



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Levantamiento del Mapa de Modo de Transferencia de Metal para el Electrodo ER100S1 Aplicado con Proceso de Soldadura GMAW

María Isabel Arias Rendón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Mecánica y Eléctrica
Medellín, Colombia
2013

Levantamiento del Mapa de Modo de Transferencia de Metal para el Electrodo ER100S1 Aplicado con Proceso de Soldadura GMAW

María Isabel Arias Rendón

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

MsC. Jorge Enrique Giraldo Barrada

Procesos de Soldadura

Grupo de Soldadura

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Mecánica y Eléctrica

Medellín, Colombia

2013

Al amor de mis padres. La dedicación de mi madre y la solidaridad de mi padre.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, Alberto y Carmenza, por todo su apoyo, por la comprensión y el cariño que me han dado y porque a lo largo de la vida me han enseñado que los retos son para afrontarlos.

A mi novio, Eddy, por su infinita paciencia, su amor y su apoyo incondicional, por darme la tranquilidad necesaria en cada momento.

A mis profesores Juan Fernando Ramírez, Jorge Enrique Giraldo y Lina Gómez por todo su apoyo logístico, anímico y académico.

A mis compañeros y amigos, David Hoyos y Oscar Mejía por todo su tiempo, su ayuda, sus enseñanzas y los buenos momentos que compartimos durante la realización de este trabajo.

A las empresas Metroparques EICE e Industrias HRV, especialmente a su personal quien siempre fue un punto de apoyo.

A Carolina Fernández por enseñarme su tenacidad, a Carlos Vélez por su escucha, a Juan González por su insaciable compañía, a Johnnatan Rodríguez por sus enseñanzas y su apoyo moral, a José Manuel Jiménez por la ternura y comprensión, a Carolina Pelaéz por ser apoyo incondicional y su valiosa amistad, a Juan Felipe Santa por su solidaridad y sus valiosas enseñanzas, a Elizabeth Mesa por su buena energía y su incondicionalidad.

A mis amigos Nacho, Clara Arboleda Diana Granda, Olga Morales, Melisa Cardona, Carlos Henao, Daniel Gallego, Juan Fernando Ramírez, Jorge Flórez, Carlos Flórez, Gloria Rico, Sebastián Romo, Marcos Sepúlveda, Julio Zapata, Elizabeth Hoyos, Carolina Valencia, Carolina Máxim, Angélica Tamayo, Daphne Álvarez, John Baena, Manuel Gómez, Mauricio Osorio, Ernesto Carrillo, Alejandro Restrepo, Edilson Bermúdez, Claudia Díaz, Esteban Franco, Juliana Sierra, Ana María Molina, Natalia Durango, Ruben Villa y todos los demás porque cada uno de ellos ha sido fundamental para culminar con éxito este proyecto, porque a cada momento me han hecho sentir que sí es posible y que cuento con su cariño incondicional.

Resumen

Durante este trabajo se estableció una metodología para caracterizar los modos de transferencia para el par metal de aporte/gas en un proceso de soldadura GMAW y poder generar un cuadro de relación entre los parámetros eléctricos fundamentales: corriente y voltaje del arco. Este cuadro se denominó como mapa de modo de transferencia para un electrodo aplicado con proceso de soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*). La metodología desarrollada es extensible para otro tipo de electrodos aplicados con el mismo proceso y con algunas modificaciones puede ser aplicable para los procesos de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección n (*Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*) y el proceso de soldadura con alambre tubular con o sin protección gaseosa (*Flux Cored Arc Welding – FCAW*).

La relevancia de estos cuadros y el desarrollo de la metodología radica en su utilidad tecnológica reflejada en la posibilidad que abren para determinar zonas de estabilidad e inestabilidad del arco, los modos de transferencia del metal y las corrientes de transición entre los modos de transferencia (MDT) y con ello optimizar el desarrollo de procedimientos de Soldadura (*Welding Procedure Specification –WPS*).

Palabras clave: Proceso de Soldadura, Soldadura GMAW, Modo de Transferencia, Mapa de Modo de Transferencia de Metal.

Abstract

In this work it is established a methodology to characterize transfer modes for the couple filler metal/shielding gas in a GMAW welding process, as well as to be able to generate a relation between basic electric parameters: current and arc voltage. This relation is

called welding transfer mode map for a GMAW filler metal. Our methodology is applicable to other type of filler metals with the same process and, with some modifications, can be applied to GTAW and FCAW processes.

The relevance of these relationships and development of methodology comes from their technological usefulness, which is reflected in the fact that they open the possibility of determining stability-non stability arc zones, metal transfer modes and transition currents between transfer modes (MDT) and, with all of this, optimizing the development of WPS.

Keywords: Welding Processes, GMAW, Transfer Modes, Welding Transfer Mode Map.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XII
Introducción.....	1
1. Marco teórico.....	3
1.1 Soldadura	3
1.2 Soldadura por arco eléctrico	4
1.3 Procesos de soldadura	5
1.3.1 Proceso de soldadura GMAW	7
1.3.1.1 Variables del proceso GMAW	9
2. Modos de transferencia de metal en el proceso de soldadura GMAW y clasificación del Instituto Internacional del Soldadura.....	20
3. Mapas de Modo de Transferencia	29
4. Física del arco	39
5. Objetivos	45
5.1. Objetivo General.....	45
5.2. Objetivos Específicos	45
6. Procedimiento Experimental	46
6.1. Materiales e Insumos.....	47
6.1.1. Equipo de Soldadura	55
6.1.2. Pistola de Soldadura.....	48
6.1.3. Unidad de Alimentación	48
6.1.4 Fuente de Potencia.....	49
6.1.5 Sistema de Adquisición de Datos	50
6.1.6 Material de Aporte.....	51
6.2. Diseño Estadístico del Experimento	52
6.2.3 Diseño Estadístico para la corriente.....	73
7 .Obtención del Mapa de Modo de Transferencia.....	78
8.1. Diseño de la junta.....	78
8.2. Calibración del sistema de adquisición de datos y caracterización de	

Contenido

las señales 80

9. Conclusiones 101

A. Señales Eléctricas 105

Bibliografía 189

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Carta Maestra de los Procesos de Soldadura y Corte según la AWS	6
Figura 2. Esquema para el proceso GMAW	8
Figura 3. Comparación de las tasas de fusión en soldadura utilizando electrodo revestido, sólido y tubular, respectivamente	10
Figura 4. Metodología para calcular el diámetro de una sola gota en GMAW.....	11
Figura 5. Esquema de la influencia de los gases de protección en el proceso de soldadura GMAW	12
Figura 6. Relación de la conductividad térmica y la temperatura	14
Figura 7. Efecto sobre la zona de conducción para gases con una baja conductividad térmica	15
Figura 8. Relación voltaje-corriente para una fuente de potencia de voltaje constante	18
Figura 9. Relación voltaje-corriente para una fuente de potencia de corriente constante	18
Figura 10. Modos de transferencia para el proceso GMAW.....	25
Figura 11. Cuadro de los Modos de Transferencia de Metal	26
Figura 12. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por corto circuito....	31
Figura 13. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por aspersion para aluminio.....	32
Figura 14. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por corto circuito para aluminio.....	32
Figura 15. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia globular para aluminio.....	33
Figura 16. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia corto circuito/globular para aluminio	34
Figura 17. Mapa de modo de transferencia para ER70S6 con Ar+2%CO ₂	35
Figura 18. Esquema de mapa de modo de transferencia según IIW.....	36
Figura 19. Fuerzas que actúan sobre la gota de un electrodo de acero	41
Figura 20. Equipo de soldadura Miller Invision 456 MP	46
Figura 21. Fuente de alimentación S74S.....	48
Figura 22. Esquema del montaje del sistema de adquisición de datos	50
Figura 23. Interfaz gráfica utilizada en Labview	51
Figura 24. Montaje real utilizado.....	56
Figura 25. Esquema del proceso.....	59
Figura 26. Gráfica de los residuos para el voltaje promedio	65
Figura 27. Voltaje promedio vs. Orden para la respuesta voltaje promedio	65
Figura 28. Distribución de normalidad para el voltaje promedio.....	66
Figura 29. Residuos vs voltaje para la variable ajustada con la variable raíz cuadrada recíproca	68
Figura 30. Voltaje vs Orden para la variable ajustada con la variable raíz cuadrada recíproca	68
Figura 31. Distribución de normalidad para la variable ajustada con la variable raíz cuadrada recíproca	69
Figura 32. Residuos vs. Voltaje para la variable respuesta sin interacciones.....	71

Figura 33. Voltaje vs. Orden para la variable respuesta sin interacciones	71
Figura 34. Distribución de normalidad para la variable respuesta sin interacciones.....	72
Figura 35. Residuos vs. Voltaje para la variable respuesta corriente	74
Figura 36. Residuos vs. Orden para la variable respuesta Corriente	75
Figura 37. Normalidad para la variable respuesta corriente.....	76
Figura 38. Cupón de Soldadura.....	80
Figura 39. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER70S6 en corto circuito	81
Figura 40. Transformada Rápida de Fourier para cortocircuito.....	82
Figura 41. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER70S6 en globular	83
Figura 42. Transformada Rápida de Fourier para transferencia Globular	84
Figura 43. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER70S6 en aspersion	84
Figura 44. Transformada Rápida de Fourier para aspersion.....	86
Figura 45. Fusión de los tubos de contacto	90
Figura 46. Corriente RMS vs. Voltaje RMS	92
Figura 47. Señal de cortocircuito para el electrodo ER100S1. Voltaje y corriente.	93
Figura 48. Señal de transferencia globular para el electrodo ER100S1. Voltaje y corriente.	94
Figura 49. Señal de transferencia por aspersion para el electrodo ER100S1. Voltaje y corriente.	95
Figura 50. Mapa de Modo de Transferencia para el ER100S1 con protección gaseosa 98%Ar + 2%O ₂	100
Figura 51. Relación de altura y anchura de acuerdo al modo de transferencia de Metal.....	103

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1. Corriente de transición para un electrodo de acero al carbono recubierto con 98%Ar + 2% CO ₂	26
Tabla 2. Relación entre los modos de transferencia según Kleber.....	37
Tabla 3. Datos para el modelo estadístico	61
Tabla 4. Nomenclatura utilizada para los datos del experimento	64
Tabla 5. ANOVA para la variable respuesta voltaje	66
Tabla 6. Transformaciones de variables recomendadas por Montgomery.....	67
Tabla 7. ANOVA para la variable voltaje ajustada con la función raíz cuadrada Recíproca.....	69
Tabla 8. ANOVA para la variable voltaje sin interacciones	72
Tabla 9. ANOVA para la variable respuesta corriente.....	76
Tabla 10. Voltaje y corriente RMS para las corridas	87
Tabla 11. Parámetros eléctricos adicionales.	90
Tabla 12. Análisis teórico Vs. Análisis Gráfico	96
Tabla 13. Desviación estándar para el ancho y alto	104

Introducción

A nivel mundial los procesos de soldadura por arco son actualmente los más usados en las construcciones metálicas, siendo la base de la industria de la soldadura, ya que presentan la mejor relación costo-beneficio para unir la mayoría de aleaciones comerciales. En Colombia el uso de los procesos de soldadura por arco siguen la tendencia mundial, siendo el proceso SMAW el número uno, seguido por los procesos GMAW y GTAW.

Sin embargo, en el país hace falta, aún, explotar de mejor manera los procesos de soldadura por arco, en especial los procesos GMAW, GTAW y sus variantes (GTAW-P, GMAW-P y GMAW-2P), aprovechando las ventajas que pueden brindar a la industria, como son la compatibilidad con procesos automatizados de manufactura, el aumento de la calidad de las uniones soldadas y unas mayores tasas de producción respecto al proceso SMAW.

El principal problema que se tiene al implementar estos nuevos procesos es la falta de conocimiento (particularmente, alrededor de los fundamentos físicos), lo cual crea la idea en el sector industrial de que se trata únicamente de procesos más complejos que requieren de personal más capacitado y de costos iniciales más altos, ocultando de este modo las ventajas técnicas a las que puede llevar su adecuada implementación y consolidación en la industria. Particularmente para el proceso GMAW se tiene un alto desconocimiento de los fundamentos físicos, químicos y fenomenológicos.

Actualmente la selección de algunas variables esenciales (Corriente, voltaje, velocidad de alimentación del alambre, entre otras) del proceso GMAW, se realiza de

forma cualitativa, basados en muchos casos en la percepción auditiva del personal técnico o en el mejor de los casos en recomendaciones de la literatura técnica, la cual se restringe a unas pocas combinaciones de aleaciones, gases de protección, diámetro de material de aporte, etc. El desarrollo de instrumentos cognitivos y tecnológicos darán bases fundamentadas que permitan tener una medida objetiva y consistente de los fenómenos presentes que den una idea de la estabilidad del arco eléctrico y con ello permitan aumentar la calidad y la productividad.

Con este proyecto de investigación se pretende particularmente estudiar el fenómeno de transferencia de masa en las juntas soldadas por medio de la adquisición de las señales eléctricas del proceso GMAW, para obtener mayor conocimiento científico aplicado en esta área, así como herramientas y metodologías que permitan realizar mediciones cuantitativas y objetivas sobre el proceso permitiendo en este sentido avanzar del arte a la ciencia de la soldadura y proyectar estos conocimientos para generar un desarrollo industrial a nivel nacional que posicione a las empresas de manufactura y construcción con procesos de calidad comparables con los requisitos de los códigos a nivel mundial.

Además de adquirir mayor conocimiento tanto teórico como aplicado en el área de la soldadura, se pretende dar solución a problemas concretos y prácticos, como la implementación y consolidación de un sistema de adquisición de datos para las señales eléctricas de voltaje y amperaje de los procesos de soldadura por arco con el fin de establecer una metodología que sirva como herramienta para el diseño de procedimientos de soldadura (WPS's) basado en mediciones cuantitativas de los fenómenos del proceso y las combinaciones de materiales de aportes y gases de protección. Siempre es una duda comprender las ventajas de emplear una mezcla de gases de protección para ciertas aplicaciones; con esta metodología se podrá dar comienzo a solucionar la efectividad de estas mezclas dobles o triples.

Se puede agregar también, que con este proyecto se abre la puerta a futuras investigaciones con diferentes aleaciones y variantes del proceso GMAW, como materiales no ferrosos como el aluminio o el titanio.

1.Marco Teórico

1.1 Soldadura

La soldadura es tan antigua como el trabajo con metales. Los antiguos orfebres usaban la soldadura forjada o fundida para unir sus mercancías. Sin embargo, el crecimiento real de la industria del metal comenzó con el proceso Bessemer a mediados de 1850 cuando el acero llegó a ser el material de más bajo costo utilizado para la construcción de ferrocarriles, puentes y edificios. Afortunadamente, nuevas técnicas para unir metales fueron desarrolladas durante el siglo XIX y en 1801 Humphrey Davy descubrió el arco eléctrico lo cual despertó la curiosidad científica hasta que en 1885 Bernardos recibió la patente para trabajar metales haciendo uso de la electricidad. Desde entonces se continúa en un proceso de búsqueda de nuevas fuentes y técnicas para mejorar los procesos de soldadura. [1]

La Sociedad Americana de Soldadura define una soldadura como una coalescencia localizada de metales o no metales, producida por el calentamiento de los materiales hasta la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de material de aporte [2].

Eagar [1] define la soldadura como una coalescencia entre dos objetos en los cuales las propiedades de la junta deben ser sustancialmente similares a las propiedades del material base o los materiales base a ser soldados.

1.2 Soldadura por Arco Eléctrico

Recientemente el término soldadura por arco eléctrico aplica a un largo y diverso grupo de procesos de soldadura que usan un arco eléctrico como fuente de calor para fundir y unir metales [2] y su importancia radica, en gran parte, en que el desarrollo de esta tecnología, así como las uniones han mejorado la manufactura aspectos como los siguientes:

- Incrementos en los tamaños de las partes metálicas
- Reducción en el peso de componentes mecánicos
 - Mejora de la confiabilidad
 - Incremento de la vida de los productos

Adicionalmente se han logrado avances en la automatización de los procesos de soldadura que han generado grandes mejoras y han ayudado a reducir los costos y a mejorar la calidad y la confiabilidad de las uniones soldadas.

Desde entonces se han efectuado desarrollos tecnológicos en esta área que han llevado a la conformación de los procesos de soldadura, los cuales son un conjunto de elementos operacionales básicos usados para hacer la unión soldada, que deben cumplir con los siguientes requisitos: suministrar la energía necesaria para crear la unión (térmica, mecánica o una combinación de ambas), evitar la contaminación atmosférica o sus efectos sobre el metal fundido, suministrar el metal de aporte (opcional con algunos procesos y configuraciones de la junta) y controlar la metalurgia de los metales involucrados. [3].

La unión de los procesos de automatización, control y modelamiento han dado un complemento en la actualidad a estos procesos de soldadura ya que han generado un puente para tener un conocimiento amplio sobre los fenómenos que ocurren. El conocimiento y caracterización de la transferencia de masa y transferencia de calor de un proceso soldadura son bastante complejas debido a la alta intensidad lumínica, las altas temperaturas, frecuencias y velocidad con que operan. Los

desarrollos recientes se han enfocado en la caracterización de los fenómenos de transferencia de masa, calor, procesos de fusión, velocidades de aplicación, entre otros a fin de desarrollar fuentes de potencia, electrodos, gases de protección y demás elementos fundamentales en los procesos de soldadura en aras de aumentar la productividad y mejorar la calidad y las propiedades para una adecuada conveniencia para el servicio [21,22,23,24].

1.3 Procesos de Soldadura

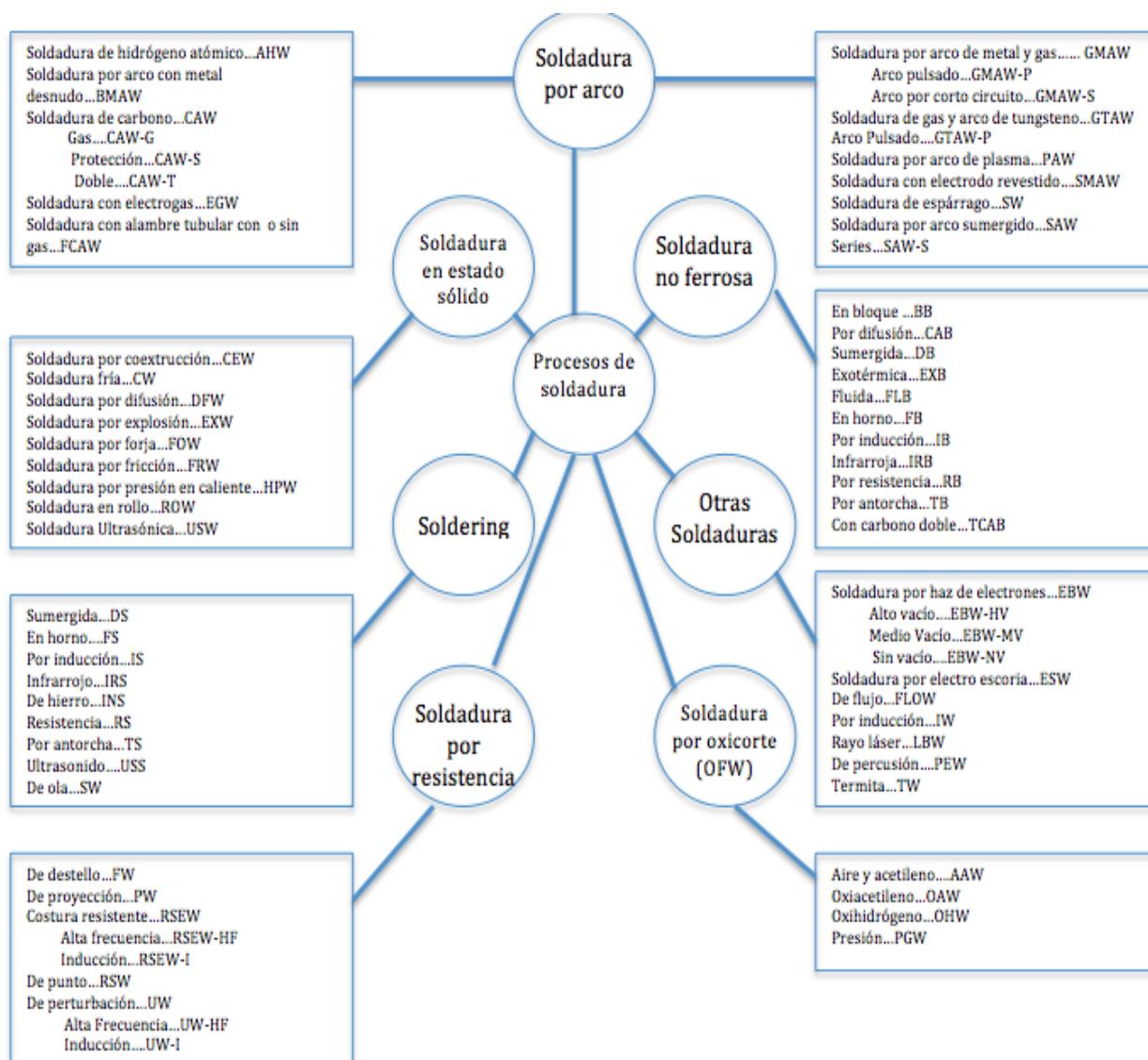
El proceso de soldadura es el conjunto de elementos operacionales básicos usados para hacer la unión soldada, los cuales deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Suministrar la energía necesaria para crear la unión (térmica, mecánica o una combinación de ambas)
- Evitar la contaminación atmosférica o sus efectos sobre el metal fundido.
- Suministrar el metal de aporte (opcional con algunos procesos y configuraciones de junta)
- Controlar la metalurgia de los metales involucrados

Existen numerosos procesos de soldadura y corte los cuales se pueden observar en la carta maestra de los procesos de soldadura que se muestra en la figura 1.

Figura 1. Carta maestra de los procesos de soldadura y corte según la AWS.

Marco Teórico



Este trabajo se focalizará en el proceso GMAW ya que tiene una alta importancia para las aplicaciones industriales y en el medio local no se emplea de manera amplia, posiblemente por desconocimiento de las ventajas económicas y de calidad que posee. Por ello se quiere realizar un estudio y caracterización de algunos fenómenos de este proceso a fin de aumentar la base de conocimiento que de él se tiene.

1.3.1 Proceso de Soldadura GMAW

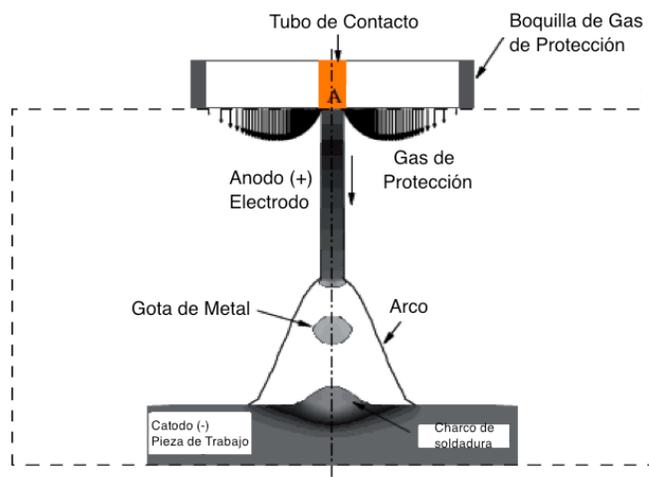
El proceso GMAW es un proceso de soldadura que emplea un arco eléctrico entre un alambre continuo sólido o tubular para proveer el metal de aporte y usa un gas de protección suministrado por una fuente externa; el gas de protección se usa con el propósito de proteger las zonas de soldadura del aire y a fin de evitar defectos. Este proceso se caracteriza por su versatilidad para ser aplicado en todas las posiciones de soldadura, su facilidad para ser automatizado y robotizado, la homogeneidad en la calidad de los cordones y la posibilidad de ser usado para aplicar una amplia gama de materiales, incluso a aquellos que tienen problemas de soldabilidad [2]. Wegloski [5] ha clasificado el proceso de soldadura GMAW en tres subcategorías: MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas) y proceso con electrodo tubular.

