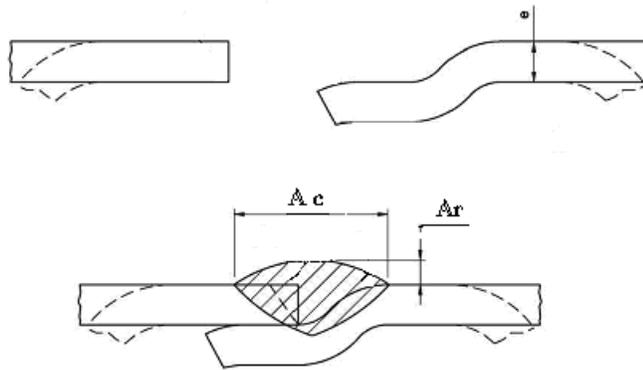


Figura 9: Ejemplo tipo de una soldadura circunferencial a tope acodada.

2.4. Método de Optimización Multiobjetivo Grey-Taguchi.

2.4.1. Detalle experimental.

Para obtener las dimensiones de la geometría del cordón se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Pie de rey con comparador de esfera, con un error de medición 0,01 mm.

- Comparador de esfera con su base (imantada), con un error de medición 0,01 mm.
- Microscopio de taller, con un error de medición 0,01 mm.

Todos los parámetros fueron replicados tres veces y tomado el valor de la media.

Para determinar la penetración de la soldadura en el metal base, se atacaron las probetas, con nital al 2% y con ayuda de un microscopio de taller, se obtuvieron las dimensiones de la misma.

Las dimensiones de la altura de refuerzo se obtuvieron mediante varias mediciones que se le realizaron a cada cilindro soldado, en el mismo posicionador, y con ayuda de un comparador de esfera colocado en el cabezal de la máquina de soldar desplazándolo transversalmente a la soldadura; a partir de las cuales se obtuvo el valor medio de la misma, ver figura 10.



Figura 10: Medición de la altura de refuerzo.

Las dimensiones del ancho del cordón se obtuvieron mediante varias mediciones que se realizaron con un pie de rey con comparador de esfera a cada cilindro soldado, ver figura 11.

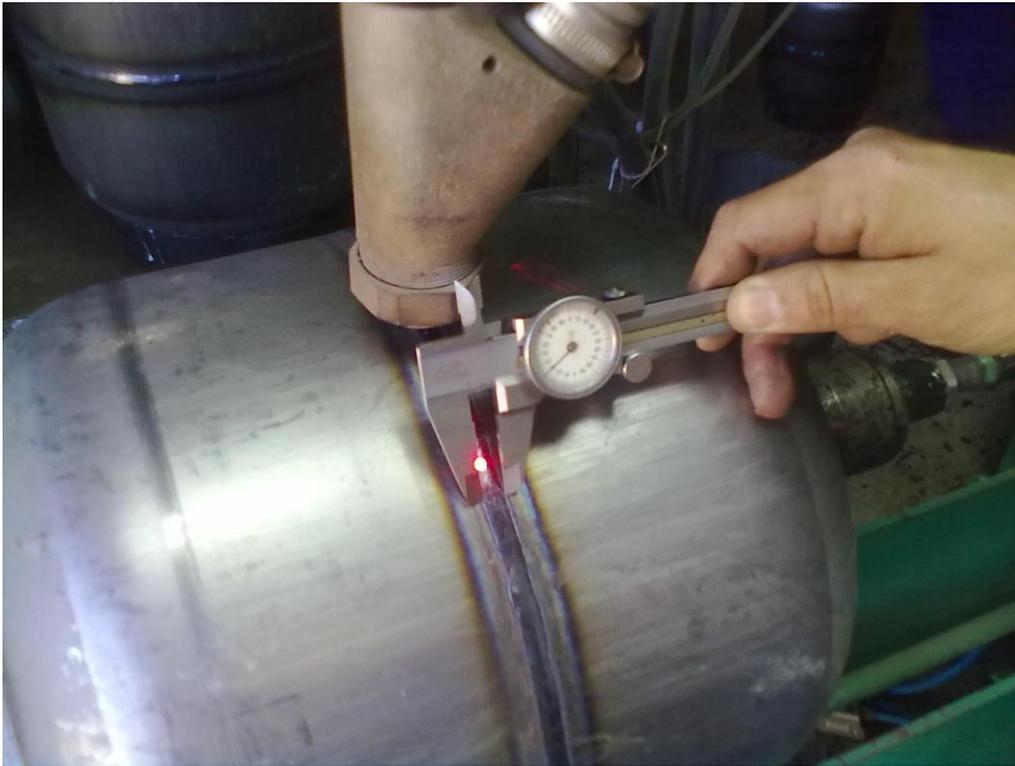


Figura 11: Medición del ancho del cordón.

