



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Relación entre las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW con la calidad de las soldaduras

Óscar León Mejía López

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2014

Relación entre las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW con la calidad de las soldaduras

Óscar León Mejía López

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería De Materiales y Procesos

Director (a):

M.Eng. Jorge Enrique Giraldo Barrada

Línea de Investigación:

Procesos de Soldadura

Grupo de Investigación:

Grupo de Soldadura

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2014

“Sin embargo, como un hombre que camina solo y en la oscuridad, yo decidí ir tan lento y cuidadosamente que si no avanzaba por lo menos estaba seguro de no caer”

*--- René Descartes
El Discurso del Método*

Resumen

Se estudió la relación entre las señales de corriente, voltaje y presión acústica del arco eléctrico en la estabilidad del proceso de soldadura de metal y gas (GMAW) en el modo de transferencia de metal por cortocircuito y en la aparición de discontinuidades en una junta soldada. Las señales fueron capturadas por medio de un sistema de adquisición de datos a una frecuencia de muestreo de 5000 datos por segundo para las señales eléctricas y 44.100 para las señales acústicas. Las señales se procesaron y evaluaron de acuerdo con diferentes criterios para determinar la estabilidad, tales como la frecuencia de cortocircuito, el periodo de cortocircuito y sus respectivas desviaciones estándar. Para seleccionar los parámetros adecuados de soldadura se construyeron el mapa del modo de transferencia de metal y del mapa de frecuencias de cortocircuito. Con los valores de frecuencia más altos se logró la mejor estabilidad y los cordones de mejor calidad. Con los parámetros de soldadura correspondientes a estos cordones, se ajustó un procedimiento de soldadura de una junta a tope cuadrada, para el cual se evaluaron los diferentes criterios de estabilidad, así como las características de las señales acústicas y eléctricas que permitieron establecer los valores de referencia para esta nueva condición del proceso. Finalmente, se soldaron juntas a tope en las cuales se indujeron tres perturbaciones durante la soldadura (variación del caudal de gas de protección, variación de la distancia tubo de contacto pieza y variación de la abertura de raíz) y se evaluó su efecto en las señales acústicas y eléctricas.

Palabras clave: GMAW, señales eléctricas y acústicas, cortocircuito, estabilidad, mapa de frecuencia de cortocircuito, mapa de modo de transferencia de metal.

Abstract

In the present study has been investigated the relationships between current, voltage and acoustic pressure of the electric arc in the Gas Metal Arc Welding Process (GMAW) and occurrence of discontinuities in welded joints. The signals were acquired by acquisition system with the sample rate of 10 kS/s and 44.1 kS/s for electric and acoustic signals respectively. The signals were processed and assessed with different indexes of stability, including the short circuit droplet rate, short circuit period and its respective standard deviation. For selection the best welding parameters, were built the transfer mode map and the droplet rate map. The top droplet rate came into the most stable weld beads, therefore, were identified the stability indexes values and the acoustic signals characteristics as the amplitude and power spectral in the frequency domain, that later were used like reference parameters. Finally, were welded butt joints of square groove with the top parameter and three disturbances (Shielding gas flow reduction, increase and decrease of the root opening) and your effect were assessed in the stability indexes and in the signal acoustic characteristics.

Keywords: GMAW, electric and acoustic signals, short circuit, stability, droplet rate map, metal transfer mode map.