El proceso GMAW posee varias desventajas como:

- Requiere de equipos de soldadura complejos, caros y menos portátiles.
- Posee restricciones para utilizarse en puntos de difícil acceso.
- El arco debe ser protegido de las corrientes de aire.
- Presenta altos niveles de generación de radiación calor.
- Presenta sensibilidad a la variación de los parámetros eléctricos de operación. Respecto a este último ítem no se tiene un criterio para establecer la sensibilidad de esta variación.

En la figura 2 se muestra un esquema que describe el proceso soldadura GMAW: Posee una tobera cilíndrica para la alimentación del gas de protección en cuyo centro se desplaza el material de aporte. Al final de la tobera se forma un arco eléctrico que va hasta el charco de soldadura; a través de este arco viajan gotas de metal fundido que se depositan en el charco de soldadura.

Figura 2. Esquema para el proceso GMAW adaptado de [2]



El proceso GMAW maneja múltiples variables tales como la velocidad de alimentación de alambre, el voltaje, la corriente, el flujo de gas, la distancia tobera/pieza, el diámetro del electrodo, la impedancia, la extensión del electrodo, entre otras. La interacción de estas variables tienen una fuerte influencia en fenómenos como la transferencia de calor y de masa. Ésta última se refiere al modo en el que se transfiere el material desde la punta del alambre de soldadura hacia la pieza de trabajo, el cual puede ser en gotas de diversos diámetros o de manera globular. Las investigaciones muestran que las variables que más inciden son el voltaje, la corriente y el gas protector [5,6,7,8,11]. Todas estas variables ejercen una influencia sobre la transferencia de masa la cual es a su vez ya que ejerce influencia para determinar la estabilidad del proceso, el nivel de penetración, la emisión de gases y la calidad de la soldadura [3,4,5].

Las primeras investigaciones acerca de la relación de la geometría de la gota con los procesos de soldadura se realizaron a mediados del siglo XX por los investigadores Lee y Rveendra; posteriormente, Chandel aplicó modelos matemáticos para hallar la relación entre la geometría de la gota y los parámetros de soldadura, encontrando que el parámetro con más alto grado de influencia es la corriente [4]. Debido a la importancia de la transferencia de masa y considerando aportes como los mencionados anteriormente, se realizaron varias investigaciones al respecto cuyo objetivo era tener una mejor caracterización de los modos de transferencia de metal presentes en el proceso GMAW.

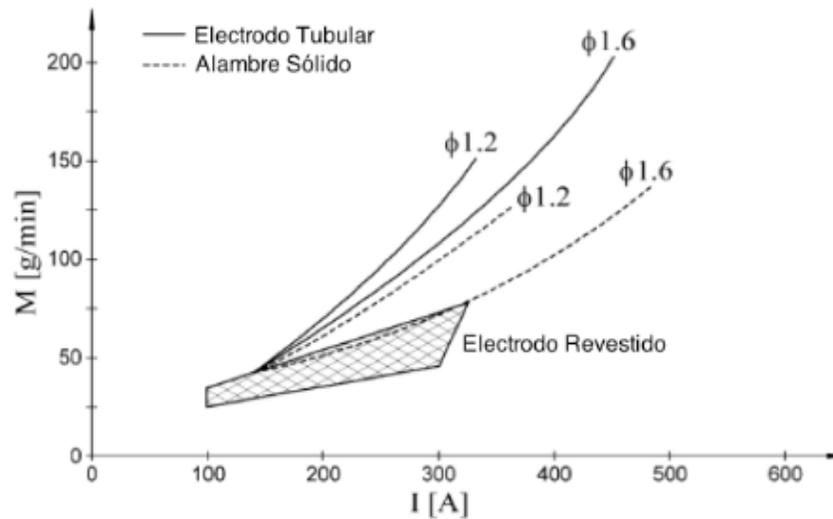
1.3.1.1. Variables del proceso GMAW

Tasa de fusión: Es definida como la masa de metal fundida en una unidad de tiempo. Es uno de los factores de productividad más importante en un proceso de soldadura. La energía eléctrica se transforma en energía térmica, lo cual incrementa la energía del material de aporte hasta llevarlo al punto de fusión generando la formación de una gota que viaja a través del arco hasta llegar al charco de soldadura.

Las variables que afectan la tasa de fusión son la corriente del arco, la extensión del electrodo y el diámetro del electrodo, siendo la corriente la variable más representativa. Adicionalmente, la tasa de fusión también depende del electrodo que se esté trabajando. [8].

No se conoce un modelo matemático exacto para los diferentes modos de fusión del material ya que, como se mencionó anteriormente, las variaciones en la corriente de soldadura afectan de manera significativa la tasa de fusión. Algunos autores han buscado relaciones puntuales para una determinada corriente de soldadura. Una manera aproximada de conocer la relación de la tasa de fusión de los alambres sólidos, tubulares y los electrodos revestidos ha sido mediante el levantamiento de gráficas, un ejemplo de ellas es ilustrado en la figura 3. En esta gráfica se muestra la tasa de fusión para un electrodo revestido aplicado con proceso de soldadura SMAW, un electrodo tubular aplicado con proceso de soldadura FCAW y un electrodo de alambre sólido aplicado con proceso de soldadura GMAW [8].

Figura 3. Comparación de las tasas de fusión en soldadura utilizando electrodo revestido, sólido y tubular respectivamente adaptado de [8]

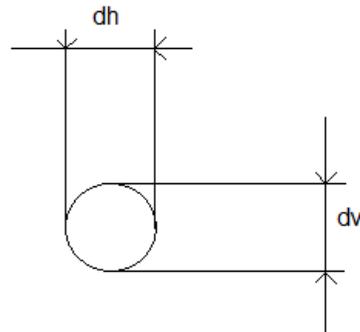


Diámetro del electrodo: Aunque se podría pensar que el diámetro de la gota será igual al diámetro del electrodo, las investigaciones muestran que el diámetro de la gota no decrece de manera proporcional al diámetro del alambre, esto posiblemente se deba a la dependencia que posee el diámetro de la gota con otras variables como el gas de protección, la corriente de soldadura, la velocidad de alimentación, la tasa de fusión, entre otros factores. Por ejemplo, Soderstrom et al afirman que si el gas de protección contiene al menos un 30% de CO_2 , el diámetro promedio de las gotas no será menor que el diámetro del electrodo usado a pesar de la corriente utilizada. [7].

Existen otros autores que han encontrado una relación matemática para calcular el diámetro de la gota como sigue en la ecuación (1):

$$D = \frac{D_v + D_h}{2} \quad (1)$$

donde D_v es el diámetro en la dirección vertical y D_h es el diámetro en la dirección horizontal [5] como se ilustra en la figura 4.

Figura 4. Metodología para calcular el diámetro de una sola gota en GMAW [5]

Para utilizar este método deben obtenerse 7 imágenes consecutivas, descartarse el diámetro mayor y el diámetro menor y si la diferencia entre D_v y D_h excede el 20% se descarta la secuencia.

El inconveniente del uso de este método radica en su alto costo ya que para obtener una adecuada resolución de las imágenes se requiere un sistema de filtrado digital altamente sofisticado a fin de obtener precisión en las imágenes obtenidas.

Gas de protección: Como se mencionó en la definición del proceso GMAW, éste requiere de un gas de protección contra los agentes externos oxidantes. Se ha encontrado que es posible utilizar protección con gases puros o con mezclas de gases.

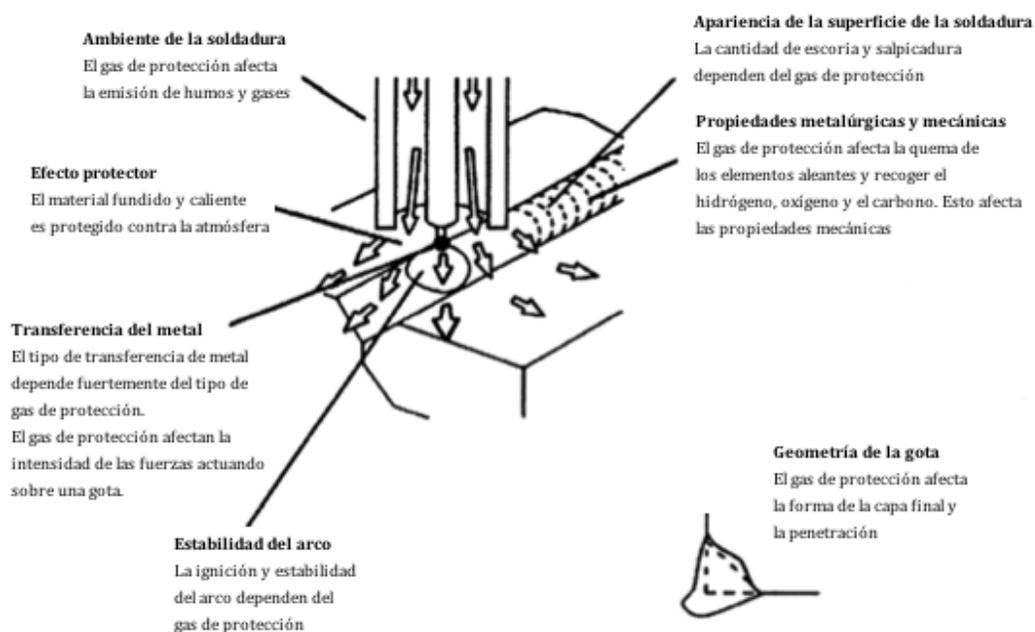
Autores como Suban et al han estudiado acerca de la importancia del gas de protección y mostraron que son fundamentales para los siguientes aspectos:

- Mejorar el medio de la soldadura, el gas de soldadura afecta la formación y emisión de humos.
- Efecto protector para el material fundido y el material del electrodo.
- La forma de transferencia del metal tiene un alto grado de dependencia del gas de protección y éste afecta las fuerzas presentes sobre una gota.
- Afecta la estabilidad y la ignición del arco.
- Las salpicaduras y la escoria dependen del gas de protección
- Afectan la quema de los aleantes y absorben el oxígeno, el nitrógeno y el carbono.

- Afecta la forma de la última capa y la penetración.

En la figura 5 se esquematizan los puntos anteriores.

Figura 5. Esquema de la influencia de los gases de protección en el proceso de soldadura GMAW [8].



Por su parte, la AWS ha establecido que la mayor importancia del gas protector radica en su capacidad de aislar el metal fundido de la atmósfera para así evitar que el vapor de agua reaccione con el metal y se formen estructuras no deseadas como óxidos o nitruros.

Para efectos de este trabajo se tiene que la característica más influyente del gas de protección es su relación directa con la forma de transferencia de masa por lo tanto se hará un énfasis especial en ello. Lo cual está directamente relacionado con las fuerzas eléctricas involucradas en el proceso de soldadura.

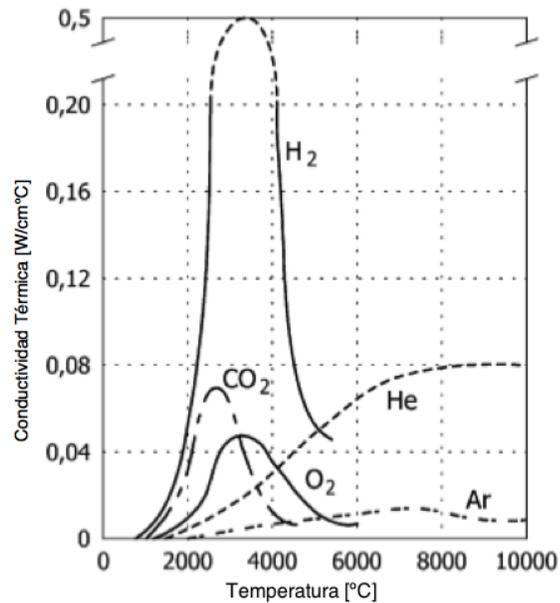
En soldadura son utilizados gases de protección totalmente puros y estables como el Helio o el Argón o mezclas de gases que pueden ir desde dos hasta cuatro componentes. No se ha encontrado referencia que muestre el uso de mezclas con más de cuatro componentes; tampoco se ha encontrado el reporte de uso de gases puros inestables como medio de protección, esto posiblemente se deba a la tendencia de éstos gases a generar disociación y por ende inestabilidades en el arco. La ventaja de utilizar gases totalmente puros es que son eléctricamente neutros (cargas positivas = cargas negativas) lo que genera una protección estable y por lo tanto pocos niveles de disociación.

Lancaster [9] y Kleber [10] afirman que las principales características de un gas de protección, mirando desde la óptica de la estabilidad del arco, son:

1. El potencial de ionización.
2. El potencial de oxidación.
3. Conductividad térmica.

El potencial de ionización se refiere al voltaje necesario para remover un electrón de un átomo. Las diferencias en la conductividad térmica de dos componentes de un gas de protección generan diferencias en las características de los depósitos de soldadura resultantes; así los gases que tienen alta conductividad térmica transfieren más calor a la pieza, influyendo de este modo la forma del perfil de penetración de la soldadura. En la figura 6 se muestra el esquema del comportamiento de la conductividad térmica para varios gases dependiendo de la temperatura.

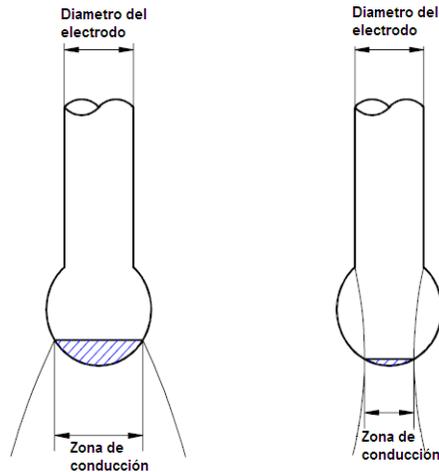
Figura 6. Relación de la conductividad Térmica y la temperatura, adaptado de [9]



Para gases con una alta conductividad térmica se hace necesario usar niveles de voltaje más altos para iniciar y mantener el arco, debido a las altas pérdidas de calor por conducción. Al aumentar la conductividad térmica del gas el arco deja de envolver a la gota en formación en la punta del electrodo, produciéndose una contracción de la zona anódica, esto disminuye la zona de conducción eléctrica, produciendo una alta concentración de corriente en la punta del electrodo, este fenómeno puede llegar a convertir a la fuerza electromagnética (FEM) en una fuerza de retención generando una transferencia globular repelida. En la Figura 7 se puede observar el efecto del aumento de la conductividad térmica sobre de la zona de conducción. La reducción de la zona de conducción eléctrica genera líneas de corriente convergentes.

Otro efecto asociado al aumento de la conductividad térmica es la alta concentración de calor en el centro del arco y cerca de la punta del electrodo que genera una tasa de fusión de metal más alta, produciendo vapores de metal. La fuerza asociada a este vapor genera un desprendimiento errático, que es responsable en parte del modo de transferencia globular repelido; para evitar este modo de transferencia se hace necesario aumentar el nivel de corriente y de esta manera aumentar la fuerza electromagnética hasta hacerla mayor a la fuerza generada por el vapor [11].

Figura 7. Efecto sobre la zona de conducción para gases con una baja conductividad térmica (izquierda) y una alta conductividad térmica (derecha) [11].



Recientemente se han realizado investigaciones encaminadas a identificar la influencia del gas protector en la formación y desprendimiento de las gotas de metal líquido y explicar los fenómenos físicos que se presentan en dicho proceso. Rao et al [12] presentan un estudio sobre los efectos de la composición del gas protector en el arco de plasma y en la transferencia de metal. Soderstrom [7] realizó una investigación usando diferentes mezclas de argón y dióxido de carbono como gas protector para electrodos delgados a fin de analizar la influencia del gas de protección para electrodos con diámetro no convencional. Pires y otros [11] realizaron un análisis de la influencia de la composición del gas de protección en la transferencia de metal y la tasa de formación de humos en el proceso GMAW. Todas estas investigaciones son coincidentes en afirmar:

- Las mezclas de gas que contienen CO_2 tienden a presentar transferencia inestable.
- El argón y el helio son los gases de protección más estables pero están en desventaja debido a su costo.
- La calidad de las soldaduras se ve afectada por el gas protector

A continuación se presentan diferentes gases empleados en la protección del arco en el proceso GMAW y su influencia en diferentes características como la estabilidad de arco y la soldadura obtenida, esta información se basa en los trabajos presentados en el párrafo anterior.

Argón (Ar): Es el gas más usado en el proceso GMAW debido a que es un gas inerte, lo que posibilita que no reaccione con los elementos del metal de aporte. Sin embargo es el gas más costoso y por tal motivo se trata de usar en mezclas con otros gases como el dióxido de carbono o helio. Presenta una buena estabilidad de arco y tiene un bajo potencial de ionización (15.75 V) lo que reduce el voltaje del arco generando una baja energía y por tanto una baja penetración.

Dióxido de carbono (CO₂): Generalmente se trata de tener mezclas de gas con CO₂ para disminuir costos, sin embargo la adición de este gas en la mezcla conlleva algunos inconvenientes, tales como:

- Es necesario aumentar el nivel del voltaje para tener una transferencia de metal estable, lo cual implica que la estabilidad del arco decaiga.
- Presenta tasas de deposición más bajas y disminuye la calidad del cordón de soldadura.

Para mezclas de argón con menos del 25% de CO₂ se puede obtener transferencia en vuelo libre con desplazamiento axial estable, sin embargo cuando se incrementa el porcentaje de CO₂ se presenta el modo de transferencia repelido. El CO₂ desplaza el nivel de la corriente de transición y disminuye la frecuencia de desprendimiento. Con altos contenidos de CO₂ es casi imposible obtener transferencia por aspersion.

Oxígeno (O₂): Permite obtener arcos más estables. Eleva la temperatura del arco y reduce la tensión superficial del metal líquido. Permite tener zonas de conducción eléctrica más grandes a medida que se aumenta su concentración en la mezcla del gas.

Helio (He): Un alto contenido de helio en la mezcla del gas genera gotas más grandes con una frecuencia de desprendimiento más baja. Para altas concentraciones de helio la fuerza FEM actúa como una fuerza de retención en la parte inferior de la gota debido a las altas concentraciones de corriente que se generan en esta parte de la gota, mientras que en la parte superior la FEM sigue siendo de desprendimiento. Esta contraposición de las fuerzas genera una gota achatada en los extremos debido a que la gota desprendida contiene una mayor energía y esto se ve reflejado en una mayor temperatura en la pieza de trabajo. El cordón obtenido con gases ricos en helio tiene menos penetración que con gases ricos en Argón.

Los gases mencionados anteriormente se suelen usar en combinaciones, donde el argón es el gas predominante.

Fuente de potencia: La fuente de potencia es la encargada de suministrar energía eléctrica al electrodo y a la pieza de trabajo, y poder producir el arco eléctrico. Por lo general se usa alimentación de corriente continua con electrodo positivo, es decir, la terminal positiva de la fuente se conecta a la pistola y la negativa a la pieza de trabajo. Las fuentes de potencia para el proceso GMAW presentan dos variantes, y la diferencia entre ambas es la relación entre voltaje y corriente. El primer tipo es la fuente de voltaje constante y velocidad de alimentación constante, la cual controla el nivel de corriente en función de la longitud de arco, la relación Voltaje-Corriente de este tipo de fuentes se expone en la figura 8.

Como se puede apreciar, ante cambios pequeños de voltaje (longitud de arco) se da un gran cambio en el nivel de corriente.

El segundo tipo de fuentes de potencia son las de corriente constante, operan modificando la velocidad de alimentación del electrodo cuando se presenta cambios en el

nivel de voltaje, la relación Voltaje-Corriente de las fuentes de corriente constante se expone en la figura 9. Este comportamiento se expone más claramente en la descripción de la dinámica de la extensión del electrodo y longitud de arco.

Figura 8. Relación voltaje-corriente para una fuente de potencia de voltaje constante. Imagen editada y traducida de (lincoln electric, 2006).

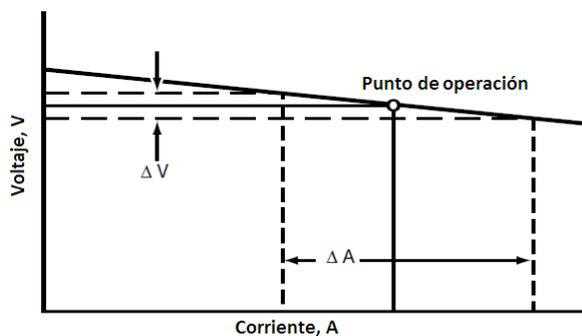
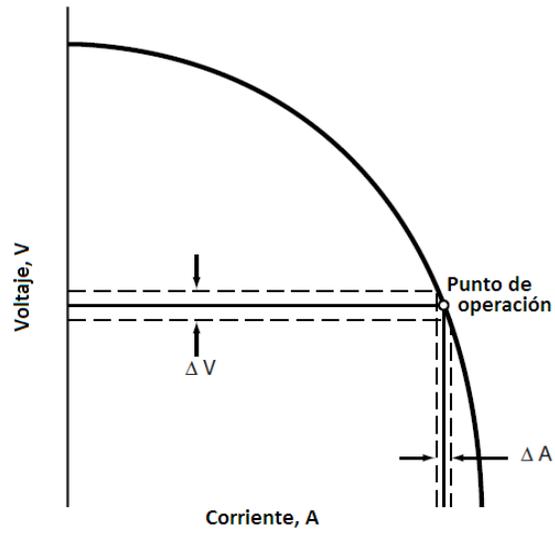


Figura 9. Relación voltaje-corriente para una fuente de potencia de corriente constante. Imagen editada y traducida de (lincoln electric, 2006).



2. Modos de transferencia de metal en el proceso de soldadura GMAW y clasificación del Instituto Internacional de Soldadura

Los diferentes tipos de transferencia de metal fueron por primera vez clasificados por el Instituto Internacional de Soldadura y publicados en 1984. El interés general para mejorar los costos de producción ha llevado a buscar formas de mejorar los niveles de productividad industrial y esto a su vez busca el desarrollo de nuevas fuentes de potencia las cuales han generado consigo la necesidad de incrementar la comprensión y el conocimiento de los modos de transferencia de metal a fin de caracterizar adecuadamente los procesos. Esta relación se basa en el hecho que los modos de transferencia de metal tienen una influencia directa en la estabilidad del arco, la generación de humos, las salpicaduras, penetración y el comportamiento del charco de soldadura.

La forma en la cual el metal fundido es formado en la punta del electrodo y transferido al charco de soldadura está principalmente influenciado por la corriente de soldadura y por el voltaje, pero hay muchas otras variables que afectan este proceso como la velocidad de alimentación, el gas de protección, el diámetro del electrodo y la velocidad de aplicación. Quintino et al [13, 14, 15] han identificado los llamados modos naturales o fundamentales, los cuales son: Globular, aspersion y corto circuito. Estos modos se dan para las fuentes de soldadura convencionales, pero es de aclarar que el desarrollo de nuevas fuentes de potencia para soldadura ha introducido otros modos de transferencia de metal en un proceso de soldadura; es por esta razón por la cual se propusieron dos nuevas clasificaciones adicionales: Transferencia controlada y transferencia por modo de operación.

La transferencia controlada puede ser por corto circuito o por aspersion y la transferencia por modo de operación contiene transferencia por aspersion, por corto circuito y pulsada; esta se da para fuentes de soldadura específicas.

Según lo descrito por Quintino et al, los modos de transferencia de metal están influenciados por el tipo de material de aporte, los rangos de intensidad de corriente y voltaje, la polaridad de los electrodos y el gas de protección [11]. Por su parte, Eagar [16] afirma que los parámetros más importantes en los modos de transferencia son: la corriente, el voltaje del arco, la distancia de contacto a la pieza de trabajo, la composición del gas de protección, la tasa de flujo del gas de protección, el ángulo de inclinación de la antorcha, los elementos aleantes, la velocidad de alimentación del alambre, la extensión y el diámetro del electrodo. Particularmente, para este caso de estudio, el tratamiento de estos datos será establecido en el diseño de experimentos.

Los denominados mapas de modo de transferencia son la herramienta que permite realizar una representación de la relación Voltaje/Amperaje a partir de sus señales e identificar los diferentes modos de transferencia, las zonas de inestabilidad y las corrientes de transición que son aquellas donde hay paso de un modo de transferencia de metal a otro.