2.4.2. Procesamiento de los datos.

Para realizar el procesamiento de los datos es necesario hacer la normalización. La misma se realiza teniendo en cuenta maximizar o minimizar el parámetro.

En el caso de maximizar (large-the-better, criterio LB) se utiliza la expresión:

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (1)$$

En caso de minimizar (smaller-the-better, criterio SB) se utiliza la expresión:

$$x_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2)$$

La definición del grado de relación Grey es revelado por el grado de relación entre los n experimentos. El coeficiente de relación de Grey se puede calcular por la relación:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi \Delta_{\max}} \quad (3)$$

Donde:

$$\Delta_{0i} = \|x_0(k) - x_i(k)\|$$

Δ_{0i} - valor de pérdida estimada.

Δ_{\min} - es el mínimo valor del Δ_{0i} .

Δ_{\max} - es el máximo valor del Δ_{0i} .

El coeficiente distintivo ψ oscila $0 \leq \psi \leq 1$.

El valor promedio del grado de relación Grey se determina por:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

Donde:

n – número de experimentos.

2.4.3. Parámetros del proceso y pruebas realizadas.

Los parámetros a investigar en el proceso fueron fijados acorde a la importancia e influencia que ejercen en el proceso SAW [Murugun et al., 1993], [Nagesh et al., 2002] y [Ghosh et al., 2007] tensión, corriente y velocidad. Los valores utilizados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: 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 [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:

$$N^{\min} = (L-1) * F + 1 = (3-1) * 3 + 1 = 7 \quad (5)$$

A partir del resultado anterior, se seleccionó un arreglo ortogonal L9 con nueve experimentos y ocho grados de libertad. Los valores de los niveles

que tomaran los factores en cada experimento se muestran en la Tabla 7.

Los experimentos se realizaron de forma aleatoria.

Tabla 7: Diseño ortogonal de Taguchi L9.

# experimento	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (m/h)
1	20	200	41
2	20	250	59
3	20	300	85
4	25	200	59
5	25	250	85
6	25	300	41
7	30	200	85
8	30	250	41
9	30	300	59

En la tabla 8 se muestra los datos relacionados a la geometría del cordón de cada experimento realizado.

Tabla 8: Geometría del cordón.

# Exp.	Ancho cordón Ac (mm)	Penetración P (mm)	Altura de refuerzo Ar (mm)	Calor Introducido CI (J/cm)
1	4,53	2,00	1,12	5093
2	5,93	2,13	1,04	4423
3	6,19	2,41	0,82	3684
4	7,39	1,50	0,71	4424
5	6,34	2,03	0,57	3838
6	9,99	3,15	1,08	9550
7	6,46	1,47	0,48	3684
8	10,87	2,64	0,96	9550
9	10,17	3,00	0,79	7962

2.5. Conclusiones parciales del capítulo.

A través del desarrollo de este capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. El fundente y el electrodo deben ser correctamente seleccionados.
2. La extensión del electrodo y la posición del mismo influyen en el proceso de soldadura.
3. La soldadura debe cumplir con la geometría del cordón recomendado por la norma.

CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA.

El objetivo de este capítulo es presentar la metodología de cálculo utilizada en la optimización de los parámetros de soldadura aplicando el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi.

3.1. Método de Optimización Multiobjetivo Grey-Taguchi.

3.1.1. Evaluación de la condición del óptimo.

Para realizar el procesamiento de los experimentos es necesario hacer primeramente la normalización de los experimentos, utilizando las ecuaciones (1) y (2); los valores normalizados de la geometría del cordón, el calor introducido y el $\Delta 0i$ se muestran en las tablas 9 y 10 respectivamente. Se seleccionó el criterio de maximizar (large-the-better, criterio LB) para el ancho del cordón (Ac) y la penetración (P), y el criterio de minimizar (smaller-the-better, criterio SB) para la altura de refuerzo (Ar) y el calor introducido (CI).

Tabla 9: Experimentos normalizados.