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento y justificación del problema de investigación.....	5
2. Marco Teórico.....	9
2.1. El proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW)	9
2.2. Modos de transferencia de metal en GMAW	12
2.2.1. Clasificación de los modos de transferencia de metal.....	13
2.2.2. Teoría de transferencia de metal en GMAW: Balance de Fuerzas Estáticas .	17
2.2.3. Transferencia de metal por cortocircuito	21
2.2.4. Transferencia de metal globular.....	23
2.3. Fundamentos de acústica y generación de sonido en el proceso GMAW	26
2.4. Procesamiento de las señales del arco	29
3. Estado del arte.....	31
3.1. Estudios de las señales acústicas en el proceso GMAW.....	31
3.2. Estudios de las señales eléctricas en el monitoreo del proceso GMAW	38
3.3. Estabilidad del proceso gmaw-cortocircuito.....	41
3.4. Síntesis del estado del arte	44
4. Objetivos.....	47
4.1. Objetivo general	47
4.2. Objetivos específicos	47
5. Materiales y métodos.....	49
5.2. Diagrama de flujo del procedimiento experimental	49
5.3. Equipo de soldadura y sistema de instrumentación.....	52
5.4. Procedimientos experimentales.....	55
6. Resultados y análisis.....	61
6.1. Mapa del modo de transferencia de metal por cortocircuito.....	61
6.2. Mapa de frecuencias de cortocircuito y selección de parámetros para soldaduras en junta.....	73
6.3. Análisis de las señales eléctricas y acústicas de las soldaduras en junta con perturbaciones.....	85
6.3.1. Caracterización de las soldaduras e Inspección de las señales eléctricas y acústicas.....	85
6.3.2. Análisis de las señales eléctricas.....	96
6.3.3. Análisis de las señales acústicas.....	107
7. Conclusiones.....	115

X	Relación entre las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW con la calidad de las soldaduras
---	---

8.	Recomendaciones para trabajos futuros	124
9.	Bibliografía	125

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. 1. Causas de la aparición de defectos en las soldaduras GMAW.	6
Figura 2. 2. Esquema del proceso GMAW [1].	10
Figura 2. 3. Relación voltaje-corriente para una fuente de voltaje constante [1].	11
Figura 2. 4. Relación voltaje-corriente para una fuente de corriente constante [1].	11
Figura 2. 5. Principio de autorregulación en el proceso GMAW [2].	12
Figura 2. 6. .Esquema de los modos de transferencia de metal propuesta por el IIW [3].	14
Figura 2. 7. Diagrama de modos de transferencia de metal fundamentales en la gráfica de corriente vs voltaje, propuesta por lordachescu y Quintino [4]: U_a voltaje del arco; U_o voltaje de circuito abierto; I_w corriente del arco.	16
Figura 2. 8. Clasificación de los modos de transferencia de metal propuesta por Scotti et al, en el 2012 [5].	17
Figura 2. 9. Fuerza electromagnética actuando sobre un pequeño elemento de gota para un flujo de corriente divergente y convergente, respectivamente.	20
Figura 2. 10. Esquema del flujo de corriente en la zona de conducción de la gota, descrita por el ángulo θ	20
Figura 2. 11. Esquema de la posición del electrodo y el charco de soldadura para el modo de transferencia cortocircuito sincronizado con las señales de corriente y voltaje [8].	22
Figura 2. 12. Secuencia de imágenes del modo de transferencia globular axial o estable [5].	23
Figura 2. 13. Secuencia de imágenes del modo de transferencia globular repelida [5]. .	23
Figura 2. 14. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER100S1 para transferencia globular [10].	24
Figura 2. 15. Modo de transferencia en aspersion proyectada [4].	25
Figura 2. 16. Modo de transferencia en aspersion por chorro [5].	25
Figura 2. 17. Señal de voltaje y corriente del modo de transferencia por aspersion para el electrodo ER100S-1 [10].	26
Figura 2. 18. Área de audición del oído humano, delimitada por el umbral de audición A de los sonidos más bajos que se pueden detectar y el umbral de dolor B [11].	27
Figura 2. 19. Transformación de la energía en un arco estable.	28
Figura 2. 20. Conversión de una señal analógica a una señal digital.	30