Recientemente, el Instituto Internacional de Soldadura clasificó los modos de transferencia como naturales y controlados: los naturales son aquellos que utilizan fuentes convencionales sin ejercer control sobre los pulsos del voltaje y/o la corriente, mientras que los controlados son aquellos para los cuales la transferencia ocurre en condiciones forzadas [13,14]. Investigadores como Iordarechescu, Quintino et al han identificado tres modos fundamentales naturales de transferencia: globular, corto circuito y aspersion, los cuales tienen las siguientes características:

Globular por gota (Figura 10B): Ocurre a bajos niveles de corriente donde el metal fundido forma una gota grande al final del alambre. La gota continúa creciendo hasta que las fuerzas de desprendimiento sean mayores a la fuerza de tensión superficial, entonces

la gota se desprende y continúa viajando por la acción de la gravedad. Quintino et al propusieron que, dependiendo de los parámetros eléctricos (amperaje y voltaje) y de las fuerzas presentes en la soldadura es posible la subdivisión de este modo de transferencia en globular por gota o globular repelida [15]. Esta teoría fue corroborada por Soderstrom et al quienes además afirmaron que siempre que el gas de protección exceda un 25% de CO_2 va a existir transferencia globular repelida [7].

Kléber [10] por su parte afirma que la transferencia globular ocurre para valores intermedios de voltaje y amperaje y que da un arco más estable que la transferencia por cortocircuito. Afirma además, que este modo de transferencia da como resultado aportes de poca penetración, elevada cantidad de salpicaduras y está limitada a la posición plana.

Globular repelida (Figura 10C): El proceso de generación de la gota es muy similar al descrito en el modo globular, sin embargo se da a corrientes levemente superiores y es característico en procesos donde se usan mezclas de gases de protección con CO_2 . Se caracteriza por gotas grandes y largas que están asociadas a la oposición de fuerzas generadas en la punta del electrodo y en la parte inferior de la gota. A diferencia de los otros modos de transferencia, el desplazamiento de la gota no es axial, presentando movimientos erráticos que es el principal inconveniente para aplicaciones industriales, sin embargo el estudio de este modo de transferencia permite una comprensión más amplia de los efectos del gas protector, del nivel y tipo de corriente empleada y de la interacción de las fuerzas ejercidas sobre la gota [12].

Corto circuito (figura 10A): El crecimiento de la gota a bajas corrientes de soldadura está limitado por un bajo voltaje del arco el cual acorta la longitud del arco. Chu et al [17] clasificaron el ciclo en tres tiempos: 1). El alambre se funde y se forma una gota durante el período del arco 2). La gota toca la superficie del charco o del material base y genera un cortocircuito. 3) Hay una extinción del arco. El proceso descrito es cíclico.

Durante el período de corto circuito el voltaje del arco desciende a su mínimo valor y la corriente asciende hasta su máximo, de manera que el proceso puede controlarse por medio de la corriente y el voltaje.

Kléber [10] establece que este modo de transferencia ocurre cuando las velocidades de alimentación del alambre exceden la tasa de fusión hasta que se da un contacto con el charco de soldadura y la punta del electrodo es transferida.

Aspersión por gota (figura 10D): Este modo de transferencia se caracteriza porque el diámetro de la gota es menor al diámetro del electrodo. Quintino et al propusieron una subdivisión para este modo de transferencia en transferencia por gota, rotativa y fluida, las cuales se diferencian por sus parámetros eléctricos y las fuerzas presentes. La transferencia por gota es aquella en que el diámetro de la gota es casi igual al diámetro del electrodo, la transferencia fluida se caracteriza por tener gotas pequeñas y continuas, por su parte la rotativa se origina cuando hay un aumento en la corriente y el metal fundido se desprende en forma de espirales debido a la presencia de fuertes fuerzas electromagnéticas [15].

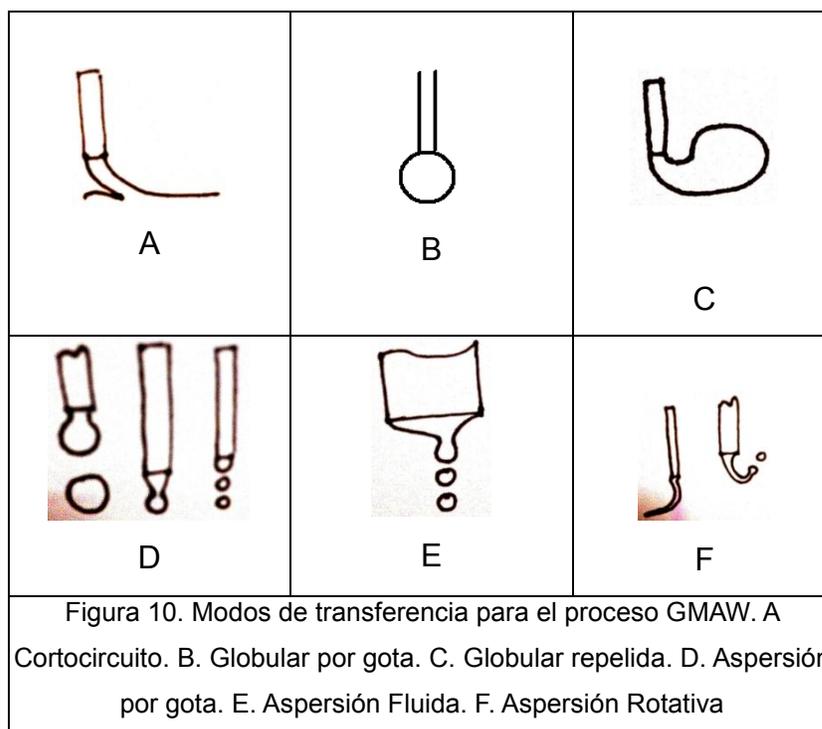
Aspersión Fluida (Figura 10E): Este tipo de transferencia tiene características muy similares al modo de transferencia por aspersion, sin embargo se presenta a niveles de corrientes más altas, generando una mayor frecuencia de desprendimiento y gotas más pequeñas.

Aspersión Rotacional (Figura 10F): Cuando el nivel de corriente sigue aumentando se forma un flujo casi continuo de metal líquido con un comportamiento rotacional producto del alto campo electromagnético generado por la alta corriente. El principal problema de este modo es la baja direccionabilidad y el alto aporte de calor a la pieza de trabajo [15].

Existen también los modos de transferencia combinados que son aquellos en los cuales hay, de manera simultánea, dos modos de transferencia de metal diferentes.

Para tener una idea gráfica, se muestra un esquema de los modos de transferencia mencionados anteriormente:

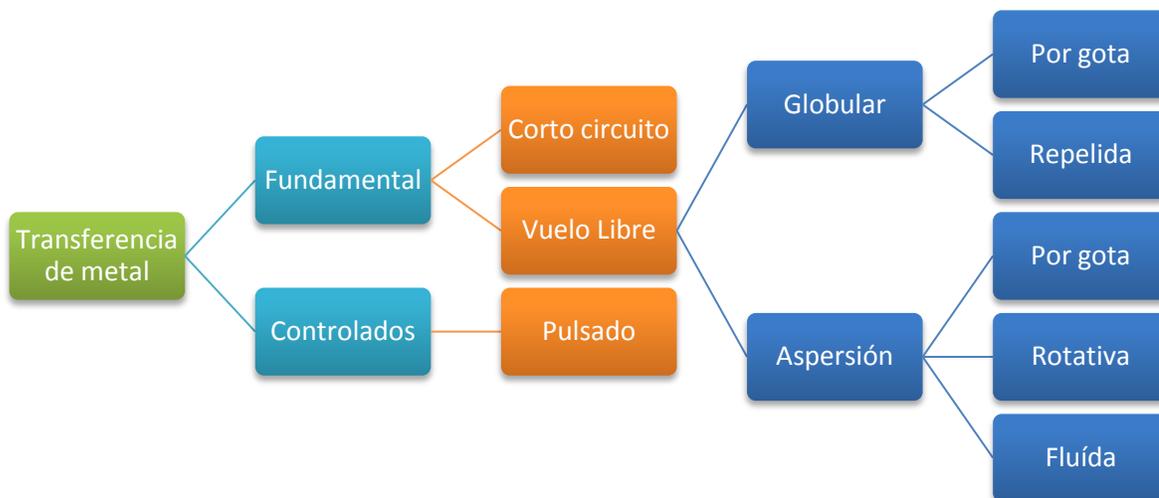
Figura 10. Modos de transferencia para el proceso GMAW. A Cortocircuito. B. Globular por gota. C. Globular repelida. D. Aspersión por gota. E. Aspersión Fluida. F. Aspersión Rotativa



Los diferentes autores tratados a lo largo de este texto, hacen mención a varios modos de transferencia de metal pero todos son consistentes en el hecho de que existen la transferencia por corto circuito, la transferencia globular y la transferencia por aspersión. Algunos de ellos las subdividen de la misma forma que Quintino y otros consideran la aspersión como un tipo; es decir no hablan sobre la aspersión fluida o rotativa. A fin de unificar los criterios y tener una clasificación soporte, se realizó un cuadro donde se

muestran los modos de transferencia considerados por el Instituto Internacional de Soldadura y las consideraciones particulares de cada uno de los autores:

Figura 11. Cuadro de los Modos de Transferencia de Metal.



Corriente de transición: Es aquel valor de corriente para el cual se pasa de un modo de transferencia a otro. Estas corrientes dependen de las variables de soldadura como la velocidad de alimentación del alambre, los parámetros eléctricos, el diámetro del electrodo y el gas de protección; a manera de ejemplo, en la tabla 1 se muestran los valores de corriente de transición para un electrodo de acero al carbono recubierto con 98%Ar + 2% CO₂.

Tabla 1. Corriente de transición para un electrodo de acero al carbono recubierto con 98%Ar + 2% CO₂. [4]

Diámetro del electrodo [mm]	Corriente de Transición [A]
0.75	155
0.90	170
1.15	220
1.60	275

3. Mapas de modo de transferencia de metal

Considerando las clasificaciones de los modos de transferencia y la importancia de los parámetros eléctricos en el proceso GMAW, surgieron los mapas de modo de transferencia que corresponden a un diagrama clásico basado en la relación entre la corriente de soldadura y el voltaje del arco; los mapas de modo de transferencia son una herramienta práctica para la adecuada selección de las condiciones de operación y los parámetros de soldadura [13]. En los mapas de modo de transferencia es posible identificar, también, las corrientes de transición (zonas de transferencia inestable) y los modos mixtos (se dan cuando ocurren dos transferencias en forma aleatoria en una zona de transición). Estas gráficas de relación entre la corriente y el voltaje para un electrodo específico aplicado con un gas o mezcla de gases determinada sirve para el desarrollo de procedimientos de soldadura ya que el código ASME sección IX establece el modo de transferencia de metal como una variable esencial para el proceso de soldadura GMAW

En los mapas de modo de transferencia es posible apreciar claramente la influencia del gas protector, mencionada anteriormente, ya que el cambio del gas protector generará cambios en el mapa de modo de transferencia para cada material debido a su influencia sobre la conductividad térmica del proceso y la tensión superficial [11].

Como se mencionó en párrafos anteriores, los parámetros eléctricos ejercen una gran influencia en los Modos de Transferencia de Metal, es por ello que Karadeniz [6] realizó estudios que lo llevaron a concluir que la intensidad de corriente ejerce un efecto muy fuerte en la capacidad de fusión, el tamaño, geometría y penetración de la gota, mostrando así que aunque la corriente y el voltaje tienen una alta influencia sobre los

modos de transferencia, la corriente ejerce una mayor influencia en el desprendimiento del metal. No obstante, como se mencionó anteriormente, existen otros parámetros de soldadura que también ejercen influencia.

Eagar [16] afirma que el proceso de formación y desprendimiento de la gota está caracterizado por una combinación de naturaleza espacial y temporal y que puede ser dividido en varias etapas:

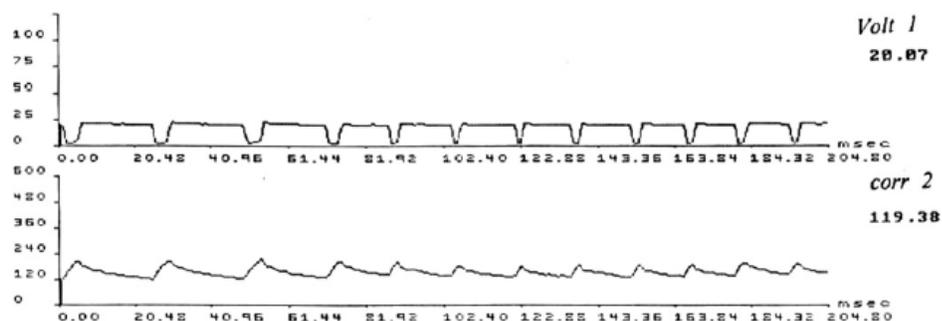
- Fusión del electrodo
- Disminución del diámetro
- Formación de la gota
- Estrangulamiento (desprendimiento de la gota).

El paso 3, formación de la gota, está influenciado por los parámetros eléctricos y dependiendo de ellos se obtendrán diferentes formas de la gota, caracterizadas en el numeral anterior.

En todo procedimiento de soldadura se hace entonces indispensable conocer la intensidad de estos dos parámetros eléctricos para poder determinar características de la transferencia de masa y calor, así como determinar el tipo de gas más adecuado para la aplicación efectuada. La implementación de una instrumentación sobre la fuente de potencia del equipo de soldadura brindará la posibilidad de hacer un registro en el tiempo de las variaciones de dichos parámetros y esto, a su vez, dará las herramientas para la construcción de mapas de modo de transferencia de metal para aquellos materiales diferentes al ER70S-6, del cual se conoce registro previo, brindando una herramienta para el óptimo diseño de procedimientos de soldadura.

Un ejemplo del comportamiento de estos parámetros en el tiempo para la transferencia por corto circuito se puede observar en la figura 12, allí se muestra el comportamiento de las señales voltaje y amperaje en el tiempo para el electrodo ER70S-6.

Figura 12. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por corto circuito [11]



Investigadores como Kléber realizaron pruebas sobre el aluminio e identificaron las señales eléctricas para la transferencia de masa, los registros obtenidos se muestran a continuación:

Figura 13. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por aspersion para aluminio [10]

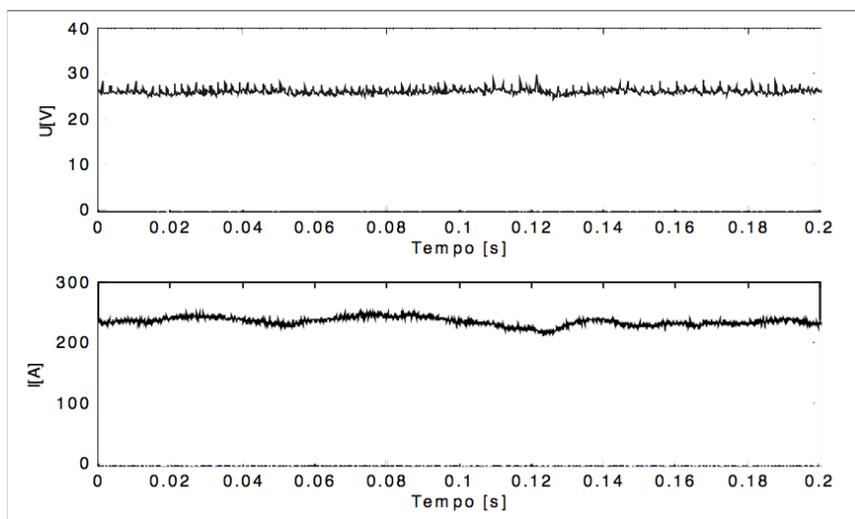


Figura 14. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia por corto circuito para aluminio [10]

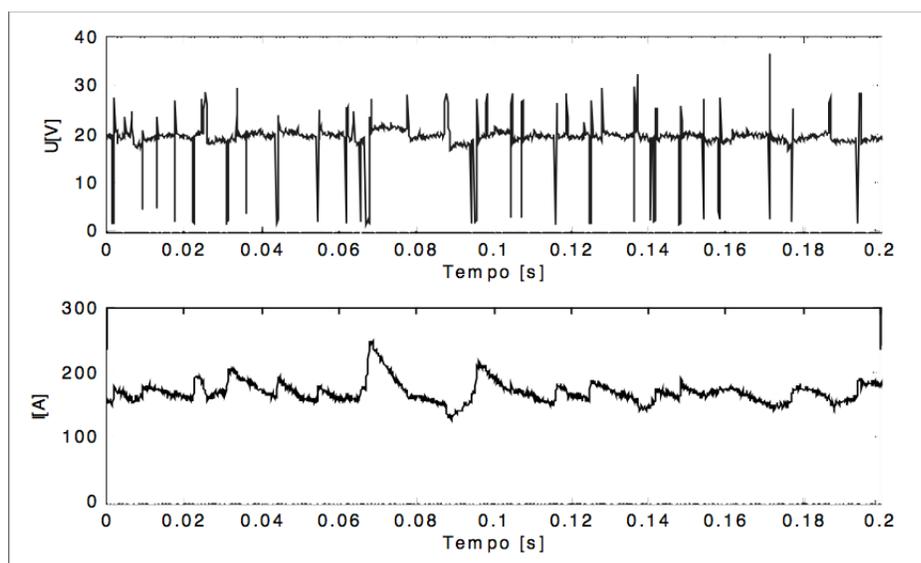
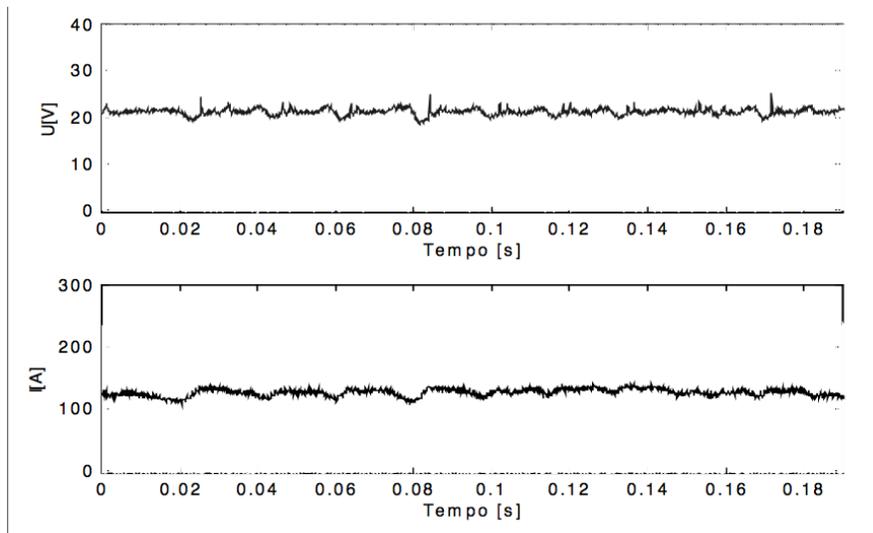


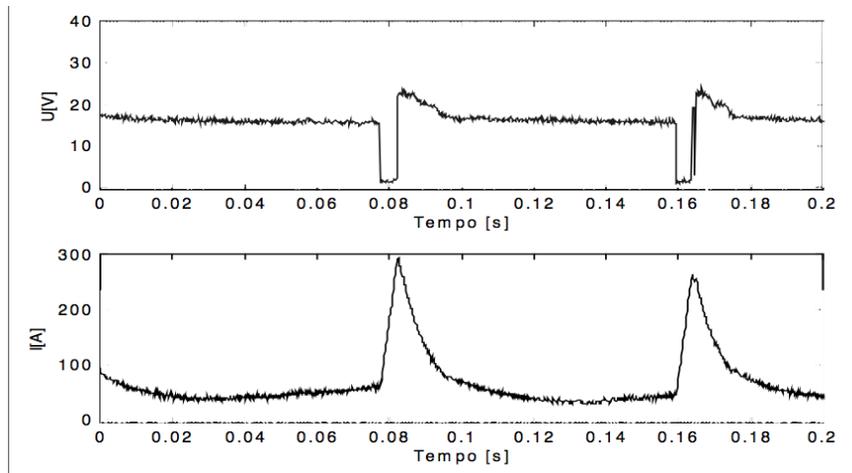
Figura 15. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia globular para aluminio [10]



Para el aluminio se encontró un modo de transferencia combinado corto circuito/globular, las señales obtenidas se muestran a continuación:

Figura 16. Esquema de los parámetros eléctricos para la transferencia corto circuito/globular para aluminio [10].

Mapas de Modo de Transferencia de Metal



De las anteriores gráficas se puede observar que tanto para el acero como para el aluminio, la transferencia por corto circuito se observan caídas y aumentos en la corriente repetibles cada determinada unidad de tiempo, la gráfica para la transferencia por aspersion de aluminio es tan estable que podría ser casi como una línea recta; la transferencia globular presenta un comportamiento estable aunque es posible observar algunos altibajos en las señales eléctricas.

A continuación se muestran los esquemas de algunos mapas de modo de transferencia. En la figura 17 se muestra el mapa de modo de transferencia para el electrodo ER70S-6 bajo gas de protección Ar + 2%CO₂, allí cada punto representa la forma de transferencia de metal para un par coordinado amperaje/voltaje, se observan tres modos fundamentales de transferencia y algunas zonas de inestabilidad y de transferencia mixta.

La figura 18 es una representación esquemática de los mapas de modo de transferencia dada por el IIW, en el cual se ilustra que para cada par amperaje/ voltaje se da un modo determinado de transferencia de metal, allí se muestran las corrientes de transición y se identifica la zona para la transferencia controlada.

Figura 17. Mapa de modo de transferencia para ER70S6 con Ar+2%CO₂. Donde SC es transferencia por corto circuito, G transferencia globular, R es transferencia repelida, S

Mapas de Modo de Transferencia de Metal

transferencia por aspersión, SC/G es modo de transferencia entre corto circuito y globular y SC/S es transferencia entre corto circuito y aspersión [11].