# Exp.	HB		SB	
	Ac	P	Ar	CI
1	0	0,0459	0	0,7598
2	0,2208	0,3942	0,1250	0,8740
3	0,2618	0,5605	0,4688	1
4	0,4511	0,0155	0,6406	0,8738
5	0,2855	0,3333	0,8594	0,9737
6	0,8612	1	0,0625	0
7	0,3044	0	1	1
8	1	0,6971	0,25	0
9	0,8896	0,9106	0,5156	0,2707

Tabla 10: Valores de pérdida estimada.

# Exp.	Δo_i			
	Ac	P	Ar	CI
1	1	0,9541	1	0,2401
2	0,7792	0,6058	0,8750	0,1259
3	0,7382	0,4395	0,5313	0
4	0,5489	0,9845	0,3594	0,1261
5	0,7145	0,6667	0,1406	0,0262
6	0,1388	0	0,9375	1
7	0,6956	1	0	0
8	0	0,3029	0,7500	1
9	0,1104	0,0894	0,4844	0,7292

La tabla 11 muestra los valores calculados del coeficiente de relación Grey y el grado de relación Grey, los cuales se obtuvieron a partir de la utilización de las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

Tabla 11: Coeficiente de relación Grey, ($\psi=0,5$).

# Exp.	Coeficiente de relación Grey.				Grado de relación Grey.
	Ac (mm)	P (mm)	Ar (mm)	CI (J/cm)	
1	0,3333	0,3439	0,3333	0,6754	0,4216
2	0,3909	0,4521	0,3636	0,7987	0,5012
3	0,4038	0,5322	0,4848	1	0,6050
4	0,4767	0,3368	0,5818	0,7985	0,5485
5	0,4117	0,4286	0,7805	0,9501	0,6427
6	0,7827	1	0,3478	0,3333	0,6159
7	0,4182	0,3333	1	1	0,6878
8	1	0,6228	0,4000	0,3333	0,5888
9	0,8191	0,8483	0,5079	0,4067	0,6455

Los valores de la señal de ruido (S/N) se muestran en la tabla 12 y fueron calculados por la expresión 6, tomándose como criterio de mayor es mejor y los valores promedios de la tabla 11.

$$S / N = -10 \log \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (6)$$

Tabla 12: Señal de ruido.

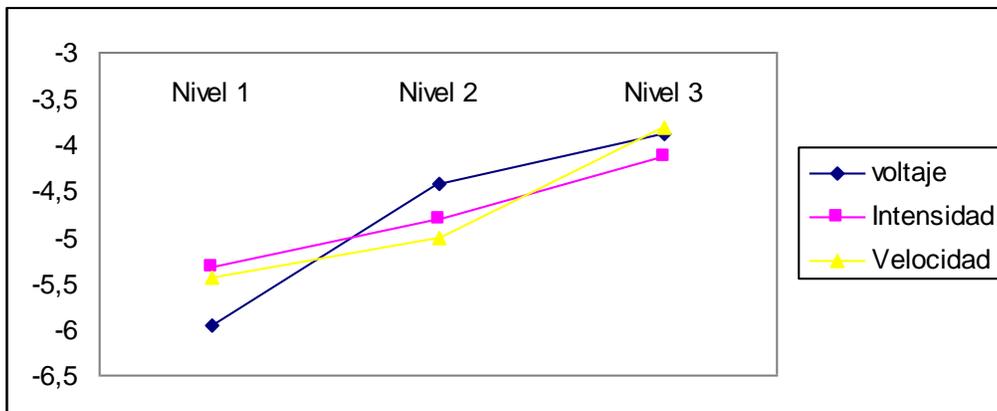
# Exp.	S/N
1	-7,5018
2	-5,9994
3	-4,3637
4	-5,2149
5	-3,8396
6	-4,2088
7	-3,2496
8	-4,5993
9	-3,8011

En la tabla 13 se muestran los valores promedios del grado de relación Grey (γ_i) de cada parámetro de soldadura para cada nivel.

Tabla 13: Promedio de cada parámetro de soldadura en los diferentes niveles.

	Grado de relación Grey		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Voltaje	0,50	0,60	0,64
Intensidad	0,55	0,57	0,62
Velocidad	0,54	0,56	0,64

Grafica 1. Parámetros de soldadura en los diferentes niveles.



Utilizando el criterio de mayor es mejor, los parámetros óptimos de soldadura se encuentran en el nivel 3 de la Gráfica 1, donde el voltaje de soldadura es de 30 V, la corriente de soldadura es de 300 A y velocidad de soldadura es de 85 m/h.