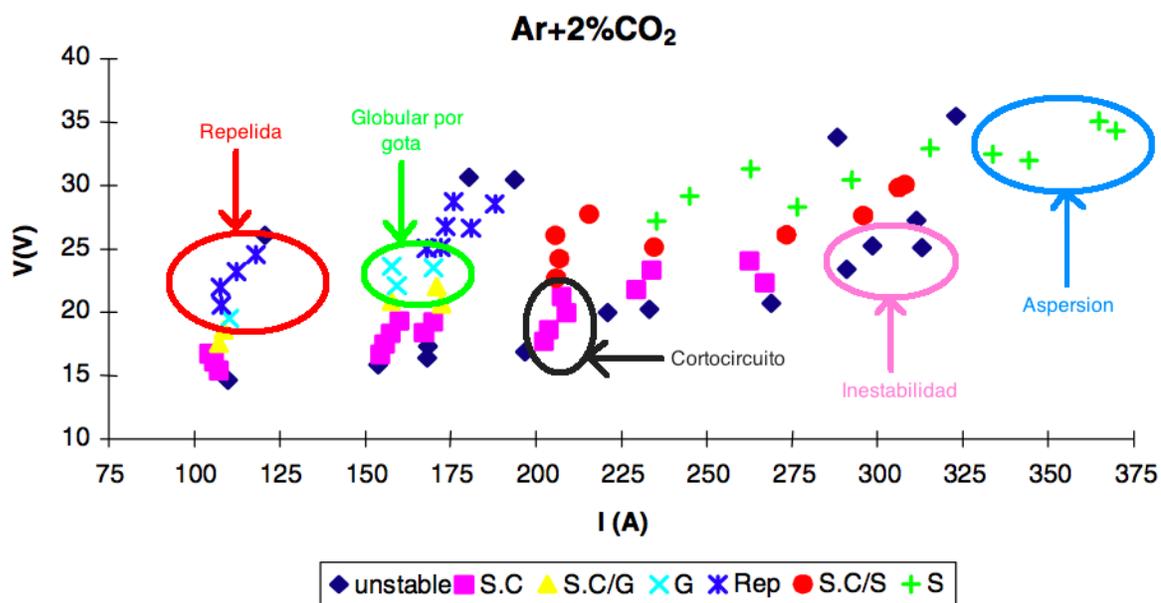
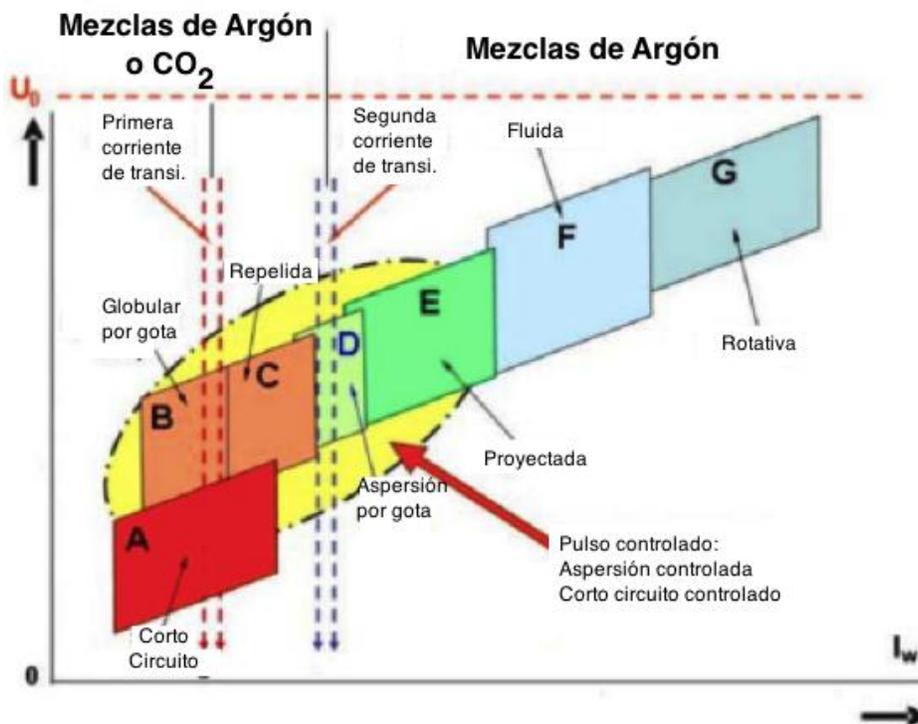


Figura 18. Esquema de mapa de modo de transferencia según IIV, adaptado de [7].



Existen varios métodos conocidos para caracterizar la transferencia de metal, éstos son las herramientas utilizadas para realizar el levantamiento de los mapas de modo de transferencia de metal:

- Shadowgrafía: este método utiliza las sombras obtenidas en un proceso de filmación a fin de realizar una caracterización de las gotas. Este método es limitado por su alto costo.
- Señales de Voltaje y Amperaje en el tiempo.
- Sensores Acústicos.
- Sensores de luz.

Kleber realizó una relación entre los Modos de Transferencia (MDT) y las variables tratadas en estos métodos, así:

Tabla 2. Relación entre los modos de transferencia según Kleber.

Mapas de Modo de Transferencia de Metal

MDT	Corriente	Voltaje	Frecuencia	Sonido	Luz
Corto circuito	Moderada	Bajo	Baja/Alta	Fluctante	Fluctuante
Globular	Alta	Alto	Baja	Menor al CC	Menor a CC
Aspersión	Muy Alta	Moderado	Alta	Estable	Estable

Para entender el fenómeno de transferencia de masa es necesario aprender el uso de alguna de las herramientas tecnológicas y conocer los fenómenos físicos presentes en el proceso de soldadura.

Eagar [16] afirma que, el modelamiento en GMAW es una tarea cambiante que abarca una fuerte interdependencia de los procesos en el electrodo, el plasma y el charco de soldadura; sin embargo, considerando la pequeña influencia que ejercen los procesos del charco de soldadura como tal en el desprendimiento y transferencia de la gota es posible estudiar tres regiones relativamente independientes para efectuar un modelamiento:

- Formación y desprendimiento de la gota.
- Procesos en la columna del arco incluyendo las gotas en vuelo libre.
- Choque de las gotas y comportamiento del charco de soldadura.

Para realizar estos modelos se deben enfrentar problemas como el desconocimiento de las propiedades del material a altas temperaturas, la existencia de superficies libres, sistemas de varias fases y la no linealidad de las ecuaciones que describen el sistema.

Para realizar los procesos de modelamiento enfocados a describir cada una de estas regiones ha identificado tres generaciones de modelos; los de primera generación son los que no consideran interacciones, así, se enfocan en modelar el arco, el electrodo o el charco de soldadura; los de segunda generación es aquellos en los cuales se consideran interacciones: electrodo/charco, arco/charco o electrodo/arco/charco; los modelos de

tercera generación corresponden a los micromodelos de solidificación y los mecanismos sólidos de la soldadura.

Para efectos de realizar este trabajo de investigación se enfocarán los esfuerzos en tener una comprensión sobre la física del arco y el análisis de señales en línea de un proceso de soldadura.

A continuación se hace un estudio de la física del arco.

4. Física del arco

Para el modelo del proceso de soldadura se tienen dos alternativas: la primera es un desarrollo teórico basado en la aplicación de leyes físicas y la segunda es el uso de un software de simulación. Para la primera opción se reconoce la denominada física del arco; hasta el momento se ha planteado la existencia dos teorías para describir la transferencia de metal: 1). Teoría del balance estático de fuerzas y 2). Teoría de inestabilidad por estrangulamiento. Los planteamientos generales de cada una de esas teorías son:

Teoría del balance estático de fuerzas: Afirma que una gota se desprende del electrodo cuando las fuerzas estáticas de desprendimiento exceden las fuerzas de retención. Las fuerzas de desprendimiento incluyen la gravitacional, la electromagnética y el plasma de arrastre, por su parte la tensión superficial y la vaporización corresponden a fuerzas de retención. Para utilizar esta teoría es necesario definir un punto de referencia ya que los cambios en el tiempo son instantáneos.

La fuerza gravitacional se origina por la masa de la gota, la fuerza electromagnética se origina a raíz de la divergencia o convergencia de la corriente al interior del electrodo y el plasma de arrastre se puede estimar haciendo una similitud con una esfera inmersa en un fluido a la cual se le calcula la fuerza de arrastre que debe ejercer para desplazarse.

Respecto a las fuerzas de retención, se tiene que la fuerza de tensión superficial se genera dependiendo de la tensión superficial característica del metal de aporte en estado

líquido y la vaporización depende de la cantidad de masa evaporada en el tiempo para una determinada magnitud de corriente [11].

Waszink afirma que las magnitudes de desprendimiento calculadas por medio de esta teoría muestran un buen comportamiento para la transferencia globular, sin embargo para la transferencia por aspersion suele desviarse significativamente respecto a los experimentos [19].

Kim y Eagar [18] han propuesto las siguientes relaciones para cada una de las fuerzas presentes en esta teoría:

Fuerza de la gravedad:

$$F_g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_d g \quad (2)$$

Donde R es el radio de la gota, ρ_d es la densidad de la gota de metal líquido y g es la constante de la gravedad.

Fuerza electromagnética:

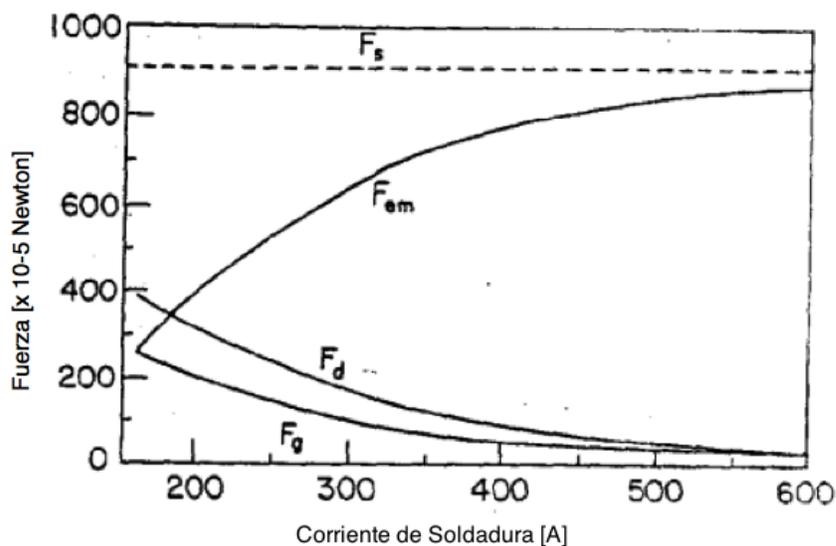
$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_2 \quad (3)$$

Donde

$$f_2 = \left[\frac{\frac{\ln(R \sin \theta)}{r} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln 2}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4)$$

Siendo I la corriente de soldadura y μ_0 es la permeabilidad del espacio libre.

Figura 19. Fuerzas que actúan sobre la gota de un electrodo de acero



El efecto de la fuerza electromagnética se vuelve dominante con el incremento de la corriente, tanto así que la velocidad en el flujo de gas se vuelve indiferente cuando la corriente es muy elevada.

En la figura 18 se muestra la influencia de las fuerzas de gravedad (f_g), fuerza electromagnética (f_{em}) y fuerza del plasma de arrastre (f_d) con el incremento de la corriente; se puede observar que la f_{em} aumenta su influencia de manera proporcional al aumento en la corriente [18].

Plasma de arrastre:

$$F_d = C_D A_p \left(\frac{\rho_F V_f^2}{2} \right) \quad (5)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, A_p es el área proyectada en un plano perpendicular al flujo del fluido, ρ_f es la densidad del fluido líquido y v_f es la velocidad del gas.

Tensión superficial:

$$F_s = 2\pi\alpha\gamma \quad (6)$$

Donde α es el radio del electrodo y γ es la tensión superficial del metal líquido.

Teoría de la inestabilidad de estrangulamiento: Esta teoría fue desarrollada por Rayleigh quien postuló que la fuerza de estrangulamiento autoinducida por la fuerza electromagnética presente en una columna de metal fundido permite la separación de la columna líquida en gotas [8]. El enfoque principal de esta teoría se centra en explicar cómo un aumento de corriente tiende a generar una disminución en el tamaño de las gotas.

Los principales problemas que enfrenta esta teoría es la dificultad para explicar el efecto que tiene la extensión del electrodo y la transferencia repelida.

Esta teoría se ajusta más a la predicción de las gotas para transferencia por aspersion debido a que predice tamaños de gota que son menores a los tamaños de gota en equilibrio, los cuales se predicen a través de la teoría del balance estático de fuerzas.

Para conocer el comportamiento del proceso GMAW es posible utilizar alguna de las teorías mencionadas anteriormente pero se debe ser precavido con el ajuste que presentan con respecto a las mediciones reales.

Una característica fundamental para que la Teoría de la Inestabilidad por Estrangulamiento pueda aplicarse es que el metal líquido se encuentre en una forma cilíndrica, lo cual corresponde a un alto grado de energía libre y altas corrientes, por ello se decía que es solo aplicable a la aspersión.

El encuellamiento del electrodo ocurre porque la localización del ánodo alcanza la superficie del electrodo y genera calentamiento por condensación en la superficie cilíndrica del electrodo. Cuando se genera suficiente calor, la superficie se funde y el metal líquido será arrastrado por la fuerza gravitacional o por la fuerza del plasma de arrastre. Cuando esta fusión y este arrastre ocurra sobre una longitud significativa del cilindro, un encuellamiento se desarrollará al final del electrodo y finalmente se generará el desprendimiento de una gota.

El efecto de la extensión del electrodo puede explicarse por la formación del encuellamiento. La entrada neta de calor ocurre por medio de la condensación de electrones y por el calor generado por efecto Joule. El calentamiento por condensación se genera cuando los electrones entran al plasma del electrodo mientras que el calor por efecto Joule es generado por la resistencia eléctrica del electrodo y ocurre de manera uniforme al interior del mismo.

Los dos métodos anteriores están restringidos a un comportamiento estático de la gota, por ello, Eagar [16] propone un método para modelar el desprendimiento de una gota que considere el comportamiento dinámico de la misma, este método es conocido como Modelo de Desprendimiento Dinámico de la Gota (DDM). Esta teoría simula el crecimiento y desprendimiento de la gota en un ciclo de pasos:

- Cálculo de la suma de las fuerzas espacialmente distribuidas actuando sobre la gota.
- Predicción a priori de una forma aproximada de la gota utilizando el equilibrio estático.

- Ajuste de la forma de la gota por medio de la respuesta dinámica del centro de masa.

Este modelo considera las mismas fuerzas que el Balance estático de fuerzas y la Teoría de inestabilidad de Estrangulamiento, pero adicionalmente toma en cuenta la fuerza de Marangoni la cual es una fuerza magnética.

Como resultado se obtuvo un buen ajuste de este modelo, el cual fue cotejado con imágenes filmadas y se muestra que las fuerzas electromagnéticas son mucho más fuertes en la teoría que en la práctica

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Obtener el mapa de modo de transferencia de metal para el electrodo ER100S1 aplicado con proceso de soldadura GMAW.

5.2 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de adquisición de datos que permita hacer un registro en línea de las variables eléctricas (voltaje y amperaje).
- Establecer el par coordenado de amperaje y voltaje para el cual se da cada modo de transferencia de metal a partir la forma de las señales eléctricas.
- Identificar las zonas de transición de corriente en el mapa de modo de transferencia.
- Establecer una metodología para la clasificación de los modos de transferencia, de acuerdo a las señales eléctricas obtenidas.

6.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

6.1 Materiales e insumos

En un principio se identificaron algunos parámetros y herramientas necesarias para la ejecución del proyecto. Posteriormente se realizó una caracterización de los equipos e insumos a utilizar durante el experimento, y se encontró lo que se muestra a continuación:

6.1.1 Equipo de soldadura

Se utilizó un Miller, Invision 456MP. El equipo cuenta con una fuente de potencia, una pistola de soldadura y una unidad de alimentación, tal como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Equipo de soldadura Miller Invision 456 MP

6.1.2 Pistola de soldadura

El equipo de la Universidad Nacional cuenta con una pistola refrigerada por aire, a fin de evitar problemas de atascamiento o pérdidas de potencia, la pistola está unida directamente a la unidad de alimentación de electrodo.

6.1.3 Unidad de Alimentación

Está conformada por un motor eléctrico que mueve los rodillos impulsores, encargados de mantener la tracción y presión sobre el electrodo. El motor cuenta con una unidad de control para manipular la velocidad del mismo dentro de un rango amplio de operación, sin que se vea afectado por la carga variante. Según el tipo de fuente de potencia que se use en el proceso se tendrá una velocidad constante o una variable. Las fuentes de potencia de voltaje constante usan velocidad constante de alimentación, mientras que las fuentes de potencia de corriente constante usan fuentes de alimentación con control automático de velocidad en función del voltaje de arco. En la figura 21 se muestra la unidad de alimentación de electrodo constante Miller S22A disponible en el Laboratorio de Soldadura.

Figura 21. Esquema del sistema de alimentación S-74S



6. 1.4 Fuente de Potencia

La fuente de potencia es la encargada de suministrar energía eléctrica al electrodo y a la pieza de trabajo, y poder producir el arco eléctrico. Por lo general se usa alimentación de corriente continua con electrodo positivo, es decir, la terminal positiva de la fuente se conecta a la pistola y la negativa a la pieza de trabajo. Las fuentes de potencia para el proceso GMAW presentan dos variantes, y la diferencia entre ambas es la relación entre voltaje y corriente. El primer tipo es la fuente de voltaje constante y velocidad de alimentación constante, la que controla el nivel de corriente en función de la longitud de arco, la relación voltaje/corriente de este tipo de fuentes se expone en la figura 8. Como se puede apreciar, ante cambios pequeños de voltaje (longitud de arco) se da un gran cambio en el nivel de corriente. El segundo tipo de fuentes de potencia son las de corriente constante, operan modificando la velocidad de alimentación del electrodo cuando se presenta cambios en el nivel de voltaje, la relación voltaje/corriente de las fuentes de corriente constante se expone en la figura 9. Este comportamiento se expone más claramente en la descripción de la dinámica de la extensión del electrodo y longitud de arco.

Cualquiera sea el tipo de fuente de potencia usada, el principal objetivo es mantener la longitud de arco constante ante variaciones en la distancia del tubo de contacto a la pieza de trabajo, bien sea por medio del control de la corriente o de la velocidad de alimentación. Para el caso de este experimento se reguló inicialmente la distancia entre el material de aporte y la pieza de trabajo y la velocidad del alambre se varió de acuerdo a las corridas experimentales.

6.1.5 Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de las señales en línea se adaptó un sistema de adquisición de datos sobre el equipo Miller Invision 456MP tal como se muestra en la figura 22 . A fin de realizar la medición de corriente se adaptó un sensor de efecto Hall con un ancho de banda de 0 a 50 kHz. Para la medición del voltaje se adaptó un divisor de voltaje con un filtro analógico de cuarto orden. Ambas señales fueron muestreadas con una frecuencia de 5 kHz. En la Figura 23 se muestra el esquema de la interfaz gráfica utilizada en Labview.

Figura 22. Esquema del sistema de adquisición de datos utilizado

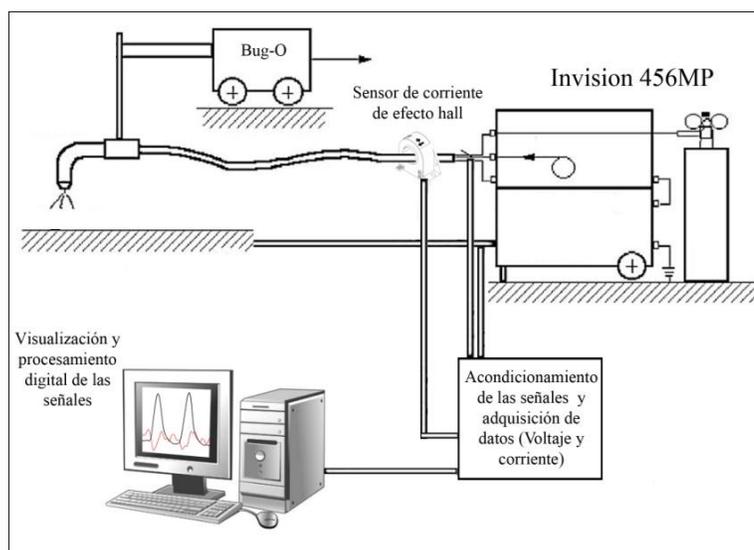
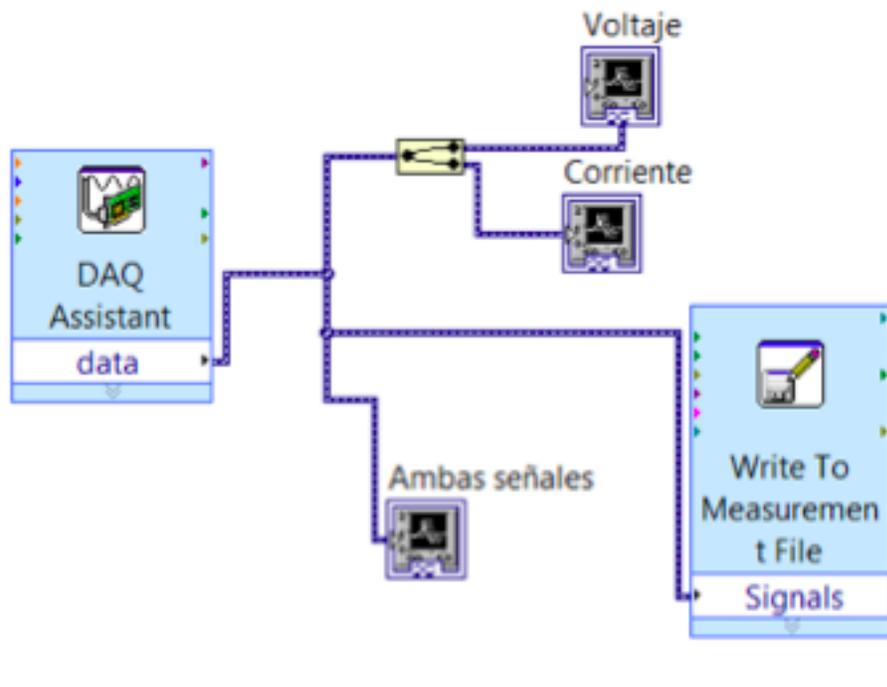


Figura 23. Interfaz gráfica en Labview.



6.1.6 Material de aporte:

La aplicación de las soldaduras se realizó con electrodo ER100S1, este electrodo ha sido estudiado por el Grupo de Soldadura de la Universidad nacional de Colombia a fin de desarrollar procedimientos de soldadura para ser aplicados en aceros navales de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Las investigaciones posteriores han mostrado buenos indicadores de productividad, por lo tanto un conocimiento de los modos de transferencia de este electrodo serán de ayuda para desarrollar procedimientos que apunten a una adecuada transferencia con tasas de deposición que den una ventaja económica considerable.

6.2 Diseño estadístico del Experimento

De la revisión del estado del arte se encuentran una serie de variables significativas en el análisis de transferencia de masa, para realizar el experimento se hizo un tratamiento de estas variables por medio de un diseño de experimentos.

Montgomery [20] define el diseño de experimentos como una técnica que permite planear y ejecutar experimentos, y analizar estadísticamente los datos resultantes, con el fin de obtener conclusiones válidas y objetivas.

Entre tanto Gutiérrez [21] plantea que el diseño experimental consiste en determinar cuáles pruebas y como se deben realizar para obtener datos que al analizarlos estadísticamente se obtengan conclusiones y decisiones que deriven en mejoras del desempeño del proceso. Adicionalmente describe el diseño de experimentos como la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso por medio de una herramienta fundamentada en un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten la máxima eficiencia de los procesos con un mínimo costo.

El diseño experimental puede ser visto simplemente como un método para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Más precisamente, puede ser definido como realización de un conjunto de pruebas en las cuales se realizan cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, para observar e identificar las razones de los cambios en la variable de salida o respuesta del proceso [20]

Para explicar el tratamiento del experimento se siguió la metodología definida por Montgomery, la cual contiene las siguientes pautas para diseñar experimentos:

1. **Identificación y enunciación del problema:** En la revisión del estado del arte se identificó que el problema a abordar es identificar los pares coordinados de amperaje/voltaje para los cuales se da cada uno de los modos de transferencia de metal identificados en el proceso GMAW. Las variables de este proceso han sido estudiadas de manera previa, por lo cual no se tratará como un experimento de tamizado; sin embargo, hay una innovación referente al material de aporte a estudiar.

Se identificó que existen una cantidad de variables que podrían estudiarse para verificar la influencia que tienen sobre el proceso; sin embargo, se optó por seleccionar las más representativas. Se disminuyó la variabilidad de muchas otras realizando un montaje, en el Laboratorio de Soldadura de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, que permite fijar la posición de la pistola de soldadura respecto a la pieza de trabajo y adicionalmente la velocidad de aplicación de la soldadura. Así se tiene restringida la variabilidad que puede tenerse en el ensayo debido al operario, la máquina será semiautomática.

2. **Elección de los factores y los niveles:** Montgmomery establece la existencia de factores del diseño, factores constante y factores a los que se les permite variar. Los factores de diseño son aquellos que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constante son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico. Para este caso en particular se tiene entonces la siguiente definiciones de factores y niveles:

2.1 De acuerdo a la revisión de la literatura, los parámetros que influyen el proceso para el levantamiento del mapa de modo de transferencia son:

- Voltaje del arco.
- Voltaje de la fuente.
- Corriente del arco.
- Tipo de gas de protección.

Procedimiento Experimental

- Flujo del gas de protección.
- Diámetro del electrodo.
- Velocidad de avance.
- Velocidad de alimentación del electrodo.
- Extensión del electrodo.
- Distancia del tubo de contacto al material base.
- Tiempo del arco.
- Material base.

Dentro de los cuales se identificaron como factores que se mantienen constantes:

- Flujo de gas de protección.
- Diámetro del electrodo.
- Velocidad de avance
- Extensión del electrodo.
- Distancia del tubo de contacto al material base.

Los factores a los cuales se les permite variar son:

- Tiempo del arco
- Material base

Respecto al tiempo del arco, se tiene que hubo un período de descarte de dos segundos de duración, que es el tiempo que tarda el arco para estabilizarse, el sistema de adquisición de datos está programado para tomar muestras de 10 segundos de duración pero si se disminuye o se excede este tiempo no se generarán alteraciones en el mismo.

Procedimiento Experimental

El material base fue ASTM A36 en 3/8" de espesor, en la medida de lo posible extraído del mismo lote para disminuir la variabilidad.

El gas de protección seleccionados fue Agamix 12 (98 %Ar + 2 %O₂), se aclara que el cambio del gas sería el trato de un mapa de modo de transferencia diferente debido a la dependencia directa que genera con la transferencia de masa.

Durante la revisión del estado del arte fue recurrente el hecho que los modos de transferencia de metal están directamente relacionados con los valores de voltaje y amperaje en el tiempo. Adicionalmente, se estableció que una de las metodologías para reconocer el modo de transferencia de metal es estudiar el comportamiento de las señales eléctricas, por ello se tiene que las variables cuantitativas de salida serán el voltaje y el amperaje en el tiempo.

Fue posible establecer entonces que las variables de diseño serán:

- Velocidad de alimentación del electrodo.
- Voltaje de la fuente.

Por su parte las variables de entrada del experimento serán la velocidad de alimentación del electrodo y el voltaje de la fuente, esto considerando que la fuente de potencia a utilizar será de voltaje constante y posee las características descritas más adelante.

A fin de garantizar el control de los factores que se requieren constantes y de la posibilidad de modificar los que se requieren variables se realizó una adaptación sobre el montaje del equipo de soldadura y la fuente de alimentación, los detalles se describen a continuación:

Procedimiento Experimental

- Se fijo la fuente de alimentación y la pistola de soldadura en una sola posición y lo que se desplazaba era el material base. De esta manera era posible mantener constante la distancia del electrodo al material base, la velocidad de avance y operar el equipo con rapidez ya que se operaba de un suiche de encendido y apagado.
- La fuente de alimentación permitía regular la velocidad de alimentación del electrodo antes de iniciar el arco.
- Se instaló una cinta métrica en donde se demarcaban los puntos de deposito de soldadura y las zonas libres a fin de regular los tiempos de arco.

En la figura 24 a se muestra el sistema coordinado para la medición del avance, en la figura 24 b se muestra el montaje del sistema de alimentación y la pistola de soldadura respecto al material base y en la figura 24c se muestra el montaje para la aplicación de soldadura y el sistema de adquisición de datos.

Figura 24a. Sistema de medición del avance



Figura 24b. Montaje del sistema de alimentación y el material base

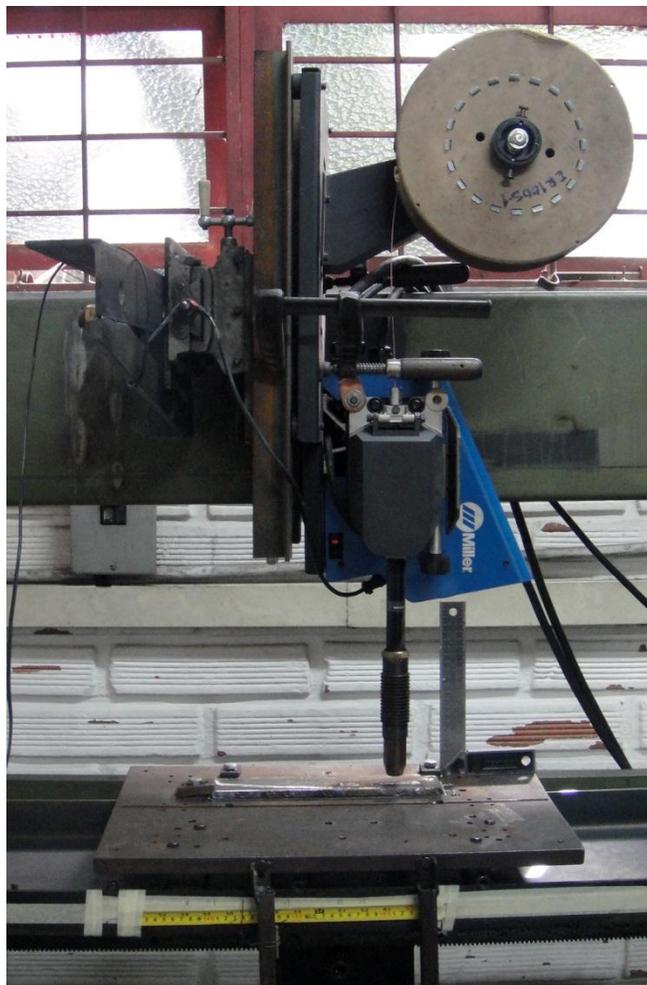
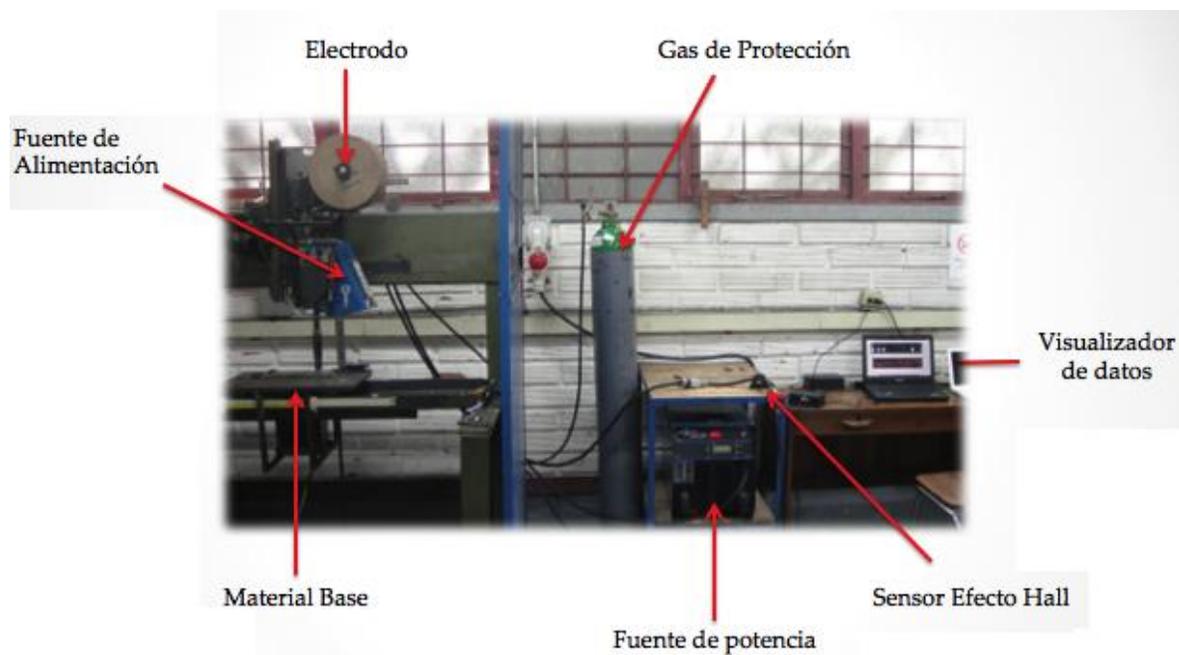
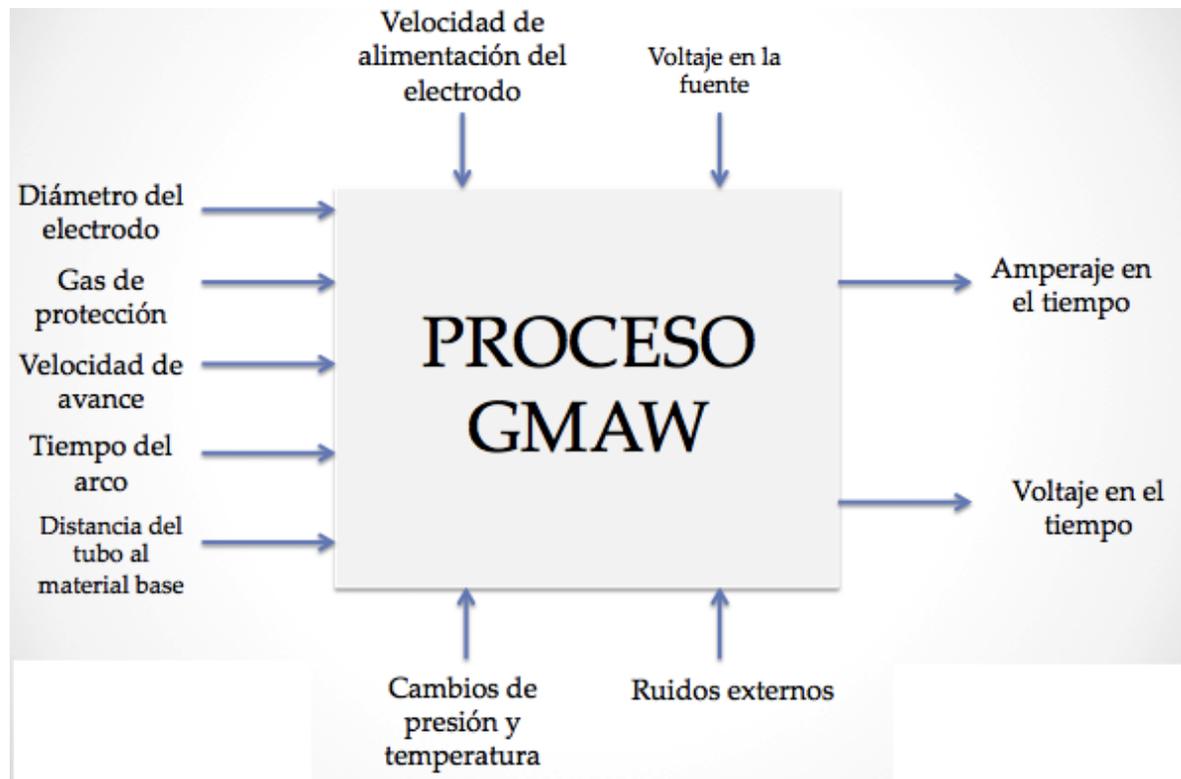


Figura 24c. Montaje real utilizado.



De esta manera se tiene que el diagrama para el análisis de experimento sería:

Figura 25. Esquema del proceso



Las variables de ruido para este experimento son:

- El viento
- Los cambios de presión y temperatura del ambiente
- Los ruidos del ambiente

Para disminuir los efectos de los ruidos se realizó un aislamiento del sistema de adquisición de datos introduciéndolo en una caja acrílica.

Niveles para los factores de diseño:

En este punto es importante aclarar que entre más niveles se estudien mejor será el ajuste del experimento; sin embargo se establecieron niveles intermedios para el estudio. Así que se tomará un diseño de dos factores cada uno de ellos con 5 niveles; los factores a estudiar son: velocidad de alimentación del alambre y voltaje de la fuente. El voltaje de la fuente se variará en 16 V, 18 V, 20 V, 22 V, 24 V, 26 V, 28 V. La velocidad de alimentación del electrodo se estudiará en 51 ipm, 102 ipm, 153 ipm, 178 ipm y 229 ipm, siendo ipm pulgadas por minuto.

3. **Selección de la variable respuesta:** De acuerdo a lo revisado en el punto 2 se tiene que las variables respuesta serán las señales de voltaje y amperaje en el tiempo. Con estas variables será posible identificar la forma de la transferencia de masa.
4. **Elección del diseño experimental:** De acuerdo a los diseños experimentales existentes y clasificados por Montgomery [20]. Se tiene que el modelo que mejor se ajusta es un diseño factorial de dos factores y dos variables respuesta. Para el tratamiento del experimento se realizarán los siguientes pasos:
 - 4.1 Definir el número de réplicas del experimento (no inferior a 2)
 - 4.2 Aleatorizar las corridas.
 - 4.3 Enunciar el modelo estadístico, supuestos y restricciones, el nivel de significancia de las pruebas y las pruebas de hipótesis de interés.
 - 4.4 Realizar el análisis ANOVA.
 - 4.5 Realizar la prueba Tukey de comparación entre medias. Los pasos 4.4. y 4.5 permitirán emitir conclusiones sobre las hipótesis.
 - 4.6 Enunciar y comprobar los supuestos del modelo.
 - 4.7 Conclusiones.

A fin de realizar estos pasos se hizo una primera corrida experimental y posteriormente se ajustó el diseño para realizar las corridas completas.

Para el experimento se realizó una réplica, a fin de evitar alteraciones internas en el experimento se aleatorizó el experimento. El orden de las corridas aleatorizado y los promedios de los valores de voltaje y amperaje registrados para cada una de las corridas

por medio del sistema de adquisición de datos se muestra en la tabla 3. Estos datos fueron utilizados para correr el modelo estadístico.

Tabla 3. Datos para el modelo estadístico.

ORDEN ALEATORIZADO	NIVEL VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN	NIVEL DEL VOLTAJE	V PROMEDIO	I PROMEDIO
42	1	1	21,7	114,9
90	1	2	30,7	137,9
71	1	3	33,4	148,4
4	1	4	23,9	69,3
75	1	5	28,3	140,1
47	1	6	23,7	116,8
11	1	7	18,5	39,9
77	1	1	26,1	62,6
35	1	2	19,5	112,1
26	1	3	23,6	162,0
81	2	4	31,9	48,1
84	2	5	28,0	159,5
1	2	6	20,5	173,7
72	2	7	23,3	170,3
8	2	1	40,8	47,9
78	2	2	30,2	58,0
48	2	3	21,7	112,6
39	2	4	15,2	142,3
28	2	5	18,8	151,5
74	3	6	19,4	110,3

Procedimiento Experimental

27	3	7	20,6	154,3
87	3	1	32,1	101,1
19	3	2	29,4	52,4
80	3	3	19,5	112,1
89	3	4	29,2	105,6
66	3	5	20,1	145,6
70	3	6	28,6	155,7
57	3	7	22,2	53,3
83	4	1	21,0	40,1
64	4	2	22,4	103,6
85	4	3	13,2	55,5
41	4	4	13,2	161,4
60	4	5	32,9	165,8
55	4	6	28,0	158,0
62	4	7	13,2	173,4
57	5	1	13,2	204,4
64	5	2	13,2	206,6
54	5	3	33,0	167,7
52	5	4	30,4	166,0
69	5	5	31,4	222,1
65	5	6	20,7	199,9
58	5	7	13,2	204,2
59	5	1	13,2	175,1
61	5	2	13,2	219,7
56	5	3	31,4	222,4

Procedimiento Experimental

63	5	4	13,2	178,3
71	5	5	13,1	51,8
81	5	6	13,1	110,4
91	5	7	17,9	50,9
87	5	1	15,1	147,9
83	5	2	13,1	51,9
75	1	1	16,1	109,5
77	2	2	16,0	111,5
84	3	1	16,7	150,3
80	4	2	15,9	183,5
88	5	1	14,9	156,5
73	1	2	18,1	106,0
76	2	1	13,0	201,3
89	3	2	18,1	106,5
85	4	1	13,4	133,1
90	5	2	16,0	152,0
78	1	1	16,6	163,1
86	2	2	16,7	164,2
74	3	1	16,7	166,4
79	4	2	20,4	49,7

En la tabla 3 se uso la siguiente nomenclatura.

Tabla 4. Nomenclatura utilizada para los datos del experimento.

Nivel del	Valor del	Nivel de la velocidad	Valor de la velocidad
-----------	-----------	-----------------------	-----------------------

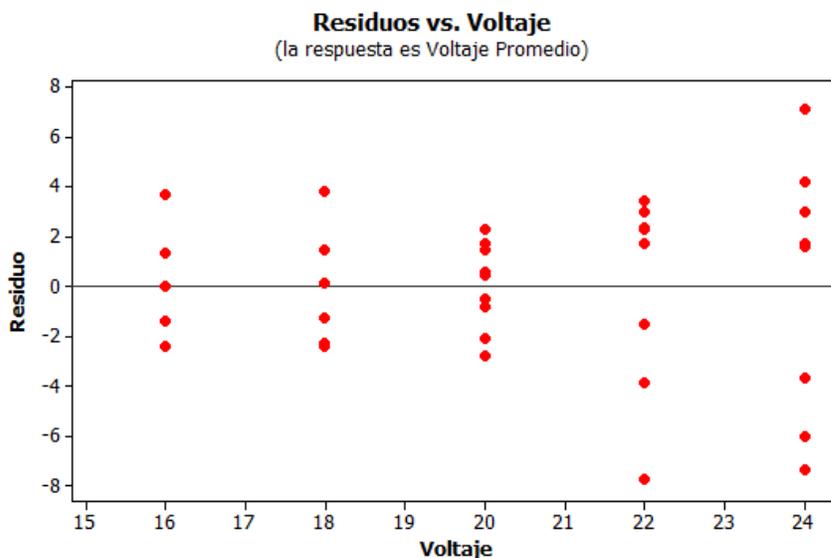
voltaje	voltaje [V]	de alimentación	de alimentación [IPM]
1	16	1	51
2	18	2	102
3	20	3	153
4	22	4	178
5	24	5	229
6	26	--	--
7	28	--	--

Una vez obtenidos los datos se procesaron mediante el software estadístico Minitab® y se obtuvieron los siguientes resultados.

6.2.1 Diseño estadístico para el voltaje.

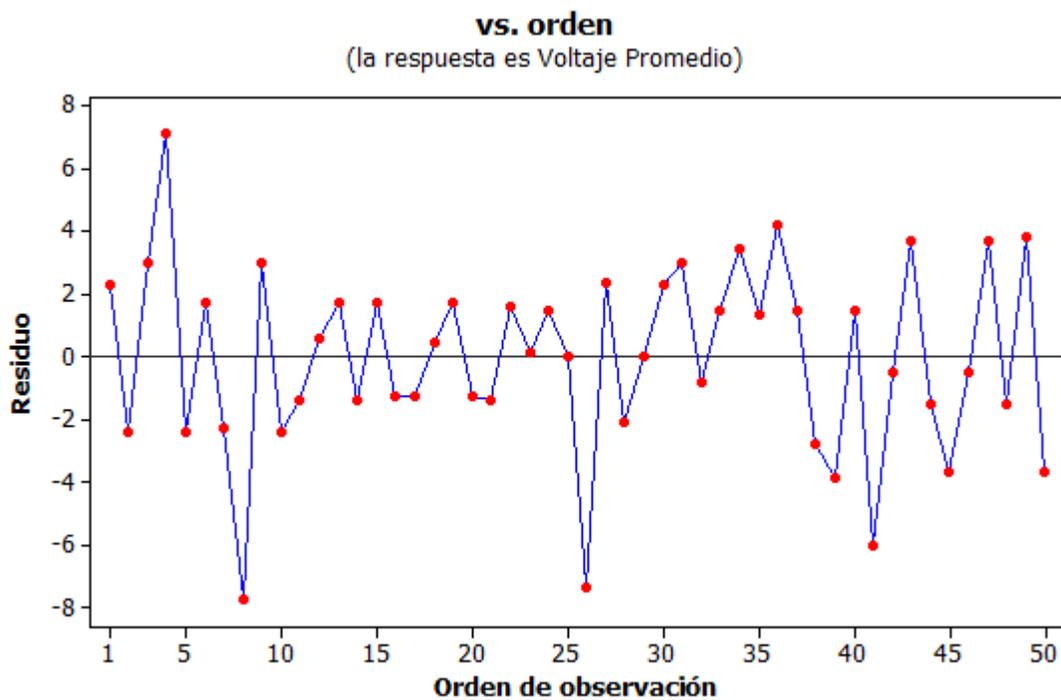
En principio se corrió el diseño para el voltaje sin realizar variaciones en la variable respuesta. A continuación se muestran los resultados gráficos obtenidos. Con ello se quiere verificar que se cumplan los supuestos de homogeneidad, aleatorización y normalidad:

Figura 26. Gráfica de los residuos para el voltaje promedio.

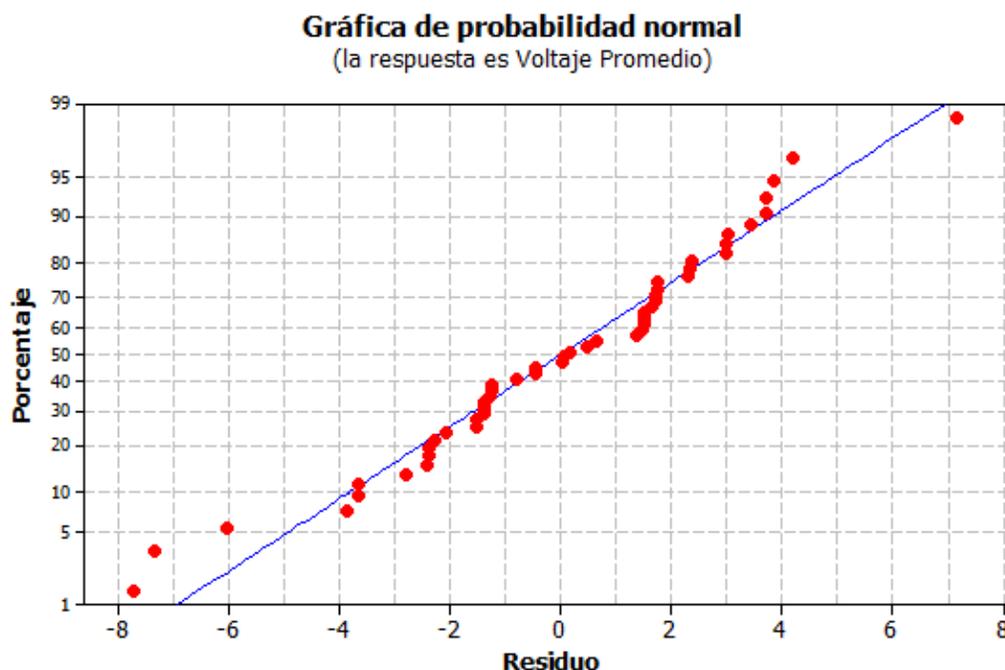


De la figura 26 se puede observar que los factores están relacionados de una forma lineal pero no hay patrones de relación por lo cual el supuesto de varianza homogénea se cumple.

Figura 27. Voltaje promedio vs. Orden.



En la figura 27 es posible observar una alta variabilidad en el orden de los factores lo cual lleva de manera implícita una adecuada aleatorización del experimento.

Figura 28. Distribución de normalidad para el voltaje promedio.

De la figura 28 se observa que los puntos se ajustan relativamente bien a la curva normal, se observan también algunos datos atípicos. Los datos cumplen con el supuesto de normalidad.

Para realizar un análisis detallado se muestra la tabla ANOVA en la cual se observa que el R^2 está en 81 % y el R^2 ajustado es 62,75% y los valores F y P son adecuados, el valor P es inferior a 0,05. Entre más cercano esté el R^2 ajustado del 80 % mejor será el modelo.