3.1.2. Análisis de varianza.

El análisis de Anova se realiza con el software stagraphics, usando la opción de Compare-Analysis of variante y Multifactor Anova, ver tabla 14.

El % de contribución se determina por la expresión:

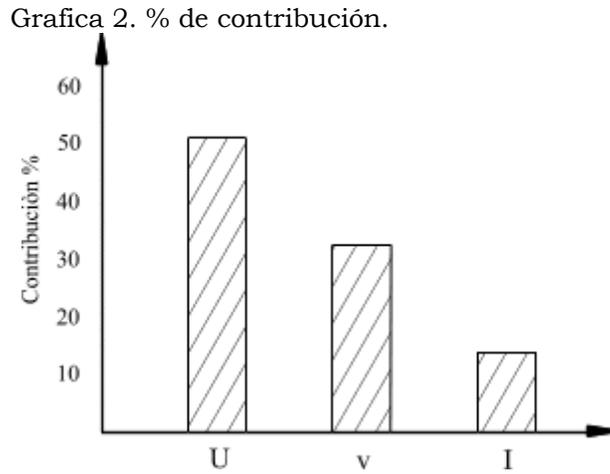
$\% \text{ de contribución} = (\text{suma de cuadrados} / \text{total de la suma de cuadrados}) / 100.$

Tabla 14: Anova.

Source	Sumo of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Contribution (%)
A:U	0,0274195	2	0,0137097	17,48	50,75
B:I	0,0074194	2	0,00372851	4,75	13,8
C:v	0,0175822	2	0,00879112	11,21	32,52
Error	0,00156839	2	0,000784194	-	2,9
Total	0,0540271	2	-	-	1

El resultado de la Anova muestra que el voltaje con un 50,75 % de contribución es el parámetro que más influencia tiene para el criterio de optimización múltiple utilizado (máximo ancho del cordón, máxima penetración, mínimo refuerzo y mínimo calor introducido). El por ciento de contribución de los demás parámetros son: velocidad de la soldadura

32,24 % y la corriente de la soldadura 13,80 %, como se muestra en la gráfica 2.



3.1.3. Confirmación de los resultados.

Después de evaluar el parámetro óptimo, el siguiente paso es predecir y verificar la cualidad característica utilizando la combinación paramétrica del óptimo. El estimado del grado de relación Grey (γ) utilizado en el nivel óptimo puede ser calculado por la expresión (7).

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (7)$$

Donde:

γ_m es la media del total del grado de relación Grey.

$\bar{\gamma}_i$ es la media del grado de relación Grey para el nivel óptimo.

O es el número de parámetros.

En la tabla 15 se muestran los valores de la confirmación de los resultados.

Tabla 15: Condición óptima del proceso.

Geometría del cordón	Predicción	Experimento
	U3-I3-v3	U3-I3-v3
Ancho del cordón		8,78
Altura de refuerzo		0,85
Penetración		2,6
S/N	-2,61	-5,05
Promedio del grado de relación Grey	0,74	0,55

3.2. Comprobación del régimen de soldadura óptimo.

Con el régimen obtenido por el Método de Optimización Multiobjetivo Grey – Taguchi, se realizaron varias soldaduras y se tomaron las mediciones mostradas en la tabla 16 para la geometría del cordón.

Tabla 16: Geometría del cordón.

Ac (mm)	P (mm)	Ar (mm)
8,78	2,6	0,85

3.3. Conclusiones parciales del Capítulo.

A través de la metodología de cálculo utilizada en el capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Utilizando el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi se obtuvo un régimen óptimo para la soldadura.
2. El régimen predicho se encuentra dentro del rango establecido por las normas consultadas en cuanto a geometría del cordón.
3. Se validó experimentalmente el régimen óptimo seleccionado en condiciones de producción.

CONCLUSIONES.

Como resultado de lo expuesto en el presente trabajo, se enuncian las siguientes conclusiones:

4. Se realizó un análisis bibliográfico teniendo en cuenta los aspectos relacionados con el proceso de soldadura automática bajo fundente (SAW).
5. Se caracterizaron los materiales del electrodo, fundente, plancha y máquina de soldar.
6. Se aplicó el estudio experimental según el método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi.
7. Se validó experimentalmente el régimen óptimo seleccionado en condiciones de producción.

RECOMENDACIONES.

Como resultado del trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Analizar la posible ampliación del método de optimización multiobjetivo Grey-Taguchi a otras soldaduras.