Tabla 5. ANOVA para la variable respuesta voltaje.**Modelo lineal general: Voltaje Promedio vs. Voltaje. Velocidad**

Factor	Tipo	Niveles	Valores
--------	------	---------	---------

Voltaje	fijo	5	16. 18. 20. 22. 24
---------	------	---	--------------------

Velocidad	fijo	5	51. 102. 153. 178. 229
-----------	------	---	------------------------

Análisis de varianza para Voltaje Promedio, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Voltaje	4	422,504	384,867	96,217	11,59	0,000
Velocidad	4	233,465	209,617	52,404	6,31	0,001
Voltaje*Velocidad	16	228,620	228,620	14,289	1,72	0,109
Error	25	207,552	207,552	8,302		
Total	49	1092,141				

S = 2,88133 R-cuad. = 81,00% R-cuad.(ajustado) = 62,75%

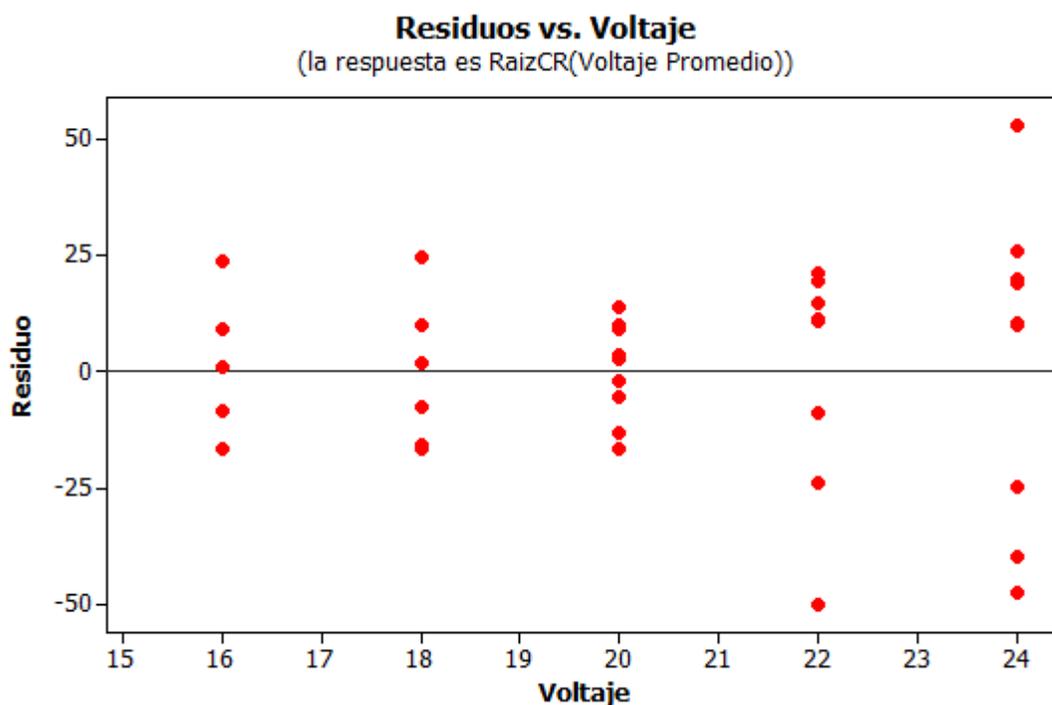
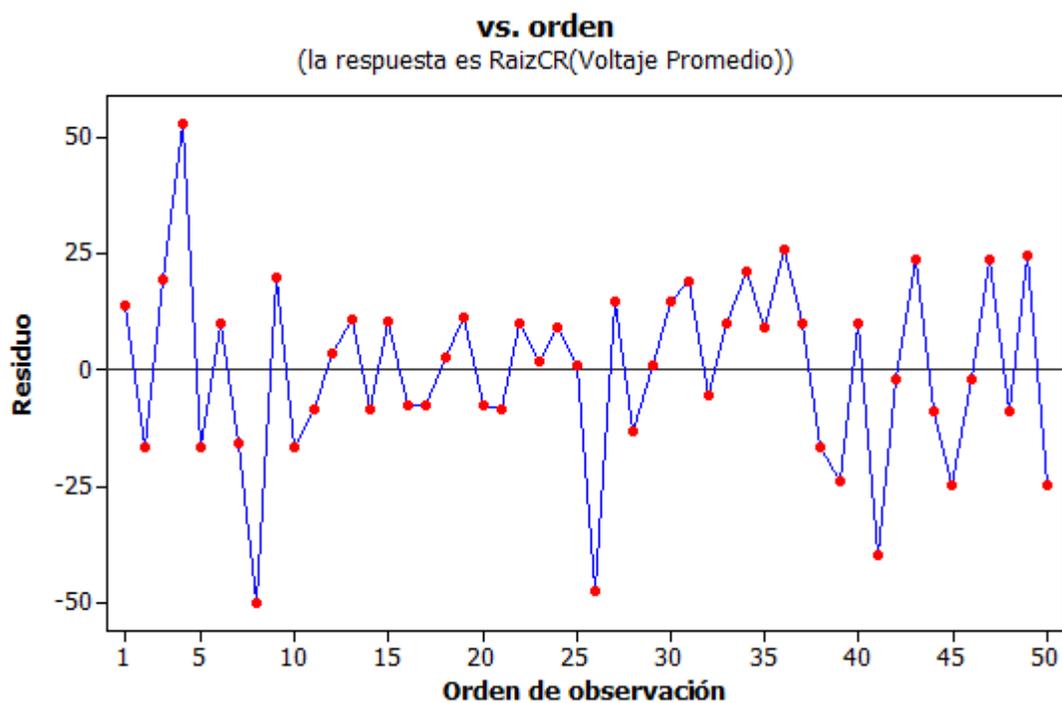
A fin de ajustar la varianza se realizaron una serie de transformaciones sobre la variable respuesta. Las transformaciones se realizaron de acuerdo a un orden recomendado por Montgomery.

Tabla 6. Transformaciones de variables recomendadas por Montgomery.

Relación entre σ_y y μ	α	$\lambda = 1 - \alpha$	Transformación
$\sigma_y \propto \text{Constante}$	0	1	Sin transformación
$\sigma_y \propto \mu^{1/2}$	1/2	1/2	Raíz Cuadrada
$\sigma_y \propto \mu$	1	0	Log
$\sigma_y \propto \mu^{3/2}$	3/2	-1/2	Raíz cuadrada recíproca
$\sigma_y \propto \mu$	2	-1	Recíproco

A continuación se muestra el análisis de las variables transformadas para las cuales se obtuvieron mejores resultados que los obtenidos con la variable original.

- Para la variable transformada bajo la raíz cuadrada recíproca:

Figura 29. Residuos vs voltaje para la variable ajustada para raíz cuadrada recíproca**Figura 30.** Voltaje vs. Orden para la variable ajustada para raíz cuadrada recíproca.**Figura 31.** Distribución normal de probabilidad para la variable voltaje ajustada con la función raíz cuadrada recíproca.

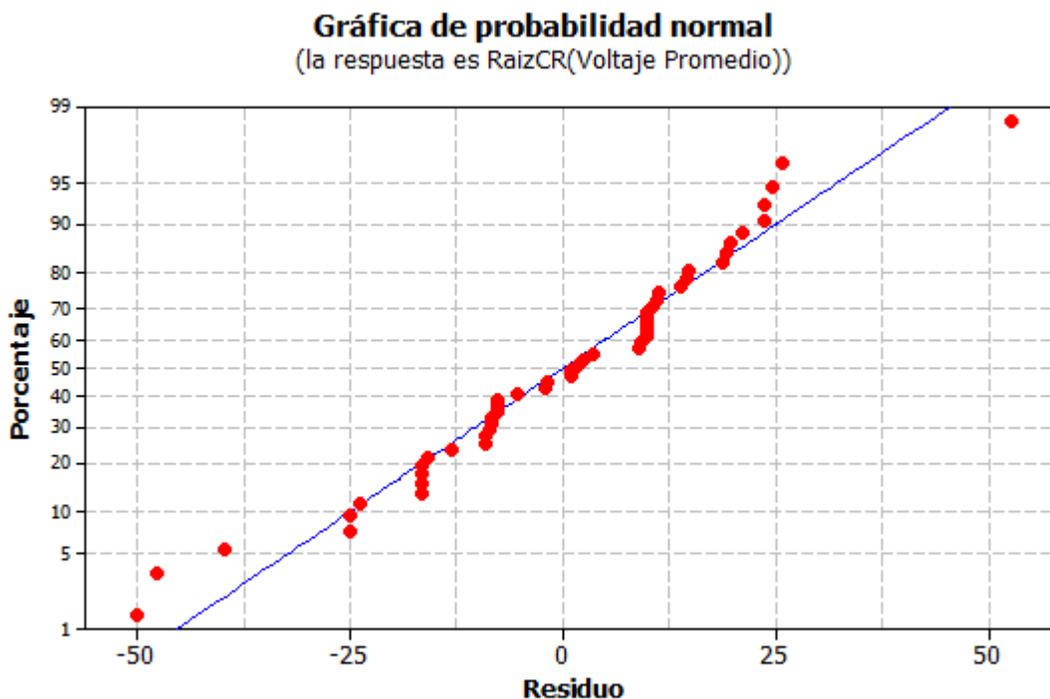


Tabla 7. Tabla ANOVA para la variable voltaje ajustada con la función raíz cuadrada recíproca.

Modelo lineal general: RC (Voltaje Promedio vs. Voltaje. Velocidad)

Factor Tipo Niveles Valores

Voltaje fijo 5 16. 18. 20. 22. 24

Velocidad fijo 5 51. 102. 153. 178. 229

Análisis de varianza para RaizCR(Voltaje Promedio), utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente GL SC sec. SC ajust. MC ajust. F P

Procedimiento Experimental

Voltaje	4	17561,0	16045,5	4011,4	11,65	0,000
Velocidad	4	9802,5	8803,8	2201,0	6,39	0,001
Voltaje*Velocidad	16	10018,6	10018,6	626,2	1,82	0,087
Error	25	8606,5	8606,5	344,3		
Total	49	45988,6				

S = 18,5543 R-cuad. = 81,29% R-cuad.(ajustado) = 63,32%

De las figuras 29 a 31 se pueden verificar el cumplimiento de los supuestos de varianza homogénea, aleatorización y normalidad. De la tabla ANOVA se observa una mejora en los valores de R^2 y R^2 ajustado.

En los modelos anteriores se consideraron las variables velocidad de alimentación, voltaje y la interacción entre ellas. A fin de mejorar la varianza se realizaron las corridas omitiendo las interacciones entre las variables respuesta. Para este caso se realizó el mismo procedimiento que para el caso anterior, considerando interacciones, y se obtuvo que el mejor ajuste se obtiene cuando se transforma la variable con la función $\log x$. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Figura 32. Residuos vs. Voltaje para la variable respuesta voltaje sin interacciones.

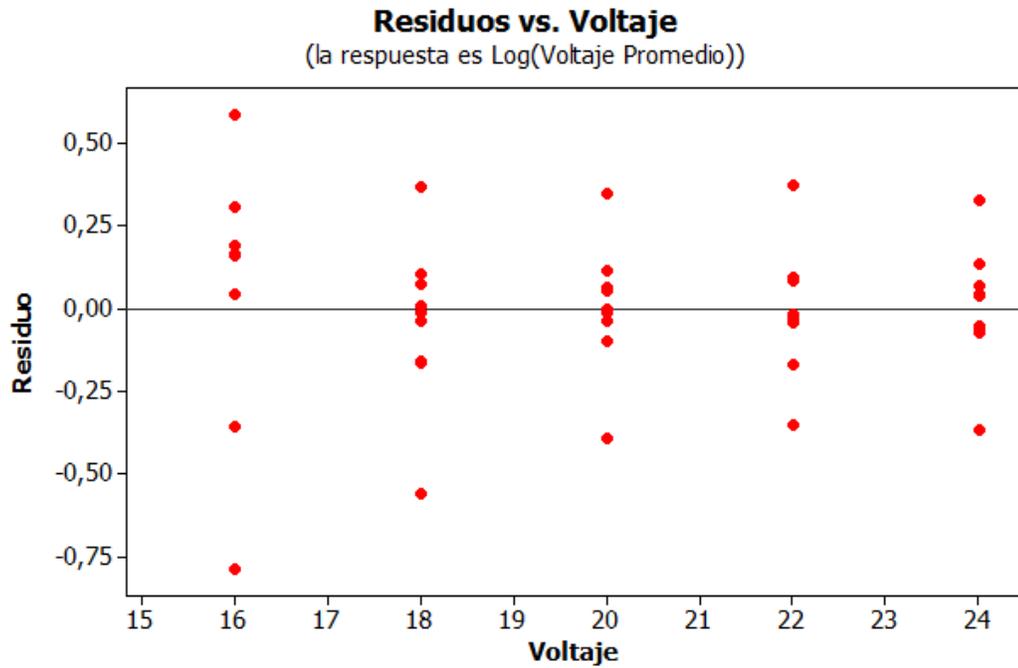


Figura 33. Voltaje vs. Orden para la variable respuesta voltaje sin interacciones.

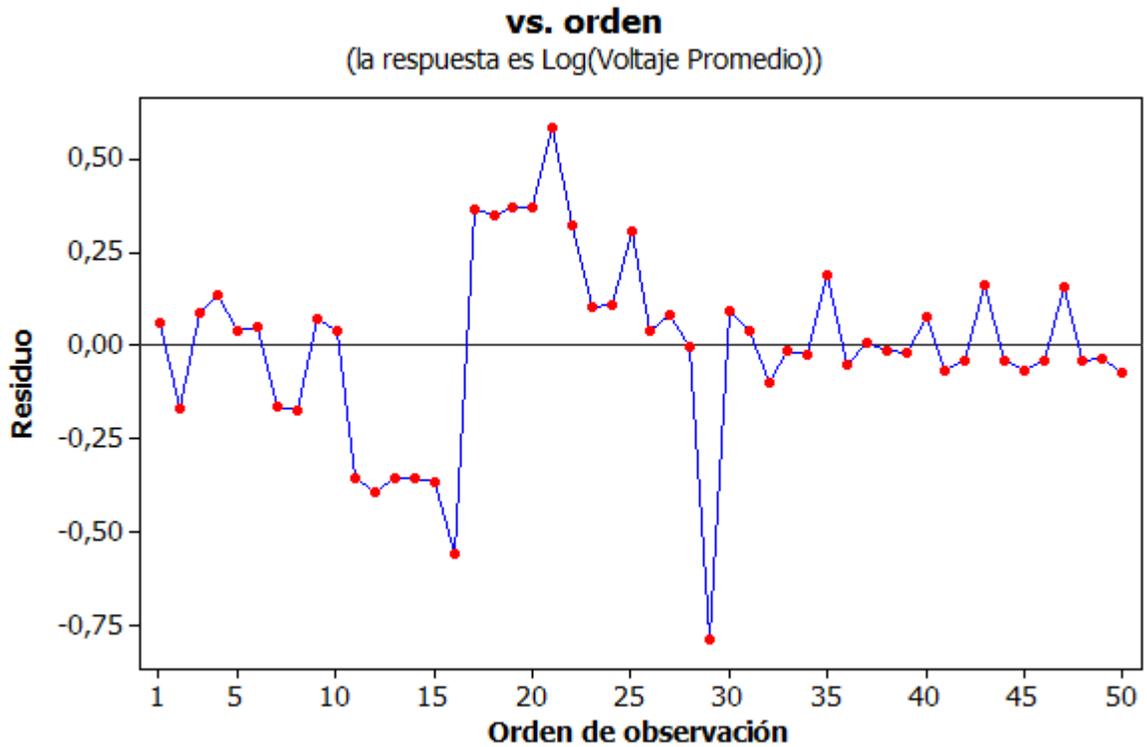


Figura 34. Distribución de normalidad para la variable respuesta voltaje sin interacciones.

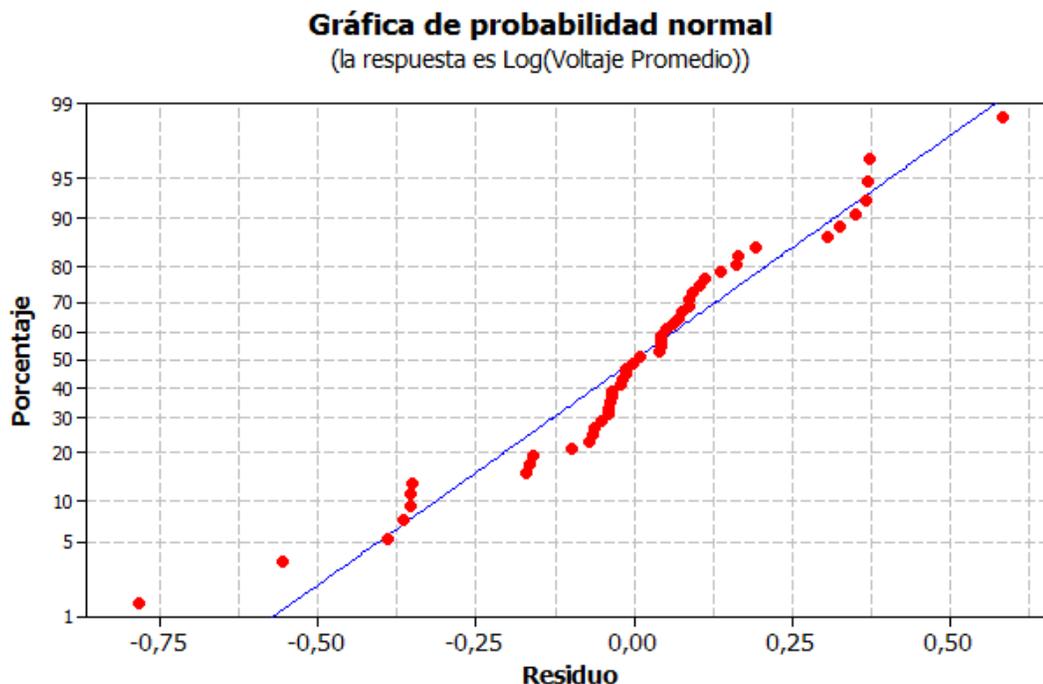


Tabla 8. Tabla ANOVA para la variable voltaje sin interacciones y ajustada con la función logaritmo.

Modelo lineal general: log (Voltaje Promedio vs. Voltaje. Velocidad)

Factor Tipo Niveles Valores

Voltaje fijo 5 16. 18. 20. 22. 24

Velocidad fijo 5 51. 102. 153. 178. 229

Análisis de varianza para Log(Voltaje Promedio), utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Voltaje	4	0,6485	0,4242	0,1060	1,47	0,228
Velocidad	4	7,7623	7,7623	1,9406	26,93	0,000
Error	41	2,9549	2,9549	0,0721		
Total	49	11,3658				

S = 0,268462 R-cuad. = 74,00% R-cuad.(ajustado) = 68,93%

De las figuras 32 a 34 se pueden verificar el cumplimiento de los supuestos de varianza homogénea, aleatorización y normalidad. De la tabla ANOVA se observa una mejora en los valores de R^2 y R^2 ajustado.

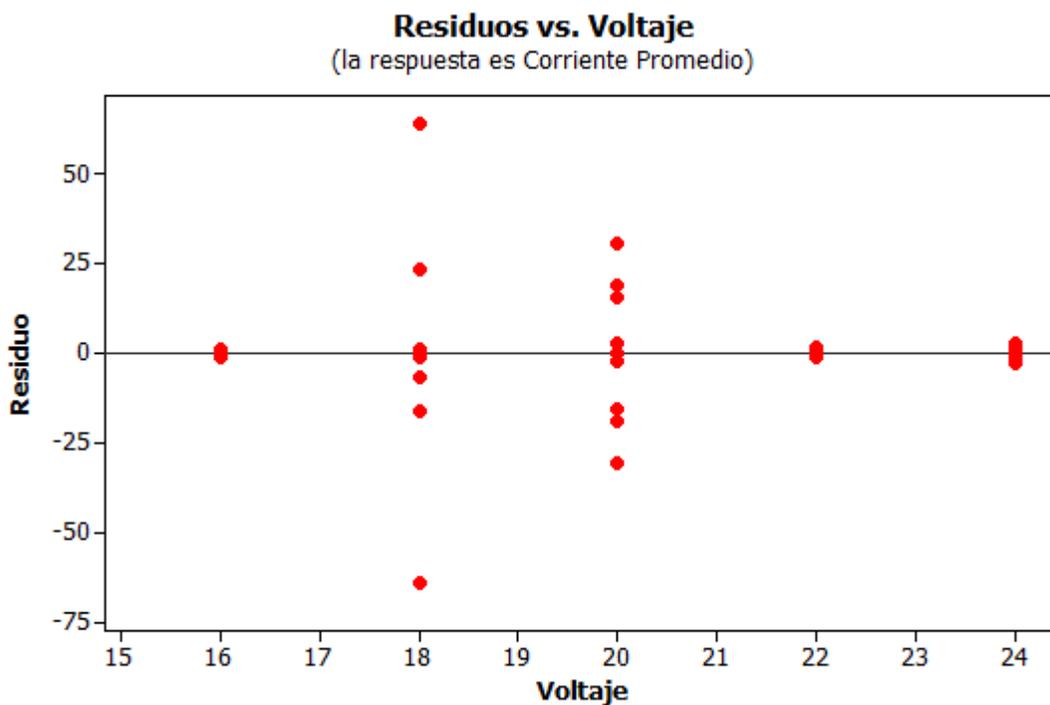
A continuación se realiza el análisis para la segunda variable respuesta, la corriente.

6.2.3 Diseño estadístico para la corriente

Inicialmente se trabajó con la variable en su forma original y se analiza la significancia de la variable.

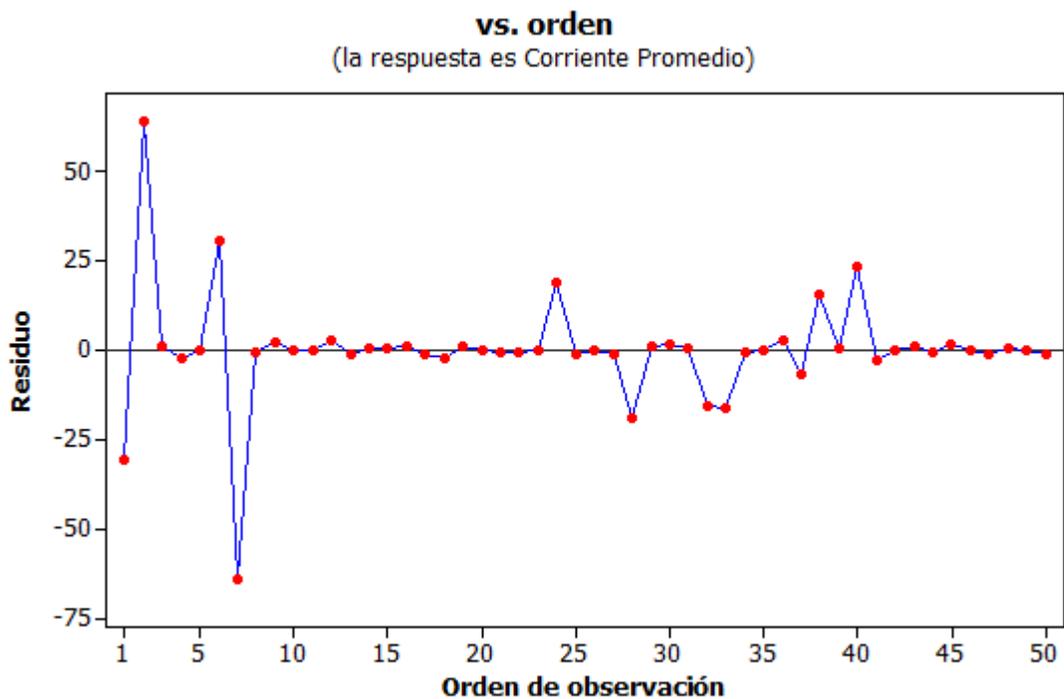
- Variable sin modificar

Figura 35. Residuos vs. Voltaje para la respuesta corriente.



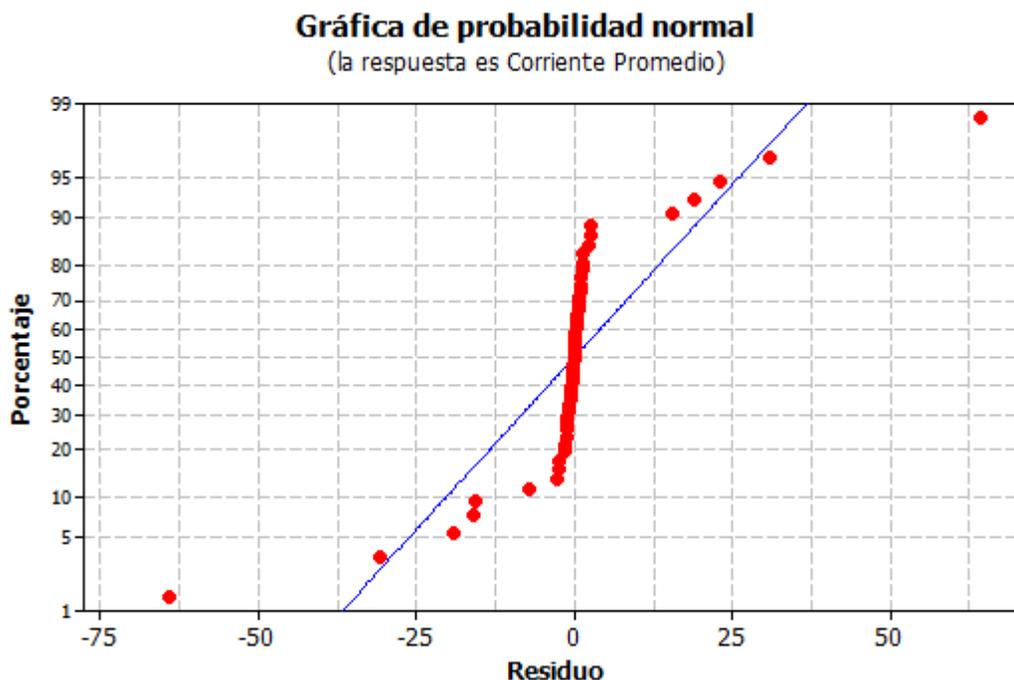
De la figura 35 se observa el cumplimiento de la varianza homogénea ya que no se observan patrones de relación.

Figura 36. Residuos vs orden de las corridas para la variable respuesta corriente



De la figura 36 se puede observar que no se cumple totalmente el supuesto de aleatoriedad debido a que muchos de los puntos están cercanos a la línea normal, esto se da porque algunos de los datos no pudieron correrse debido a la relación alto voltaje y baja velocidad de alimentación. Sin embargo la gráfica muestra aleatoriedad en algunos puntos, tal como se esperaba.

Figura 37. Normalidad para la variable respuesta corriente.



De la figura 37 se observa una tendencia de agrupamiento de los puntos lo cual obedece a los problemas de aleatorización del experimento.

Tabla 9. Tabla ANOVA para la variable respuesta corriente en su forma original.

Modelo lineal general: log (Voltaje Promedio vs. Voltaje. Velocidad)

Factor Tipo Niveles Valores

Voltaje fijo 5 16. 18. 20. 22. 24

Velocidad fijo 5 51. 102. 153. 178. 229

Análisis de varianza para Corriente Promedio, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Voltaje	4	1405,9	1396,1	349,0	0,71	0,590
Velocidad	4	108527,3	101913,8	25478,5	52,10	0,000
Voltaje*Velocidad	16	5732,3	5732,3	358,3	0,73	0,738

Procedimiento Experimental

Error	25	12224,6	12224,6	489,0
-------	----	---------	---------	-------

Total	49	127890,1		
-------	----	----------	--	--

S = 22,1130 R-cuad. = 90,44% R-cuad.(ajustado) = 81,27%

Para la corriente sin modificación se obtiene un R^2 ajustado adecuado y el factor p da una significancia para el experimento por lo cual la variable de respuesta corriente es significativa.

7. Obtención del mapa de modo de transferencia

A este punto se tienen varios elementos teóricos y experimentales para la obtención del mapa de modo de transferencia, como se mencionó anteriormente se utilizará el método de análisis sobre las señales a fin de clasificar la forma de la transferencia. Al realizar las corridas arrojadas por el diseño de experimento y con el sistema de adquisición de datos se obtuvo cada una de las señales para voltaje y amperaje y de ellas se obtuvieron los datos de voltaje y corriente para cada 0,002 segundos muestreando un total de 10s. Estos datos fueron procesados utilizando Excel y Matlab a fin de obtener patrones de comportamiento tales como el valor promedio, el valor RMS del voltaje y de la corriente y la transformada rápida de Fourier. El objetivo de este procesamiento es conocer el comportamiento de cada una de las ondas de voltaje y corriente a fin de realizar una clasificación de cada señal y con base a una referencia obtenida de la literatura conocida seleccionar el modo de transferencia apreciable.

Para realizar los ensayos se procedió siguiendo los pasos que se describen:

7.1 Diseño de la junta

Las probetas de soldadura se diseñaron considerando:

- Un espesor de placa adecuado ya que se manejarían altas corrientes y voltajes para algunas de las corridas, por lo cual se utilizó una placa de 3/8" de espesor.
- Una optimización del espacio: en total se requerían 50 soldaduras y sus réplicas, considerando que el tiempo de grabación útil del sistema de adquisición de datos es de 10 s se calculó que en este tiempo se obtienen 25 mm de soldadura por lo cual los cordones fueron hechos de esta longitud.
- Se dejaron zonas de descarte para el caso en que se decidiera o requiera hacer algún tipo de prueba mecánica.

Considerando lo anterior se diseñaron las probetas mostradas en la figura 38.

Figura 38. Cupón de Soldadura

Zona de descarte (10mm)						
Zona de desc. (30mm)	Zona de soldadura (3")	Zona libre (1")	Zona de soldadura (3")	Zona libre (1")	Zona de soldadura (3")	Zona de desc. (30mm)
Zona de descarte (10mm)						

7.2 Calibración del sistema de adquisición de datos y caracterización de las señales

Para realizar las corridas fue necesario garantizar que el sistema de adquisición de datos estuviera calibrado y diera resultados coherentes. Es por ello que se realizó un análisis de dominio en la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier lo cual permite obtener la frecuencia representativa de cada señal, que a su vez representa la frecuencia de desprendimiento y con ello se podrá analizar la estabilidad del arco.

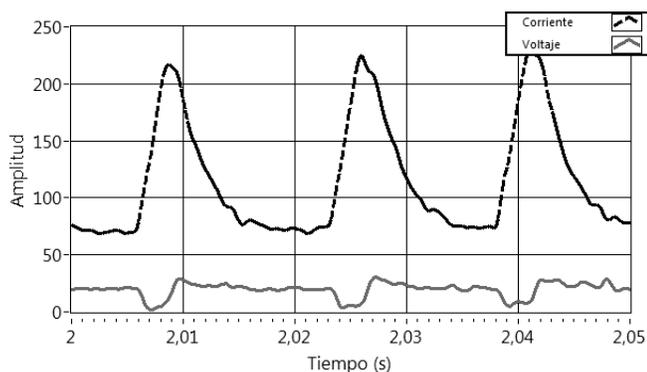
Para ello se utilizó electrodo ER70S6 con gas de protección 98 %Ar + 2 %O₂. La idea era replicar un patrón de referencia estudiado por Quintino [11] y verificar que las gráficas de señales eléctricas fueran coherentes con las señales conocidas para corto circuito, transferencia por aspersion y globular.

El análisis de las señales se hizo utilizando PDA (Presento/Analizo/Observo).

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

En la figura 39 se presenta la variación de la corriente y el voltaje en el tiempo para el modo de transferencia por cortocircuito utilizando electrodo ER70S6 y gas de protección 98%Ar + 2% O₂.

Figura 39. Señal de corriente y voltaje para el electrodo ER70S6 en cortocircuito



Allí se puede observar lo siguiente:

- La señal adquirida es periódica.
- Cuando el voltaje cae a cero la corriente se eleva a más del doble de su valor nominal, en este instante el metal fundido es depositado en el charco de soldadura terminándose el corto circuito y formando de nuevo el arco eléctrico, tanto la corriente como el voltaje vuelven a sus valores nominales, comenzando de nuevo el ciclo de formación de la gota en la punta del electrodo.

Y se obtienen las siguientes conclusiones:

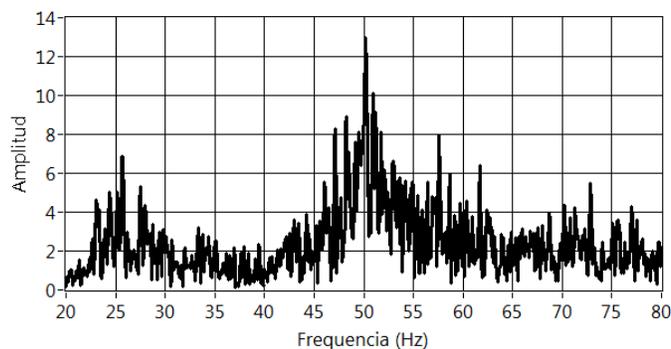
- Los períodos de tiempo para los cuales la corriente y el voltaje tienen mínimos relativos son parcialmente iguales en cada repetición de los periodos. Hay algunas ocasiones en que estos tiempos pueden prolongarse pero se consideran más como una inestabilidad de la señal.
- Cada aumento en de la corriente corresponde a una caída en el voltaje.

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

- En los periodos para los cuales no hay extinción del arco la señal tiende a estabilizarse en valores muy cercanos al voltaje de entrada de la fuente; esto mismo ocurre con la señal de corriente.
- Por medio del aporte de calor debido al flujo de la corriente a través del electrodo, se funde una gota de metal en la punta del mismo, la longitud del arco eléctrico se empieza a reducir, este comportamiento se aprecia en la disminución del voltaje y el aumento en la corriente, hasta el instante en que el electrodo toca el charco de soldadura provocando el corto circuito.

Se procedió a hallar la transformada rápida de Fourier (FFT) y se obtuvo:

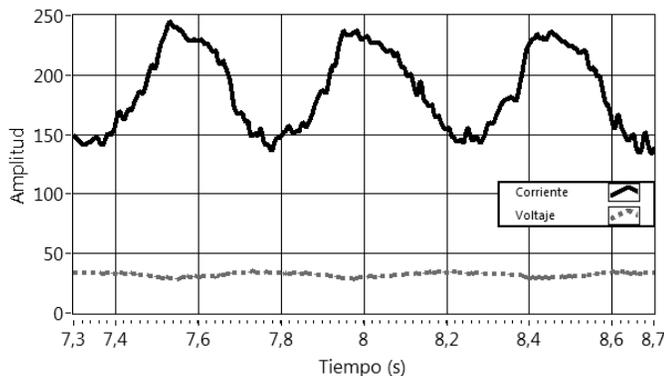
Figura 40. Transformada rápida de Fourier para el modo de transferencia por Corto circuito



De la figura 40 se aprecia que la señal tiene una frecuencia representativa cercana a los 50Hz, si se toma como un periodo el intervalo entre dos cortos, una frecuencia de 50Hz de la señal se puede interpretar como 50 cortos por segundo, esta interpretación y resultados concuerda con lo reportado por Soderstrom [7] y Pires [11]. Se puede apreciar una frecuencia representativa cercana a los 25Hz, mostrando que durante el tiempo de aplicación también hubo transferencia de metal a esta frecuencia, lo cual se puede interpretar como una inestabilidad.

En la figura 41 se muestran las señales obtenidas para el modo de transferencia globular

Figura 41. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER70S6 para transferencia globular



De esta figura se observa lo siguiente:

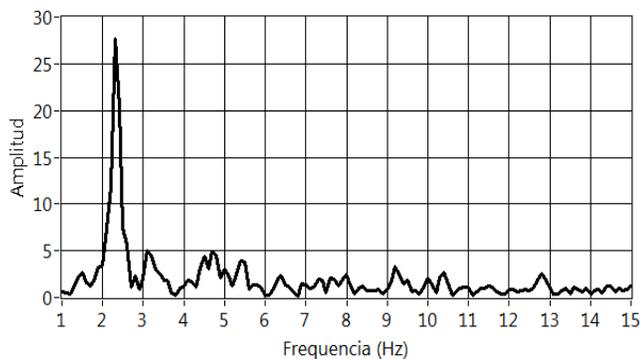
- La señal de corriente tiene un comportamiento sinusoidal mientras que la señal de voltaje tiene un comportamiento de tendencia lineal.
- La onda de la corriente tiene una amplitud mayor a la onda del voltaje.
- Cuando hay máximos en la corriente hay mínimos en el voltaje y recíprocamente ocurre lo mismo.

Y se obtienen las siguientes conclusiones:

- Siempre existe un arco eléctrico, por lo tanto las variaciones en los niveles de corriente, y voltaje especialmente, son menores que en corto circuito.
- La variación en ambas señales se debe a la formación y desprendimiento de la gota de metal líquido y a la trayectoria que esta tiene a lo largo del arco eléctrico.

La transformada rápida de Fourier se muestra en la figura 42.

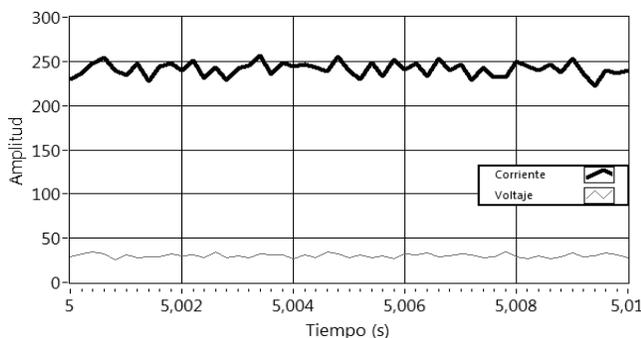
Figura 42. Transformada rápida de Fourier para el modo de transferencia globular



Se observa que la frecuencia representativa se encuentra cercana a 2 Hz, lo cual sería 2 gotas por segundo, esto es coherente con el hecho que se desprenden gotas de mayor diámetro que requieren de mayor tiempo para formarse. La frecuencia de desprendimiento se puede aumentar o disminuir variando los valores de corriente y voltaje, el diámetro y tipo de electrodo y el gas protector empleado. La figura 42 permite comprobar una transferencia estable durante el tiempo de aplicación.

En la figura 43 se muestran la señal de voltaje y corriente para la transferencia por aspersion del electrodo ER70S6 aplicado con gas de protección 98%Ar + 2% O₂.

Figura 43. Señales de voltaje y corriente para el electrodo ER70S6 para transferencia por aspersion



De estas gráficas se observa lo siguiente:

- Los cambios de valores bajos a altos, tanto para la señal de corriente como de voltaje, son instantáneos tanto así que no se identifican muchos patrones debido a la velocidad con que varía las señales.
- En ambas gráficas se observan caídas puntales del voltaje y de la corriente aunque en general, las señales mantienen la misma tendencia y se desplazan en el mismo rango de amplitud.
- Se distingue claramente una variación menor en los valores pico a pico de ambas señales

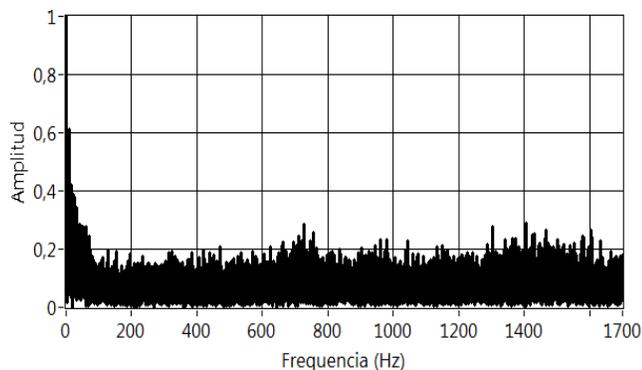
Y se obtienen las siguientes conclusiones:

- Aunque ambas señales tienen amplitud, tienden a estabilizarse en un valor constante; esto conversa con la estabilidad del arco presente en la transferencia por aspersión.
- El comportamiento de las señales se debe a la formación y desprendimiento de varias gotas de metal fundido en cada instante, según Soderstrom y otros autores [7] se tiene una frecuencia de desprendimiento de hasta 400 gotas por segundo.

La transformada rápida de Fourier para la transferencia por aspersión se muestra en la figura 44.

Figura 44. Transformada rápida de Fourier para la transferencia por aspersión.

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia



En esta gráfica no se observan picos, esto era de esperarse ya que la tendencia de ambas señales es lineal con ciertas distorsiones.

Teniendo estos referente de comparación se procedió a correr el experimento utilizando el los siguientes parámetros de soldadura:

- Material Base: ASTM A36
- Espesor del material base: 3/8"
- Material de aporte: ER70S1
- Diámetro del electrodo: 1,2 mm
- Gas de protección: 98 % Ar + 2 % O₂
- Temperatura de precalentamiento: N/A
- Posición de soldadura: Plana
- Técnica de soldadura: Cordonde rectos, sin oscilación y limpieza con pulido mecánico
- Stick out: 16 mm
- Flujo de gas: 10 LPM.

En la tabla 10 se puede observar el valor de la velocidad de alimentación y del voltaje ingresados a la fuente de soldadura; para la gráfica de los puntos de Corriente Vs. Voltaje se calculará el valor RMS. Esto se muestra en la tabla 6:

Tabla 10. Voltaje y Corriente RMS para las corridas

ORDEN ALEATORIZADO	I RMS	V RMS
42	127,5	24,1
90	153,1	34,1
71	164,7	37,1
4	76,9	26,6
75	155,5	31,5
47	129,6	26,3
11	44,3	20,5
77	69,4	29,0
35	124,4	21,6
26	179,9	26,2
81	53,3	35,4
84	177,1	31,0
1	192,8	22,7
72	189,1	25,9
8	53,1	45,3
78	64,4	33,6
48	125,0	24,0
39	157,9	16,8
28	168,2	20,9
74	122,4	21,5
27	171,2	22,9
87	112,3	35,6
19	58,2	32,6
80	124,4	21,6

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

89	117,2	32,4
66	161,6	22,3
70	172,8	31,7
57	59,2	24,6
83	44,5	23,4
64	115,0	24,9
85	61,7	14,7
41	179,1	14,7
60	184,1	36,5
55	175,4	31,1
62	192,5	14,6
57	226,8	14,6
64	229,3	14,6
54	186,1	36,7
52	184,3	33,7
69	246,6	34,9
65	221,9	23,0
58	226,7	14,6
59	194,3	14,6
61	243,8	14,6
56	246,9	34,8
63	197,9	14,6
71	57,5	14,5
81	122,5	14,5
91	56,6	19,8
87	164,2	16,8
83	57,6	14,5
75	121,5	17,9

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

77	123,8	17,8
84	166,8	18,5
80	203,7	17,6
88	173,7	16,6
73	117,6	20,1
76	223,4	14,4
89	118,2	20,1
85	147,7	14,9
90	168,7	17,8
78	181,1	18,4
86	182,3	18,5
74	184,7	18,5
79	55,2	22,7

Debido a que la teoría indica que la transferencia por aspersion ocurre en altos voltajes, se consideró necesario realizar algunas corridas para valores altos de voltaje; se corrió inicialmente el experimento para voltajes cercanos a los 30 V pero se obtenía fusión del tubo de contacto como se muestra en la figura 45; es por esto que se aumentó la distancia del tubo de contacto al material base a fin de permitir una mayor longitud del arco.

Figura 45. Fusión de los



tubos de contacto

Es importante aclarar que estos puntos no se consideraron dentro del diseño de experimentos porque, como se dijo anteriormente, se varió la distancia del tubo de contacto al material base y por ende se variaron las variables experimentales; sin embargo era necesario conocer estos comportamientos para los fines investigativos de este trabajo.

En la Tabla 11 se muestran los parámetros eléctricos utilizados y las gráficas obtenidas se encuentran en el Anexo A.

Tabla 11. Parámetros eléctricos adicionales

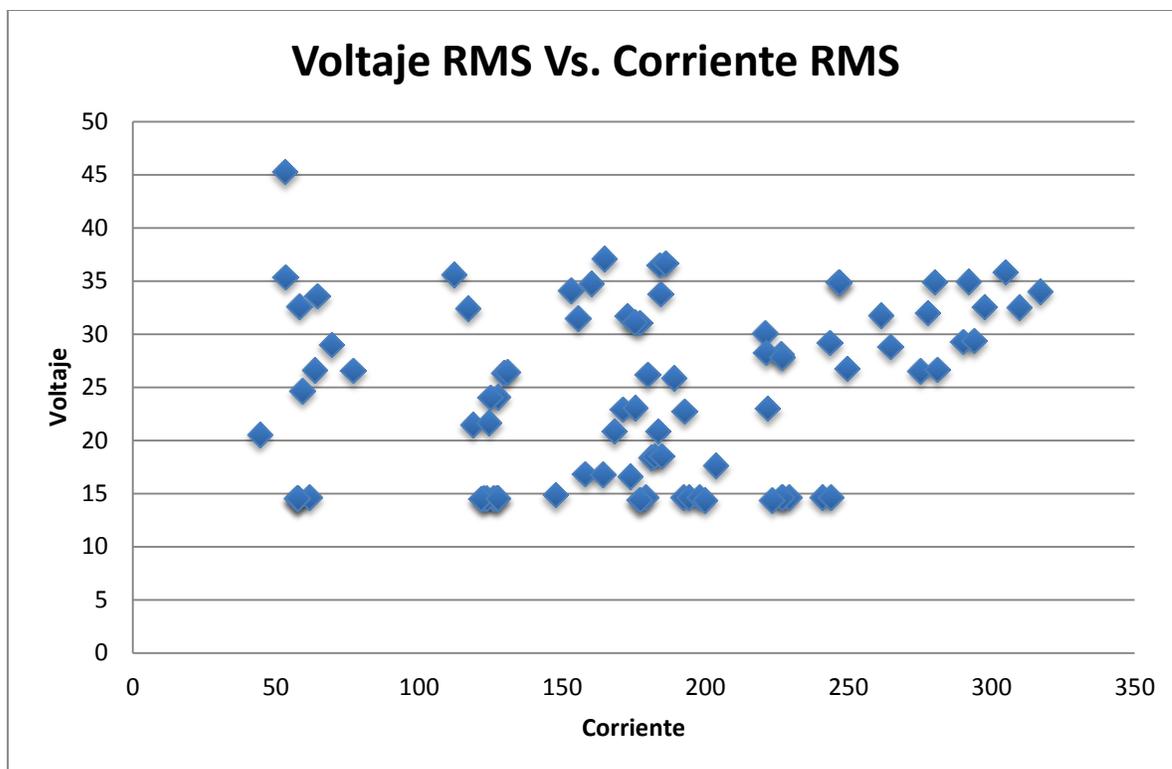
Número de corrida	Voltaje en la fuente	Velocidad de alimentación	Voltaje RMS	Corriente RMS
92	26	270	28.1	226.4
93	28	270	30,1	220.9
94	30	270	28.2	221.2
95	32	270	34.8	260.1
96	26	290	27.8	226.8
97	28	290	29.2	243.4
98	30	290	31,8	261,4
99	32	290	34,9	280,1
100	26	320	26,8	249.6
101	28	320	28.8	264.7
102	30	320	32.0	277.7
103	32	320	34.9	291.9
104	26	380	26.5	275.2
105	28	380	29,3	290.1

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

106	30	380	32.5	297.4
107	32	380	35.8	304.8
108	26	420	26.6	281.0
109	28	420	29.4	293.8
110	30	420	32.5	309.7
111	32	420	34.0	316.9

Al graficar estos valores se obtiene una gráfica de dispersión de los puntos de la relación entre voltaje y corriente mostrada en la figura 46.