BIBLIOGRAFÍA.

1. CGA C-3: 2005 Standards for welding on thin-walled steel cylinders.
2. D. C. Chen, C. F. Chen, J., 2007. Mater Process Technol., pp. 130–137.
3. Datta S., Bandyopadhyay A., Pal P.K., 2008. Grey based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding, International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol 39, pp.1136–1143.
4. Datta, S.; Sunder, M.; Bandyopadhyay, A.; Nandi, G.; Pal, P.K.; Roy, S.C., 2005. Effect of electrode stickout on quality and performance of submerged arc weldments - Experimental and statistical analysis, Proceeding of the International Conference on Mechanical Engineering.
5. Ghosh, A.; Chattopadhyaya, S.; Sarkar, P.K., 2007. Effect of input parameters on weld bead geometry of SAW process, Proceeding of International Conference (ICME), Dhaka Bangladesh.
6. Glizmanenko, D. L., 1981. Soldadura y corte de los metales, Científico Técnica, La Habana (Cuba).
7. Gunaraj, V. and Murugun, N., 1999. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes, Journal of Material Processing Technology, Vol 88, pp.266-275.

8. Gunaraj V., Murugan N., 2000. Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc Process-Part 1, *Welding Journal*, 286-294.
9. Kanjilal P., Pal T.K., Majumdar S.K., 2006. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal, *Journal of Material Processing Technology*, Vol 171, pp. 223-23
10. L. J. Yang, *J Mater*, 2007. *Process Technol.*, pp. 113-119
11. Little, R. L., 2004. *Welding and Welding Technology*, pp. 169-176
12. Nagesh D.S., Datta G.L., 2002. Prediction of weld bead geometry and penetration in shield metal arc welding using artificial neural.
13. NC EN 1442: 2012. BOTELLAS PORTATILES Y RELLENABLES DE ACERO PARA GASES LICUADOS DE PETROLEO (GPL) DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.
14. Ma A., Hirata V.M., Munoz M.L.S., 2005. Influence of chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged arc welds, *Journal of Material Processing Technology*, Vol 169, pp.346-351.
15. 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*, Vol 23, Number 2, pp. 73-126.

16. Montgomery D.C., 2001. Design and Analysis of Experiments John Wiley Pvt. Ltd, Singapore.
17. Murugun N., Gunaraj V., 1999. Prediction and Comparison of area of heat affected zone for bead on plate and bead on joint in submerged arc welding of pipes, Journal of Material Processing Technology , Vol 95, pp. 246-261.
18. 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, Vol 37, pp. 767-780.
19. Murugan N., Gunaraj V., 2005. Prediction and Control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes, Journal of Materials Processing Technology. Vol 168, 478-487.
20. S. Datta, A. Bandyopadhyay, P. K. Pal, Int J Adv., 2008. Manuf Technol., pp. 1136-1143.
21. Saurav Datta, Asish Bandyopadhyay, Pradip Kumar Pal, 2008. Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding, International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol 39, pp. 1136-1143.
22. S. Datta, S. S.Mahapatra, 2010. Multi-Objective Optimization of Submerged Arc Welding Process, The Journal of Engineering Research, Vol 7, pp. 42-52.

23. S-H. Lim, C-M. Lee, W.J. Chung, 2006. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, pp. 18–23.
24. Shigeo Oyama, Tadashi Kasuya, 2007. High-speed One-side Submerged Arc Welding Process “NH-HISAW”, Nippon Steel Technical Report No. 95, pp. 17-21.
25. S. Kumanan, J Edwin Raja Dhas, K Gowthaman, 2007. Determination of submerged arc welding process parameters using Taguchi method and regression analysis, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol 14, pp 177-183.
26. 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, Vol 128, pp. 1-6.
27. Tosun, N. 2006. Determination of optimum parameters for multi-performace characteristics in drilling by using grey relational analysis, International Journal of Advanced Manufacturing technology, Vol 28, pp. 450-455.
28. Yang L.J., Chandel R.S., Bibby M.J., 1992. The effects of process variables on the bead width of submerged arc welding, Journal of Material Processing Technology, Vol 29, pp.133-144.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculo del Calor Introducido en la pieza durante la soldadura.

$$CI = \frac{U * I * 60}{V * \sqrt{n * d}}$$

U – Tensión de soldadura.

I – Intensidad de corriente.

V – Velocidad de soldadura cm/min.

d – Espesor del material a soldar cm.