Figura 46. Corriente RMS vs. Voltaje RMS

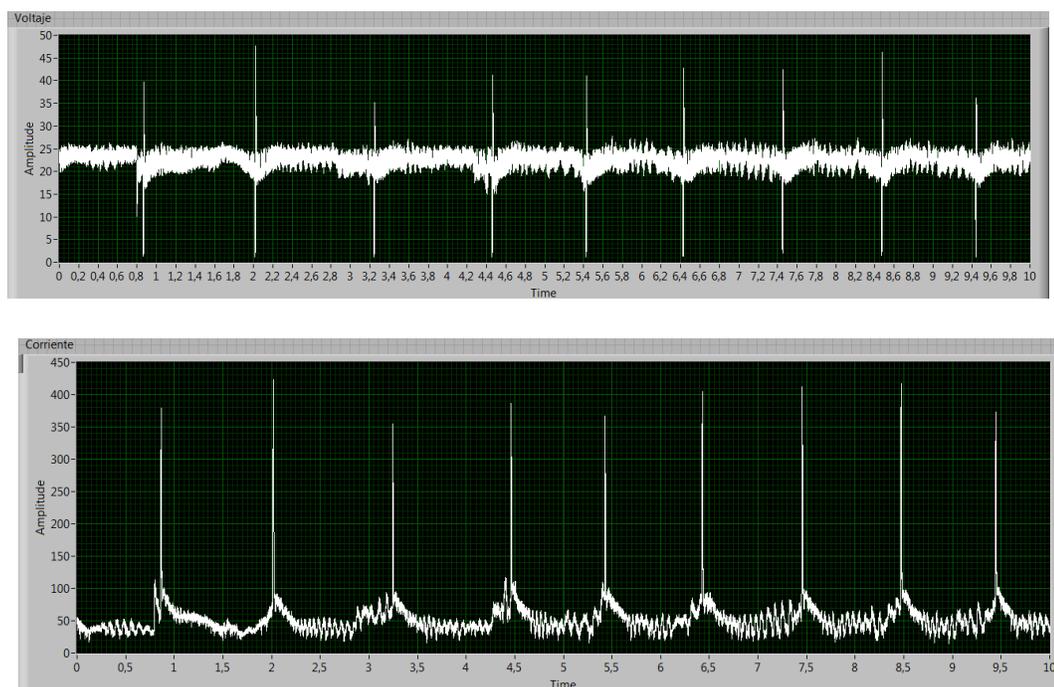


En este punto se hace necesario clasificar cada uno de los puntos de la gráfica 45 a fin de asignarle un modo de transferencia que los caracterice. Para ello se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Al correr el sistema de adquisición de datos se obtienen datos registrados en .xls o .txt y datos gráficos. Los datos gráficos se muestran en el anexo 1 y los datos obtenidos en excel fueron promediados y tratados estadísticamente y los resultados obtenidos fueron registrados en las tablas 10 y 11.
2. Se tomaron los valores para el voltaje y la corriente RMS en excel, para cada punto, y se clasificaron de acuerdo a los valores de referencia obtenidos por [11]
3. Se compararon las gráficas de referencia con cada una de las gráficas obtenida con base en patrones como la amplitud de la onda, repetitividad de los ciclos y valores de voltaje y corriente alcanzados. El análisis de las gráficas se hizo considerando lo siguiente:
 - 3.1 Las figuras cuyo voltaje cae a cero en el mismo instante en que se da un aumento en la corriente se clasifican como cortocircuito. Las gráficas de los cordones 1, 8, 9, 19, 26, 27, 28, 29, 32, 35, 39, 42, 43, 44, 57, 65, 66, 67, 70,

71, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89 y 91 presentan este comportamiento. Un ejemplo de ello se muestran en la figura 47

Figura 47. Señal de cortocircuito para el ER100S1. Voltaje y Corriente



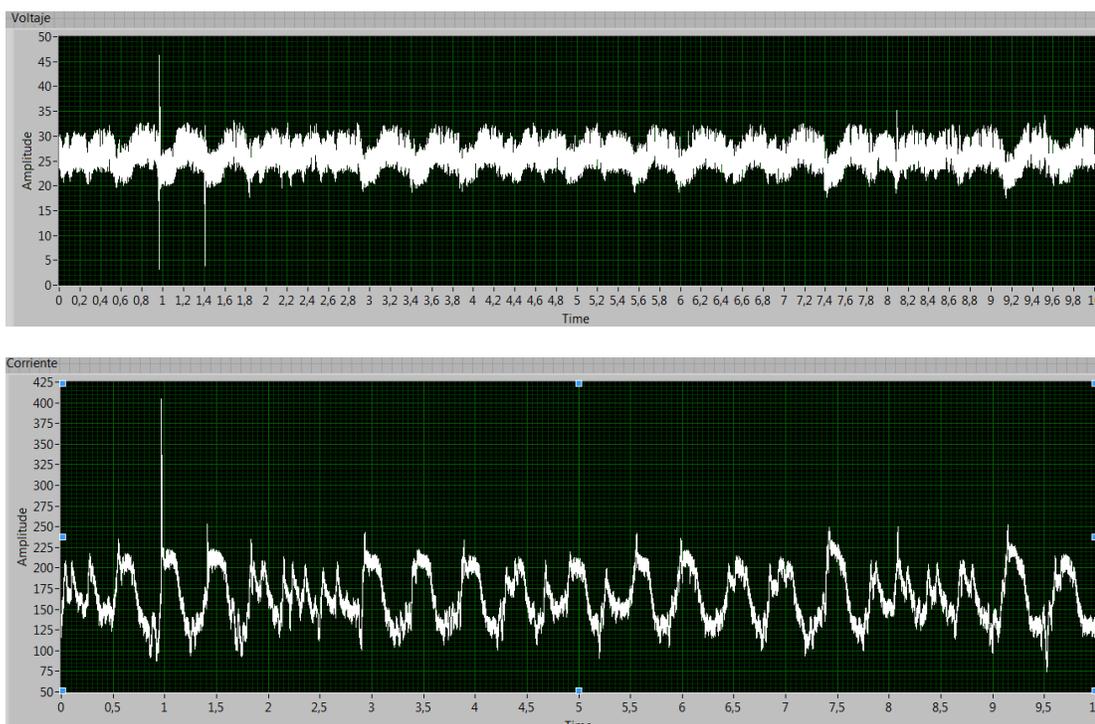
Allí se muestran picos en el nivel de corriente en el momento en que cae el voltaje (hasta cero) y hay zonas de estabilidad donde el voltaje y la corriente mantienen un nivel promedio.

Algunos cortocircuitos se consideran estable y otros parcialmente inestable; así por ejemplo cuando hay repetitividad en los ciclos y en los tiempos en que el arco es estable son relativamente constantes se considera un cortocircuito estable tal como se muestra en las gráficas de los cordones 1, 8, 9, 26, 27, 28, 29, 32, 35, 39, 42, 43, 44, 57, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90 y 91. Aquellas gráficas en las cuales hay periodos en que el voltaje no toca el cero, hay variaciones abruptas en las corrientes y/o en los voltajes se consideran como corto circuitos inestables.

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

3.2 Las gráficas en las cuales no se aprecian máximos o mínimos absolutos únicos o que disten significativamente de los máximos y mínimos relativos, tanto para la corriente como para el voltaje; cuya periodicidad, amplitud de onda y frecuencia puede ser constante o no se clasifican como globular. Las gráficas de los cordones 10 y 50 muestran un ejemplo de ello. En la figura 48 se muestra la forma de estas señales.

Figura 48. Señales para transferencia globular para el ER100S1. Voltaje y Corriente.



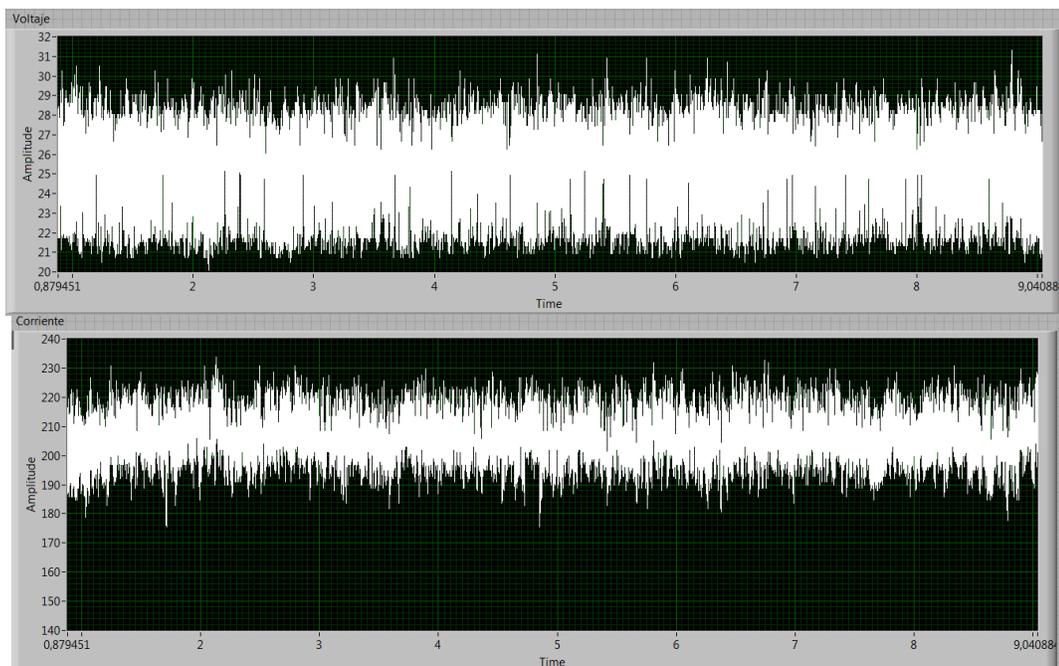
Se observa una oscilación continua, las ondas de voltaje y corriente están invertidas y la señal del voltaje tiene crestas más pronunciadas que la señal del voltaje.

3.3 Las gráficas cuya morfología es de tipo “lineal”; es decir, no presentan cambios abruptos para la corriente o el voltaje y cuya onda es suave, se clasifican como aspersion. Ejemplo de ellos son las gráficas de los cordones 2,5,41,60,62,63,69, 92,93,93, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104,

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

105, 106, 107, 108, 109, 110, 111. Un ejemplo de ello se ilustra en la figura 49.

Figura 49. Señal de transferencia por aspersion para el ER100S1. Voltaje y Corriente.



3.4 Existen algunas gráficas en las que se aprecian modos combinados, así por ejemplo, se muestra un comportamiento global de globular y de repente ocurre un cortocircuito. Casos como este se muestran en las gráficas de los cordones. 13, 20, 48, y 55.

4. Para los casos en que no coincidieran el análisis gráfico y teórico se considero predominante en análisis gráfico ya que los datos teórico fueron extraídos de una nube de puntos que posee márgenes de error más amplias que las del análisis gráfico.

En la tabla 12 se muestra el resultado de la evaluación.

Tabla 12. Análisis teórico Vs. Análisis Gráfico

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

ORDEN ALEATORIZA.	I RMS	V RMS	ESTADO DEL ARTE	ANÁLISIS GRÁFICO
42	127,5	24,1	Corto Circuito	Corto Circuito
90	153,1	34,1	Aspersión	Aspersión
71	164,7	37,1	Aspersión	Aspersión
4	76,9	26,6	Inestable	Inestable
75	155,5	31,5	Inestable	Inestable
47	129,6	26,3	Globular	Corto Circuito
11	44,3	20,5	Corto Circuito	Corto Circuito
77	69,4	29,0	Inestable	Globular
35	124,4	21,6	Corto Circuito	Corto circuito
26	179,9	26,2	Globular	Corto Circuito/Globular
81	53,3	35,4	Inestable	Inestable
84	177,1	31,0	Aspersión	Inestable
1	192,8	22,7	Corto Circuito	Corto Circuito
72	189,1	25,9	Globular	Corto Circuito/Globular
8	53,1	45,3	Inestable	Inestable
78	64,4	33,6	Inestable	Inestable
48	125,0	24,0	Corto Circuito	Corto Circuito
39	157,9	16,8	Corto Circuito	Corto Circuito
28	168,2	20,9	Corto Circuito	Corto Circuito
74	122,4	21,5	Corto Circuito	Corto Circuito
27	171,2	22,9	Corto Circuito	Corto Circuito
87	112,3	35,6	Inestable	Inestable
19	58,2	32,6	Inestable	Inestable
80	124,4	21,6	Corto Circuito	Corto Circuito
89	117,2	32,4	Inestable	Inestable

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

66	161,6	22,3	Corto Circuito	Corto Circuito
70	172,8	31,7	Aspersión	Aspersión
57	59,2	24,6	Corto Circuito	Corto Circuito
83	44,5	23,4	Corto Circuito	Corto Circuito
64	115,0	24,9	Corto Circuito	Corto Circuito
85	61,7	14,7	Corto Circuito	Inestable
41	179,1	14,7	Corto Circuito	Corto Circuito/Globular
60	184,1	36,5	Aspersión	Aspersión
55	175,4	31,1	Globular	Globular
62	192,5	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito/Globular
57	226,8	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito
64	229,3	14,6	Corto Circuito	Inestable
54	186,1	36,7	Aspersión	Aspersión
52	184,3	33,7	Aspersión	Aspersión
69	246,6	34,9	Aspersión	Aspersión
65	221,9	23,0	Corto Circuito	Inestable
58	226,7	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito
59	194,3	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito
61	243,8	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito
56	246,9	34,8	Aspersión	Aspersión
63	197,9	14,6	Corto Circuito	Corto Circuito
71	57,5	14,5	Corto Circuito	Corto Circuito
81	122,5	14,5	Corto Circuito	Corto Circuito
91	56,6	19,8	Corto Circuito	Corto Circuito
87	164,2	16,8	Corto Circuito	Corto Circuito
83	57,6	14,5	Corto Circuito	Corto Circuito

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

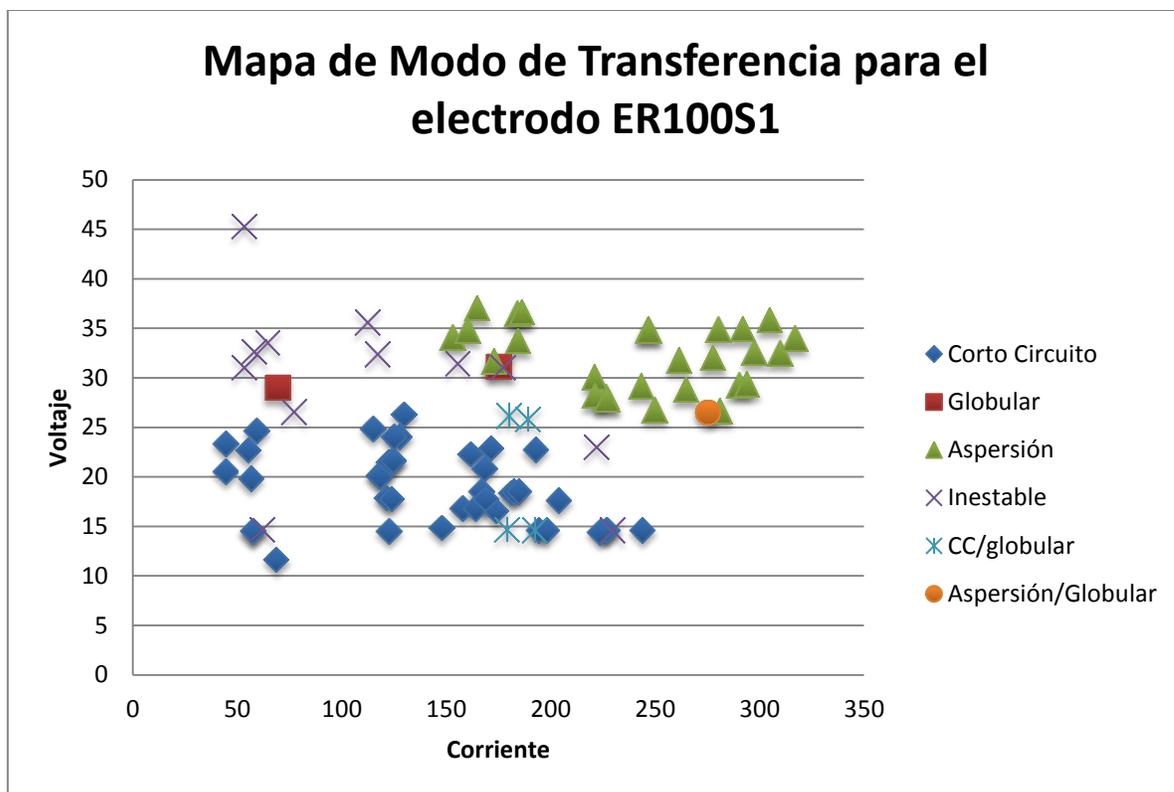
75	121,5	17,9	Corto Circuito	Corto Circuito
77	123,8	17,8	Corto Circuito	Corto Circuito
84	166,8	18,5	Corto Circuito	Corto Circuito
80	203,7	17,6	Corto Circuito	Corto Circuito
88	173,7	16,6	Corto Circuito	Corto Circuito
73	117,6	20,1	Corto Circuito	Corto Circuito
76	223,4	14,4	Corto Circuito	Corto Circuito
89	118,2	20,1	Corto Circuito	Corto Circuito
85	147,7	14,9	Corto Circuito	Corto Circuito
90	168,7	17,8	Corto Circuito	Corto Circuito
78	181,1	18,4	Corto Circuito	Corto Circuito
86	182,3	18,5	Corto Circuito	Corto Circuito
74	184,7	18,5	Corto Circuito	Corto Circuito
79	55,2	22,7	Corto Circuito	Corto Circuito
80	68,6	11,6	Corto Circuito	Corto Circuito
92	226,4	28,1	Aspersión	Aspersión
93	220,9	30,1	Aspersión	Aspersión
94	221,2	28,2	Aspersión	Aspersión
95	160,1	34,8	Aspersión	Aspersión
96	226,8	27,8	Aspersión	Aspersión
97	243,4	29,2	Aspersión	Aspersión
98	261,4	31,8	Aspersión	Aspersión
99	280,1	34,9	Aspersión	Aspersión
100	249,6	26,8	Aspersión	Aspersión
101	264,7	28,8	Aspersión	Aspersión
102	277,7	32,0	Aspersión	Aspersión
103	291,9	34,9	Aspersión	Aspersión
104	275,2	26,5	Aspersión	Aspersión

Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

105	290,1	29,3	Aspersión	Aspersión
106	297,4	32,5	Aspersión	Aspersión
107	304,8	35,8	Aspersión	Aspersión
108	281,0	26,7	Aspersión	Aspersión
109	293,8	29,4	Aspersión	Aspersión
110	309,7	32,5	Aspersión	Aspersión
111	316,9	34,0	Aspersión	Aspersión

De esta manera se procedió a graficar el Mapa de Modo de Transferencia obtenido para el electrodo ER100S1 aplicado con proceso de soldadura GMAW y protección gaseosa de 98%Ar + 2%O₂ el cual se muestra en la figura 50.

Figura 50. Mapa de Modo de Transferencia para el ER100S2 con protección gaseosa 98%Ar + 2%O₂.



8. Conclusiones

- Se obtuvo que la metodología para obtener un mapa de modo de transferencia es:
 1. Instrumentar un equipo de soldadura con una tarjeta de adquisición de datos que permita muestrear a altas velocidades.
 2. Tomar una referencia o patrón de señales ya estudiadas replicando un mapa de modo de transferencia.
 3. Realizar un análisis cuantitativo de los valores obtenidos a fin de poder proyectar análisis cualitativos.
 4. Se realiza un diseño de experimentos y se seleccionan las variables de estudio.
 5. Se corre el diseño de experimento y se realiza un análisis estadístico de las señales.
 6. Se analizan las señales y se clasifican los resultados obtenidos.
 7. Se realiza una gráfica con los valores de voltaje y corriente RMS y se obtiene la nube de puntos correspondiente al mapa de modo de transferencia.
 8. Este procedimiento puede complementarse con otro estudio como la shadowgrafía, el modelamiento numérico o las imágenes.

- De la figura 50 se observa que los resultados están conformes con la literatura: El cortocircuito se da para bajos voltajes y amperajes, a medida que se aumenta el voltaje se obtiene transferencia globular y para voltajes altos se obtiene transferencia por aspersion con amperajes superiores a 200 A.

- En el mapa de modo de transferencia obtenido se muestra una zona de transferencia por aspersion mucho más amplia lo cual posiblemente obedezca a la composición química del electrodo.

-

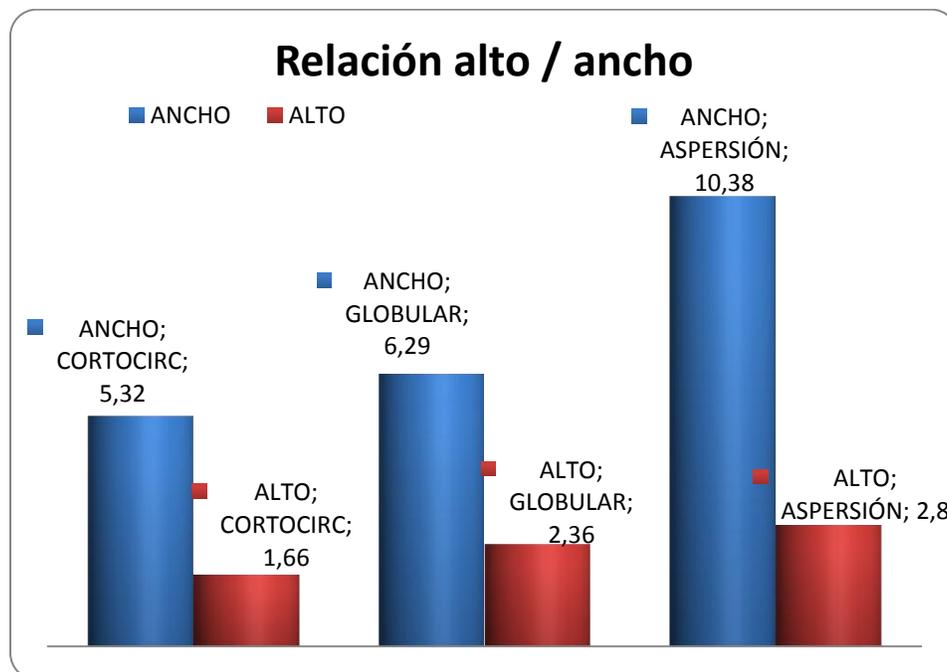
- Se tienen que el sistema de adquisición de datos es adecuado para obtener las señales para corto circuito y globular pero para lograr una optimización en las señales obtenidas para aspersion es recomendable aumentar la capacidad de

muestreo de la tarjeta de adquisición de datos para obtener señales con menor cantidad de ruidos y con un espectro de muestreo más amplio.

- El monitoreo de las señales garantizan que la soldadura se esté depositando bajo un modo de transferencia puro y por ende se obtendrá mayor calidad de las juntas.
- El proceso de instrumentar un proceso, es el primer paso para poder modelarlo e identificar sus dinámicas, con miras a la implementación de sistemas de control.
- No se observa una cantidad significativa de transferencia globular, de acuerdo a la literatura este resultado es coherente ya que para que se de la transferencia globular se requiere de la presencia de CO_2 y en este caso se tenía una combinación gaseosa bastante estable.
- Para aquellas zonas identificadas en la gráfica 50 como inestables se observó una alta cantidad de salpicaduras u oscilaciones en los cordones.
- Para aquellas combinaciones para las cuales el voltaje del arco era grande y la velocidad de alimentación pequeña se daba un rebote en el arco que terminaba en la fusión del tubo de contacto. En estos casos se recomienda aumentar la distancia entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo.
- El análisis de experimentos arrojó como resultado que el voltaje de entrada a la máquina era menos significativo que la velocidad de alimentación para el experimento; esto puede obedecer a que la fuente de soldadura es de voltaje constante por lo cual el voltaje de entrada es rectificado internamente. No obstante, se observa que las variaciones en el voltaje de salida afectan de manera significativa los modos de transferencia de metal y son representativos para establecer la forma de la misma.
- De la tabla 12 se observa que la mayoría de los puntos coincidieron en el análisis teórico y gráfico por lo cual se obtiene que el sistema desarrollado y la metodología es confiable.

- Para los modos de transferencia combinados se observó, in situ, que lo que ocurre es un crecimiento tal de la gota que hace que ésta toque el material base antes de alcanzar el vuelo libre y por lo tanto se generan desprendimientos por cortocircuito.
- El diseño de experimentos, mostró que la corriente es una variable significativa. Para el cálculo del ANOVA considerando la interacción se obtuvo un R^2 ajustado de 81.27%, al correr el experimento para la corriente sin considerar la interacción entre las variables respuesta se obtuvo un R^2 ajustado de 83.22% lo que permite concluir que la significancia de la corriente en el experimento es superior a la significancia del voltaje de entrada.
- Durante el análisis visual de los cordones se observó que para algunos cortocircuitos se tenía una serie de puntos de soldadura continuos pero no un cordón, al observar las señales de corriente se pudo apreciar que para estos casos que había caídas en la corriente muy largas, de aproximadamente 0.9 s.
- En la gráfica 51 se muestra la relación de altura y ancho para cada uno de los modos de transferencia

Figura 51. Relación de altura y anchura de acuerdo al modo de transferencia de metal.



Obtención del Mapa de Modo de Transferencia

Se observa que el ancho y el alto aumentan de manera proporcional al aumento en la corriente y en el voltaje.

La desviación estándar para este gráfico se muestra en la tabla 13:

Tabla 13. Desviación estándar para el alto y ancho de los cordones.

	Desviación estándar ancho	Desviación estándar alto
Cortocircuito	1.47	0.72
Globular	1.06	2.36
Aspersión	1.45	1.37