Figura 3. 1. Señales de corriente y voltaje del proceso GMAW en cortocircuito [15].	..... 34
Figura 3. 2. Detalle de la señal acústica y de la señal de corriente para un cortocircuito [15].	..... 34
Figura 3. 3. Cambios en la forma de la señal acústica que correspondientes a la presencia de discontinuidades en la soldadura [15].	..... 35
Figura 3. 4. Presencia de picos de sonido en GMAW-P, en el caso de (a) Voltaje alto y (b) Voltaje bajo [16].	..... 36
Figura 3. 5. Gráfica de la densidad espectral de potencia del modo de transferencia por aspersión [16].	..... 38
Figura 3. 6. Diferentes sonidos producidos durante la transferencia por cortocircuito [14].	..... 38
Figura 3. 7. Frecuencia o tasa de cortocircuito Vs voltaje en el tiempo de arco y forma de la señal [19].	..... 40
Figura 3. 8. Descripción del algoritmo usado por Quinn et al para la detección de defectos de soldadura [20].	..... 41
Figura 3. 9. Grafica de (a) periodo promedio de cortocircuito y (b) desviación estándar del periodo de cortocircuito en función del voltaje [23].	..... 43
Figura 3. 10. Mapas de frecuencia para dos gases de protección, frecuencia en Hz [23].	..... 44
Figura 5. 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.	..... 50
Figura 5. 2. Imagen del montaje de soldadura y del sistema de instrumentación de las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW.	..... 53
Figura 5. 3. Diagrama del sistema de instrumentación de las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW.	..... 54
Figura 5. 4. Montaje de soldadura en junta.	..... 54
Figura 5. 5. Dimensiones de los cupones de soldadura usados para construir los mapas de modos de transferencia y de frecuencias de cortocircuito.	..... 57
Figura 5. 6. Detalles de la junta de soldadura usada como referencia.	..... 57
Figura 5. 7. Cupón de soldadura de abertura de raíz variable.	..... 59
Figura 5. 8. Cupón de soldadura de abertura de raíz constante, cambio del flujo de gas y de la DTCP.	..... 59
Figura 6. 1. Mapa del modo de transferencia por cortocircuito en función de la corriente y el voltaje RMS.	..... 62
Figura 6. 2. Mapa del modo de transferencia por cortocircuito en función de la velocidad de alimentación y el voltaje RMS.	..... 63
Figura 6. 3. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuito. a) 100 in/min – 17 V, b) 200 in/min - 18 V y c) 400 in/min- 26 V.	..... 64
Figura 6. 4. Imágenes de los cordones de soldadura correspondientes a la zona de cortocircuito.	..... 65
Figura 6. 5. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuito/globular. a) 100 in/min - 22 V, b) 150 in/min - 24 V y c) 300 in/min - 30 V. a)	66
Figura 6. 6. Graficas de a) corriente y b) voltaje filtrada. Para 150 in/min – 24V.	..... 67

Figura 6. 7. Imágenes de los cordones de soldadura correspondientes a la zona de cortocircuito / globular.	68
Figura 6. 8. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuito/aspersión, a) 350 in/min - 30 V, b) 450 in/min - 31 V, c) 550 in/min - 31 V.	69
Figura 6. 9. Graficas de a) corriente y b) voltaje, para 450 in/min – 31V.	70
Figura 6. 10. Imagen de un cordón de soldadura correspondiente a la zona de cortocircuito / aspersión. Para 350 in/min - 30 V.	71
Figura 6. 11. Señales de corriente y voltaje de la zona de interrupción del arco, a) 250 in/min – 17 V, b) 150 in/min – 16 V, c) 550 in/min – 23V.	72
Figura 6. 12. Cordones de soldadura correspondientes a la zona IA.	73
Figura 6. 13. Mapa de frecuencias de cortocircuito para el alambre ER70S-6 y 75% Ar + 25% CO ₂	74
Figura 6. 14. Mapa de frecuencia de cortocircuito esquemático para el alambre ER70S-6 y 75% Ar + 25% CO ₂	75
Figura 6. 15. Distribución de probabilidad para la frecuencia de cortocircuito.	77
Figura 6. 16. Residuales contra a) velocidad de alimentación y b) voltaje.	78
Figura 6. 17. Residuales contra orden de observación para la frecuencia de cortocircuito.	78
Figura 6. 18. Gráfica de contornos de la frecuencia de cortocircuito para la zona de mayor estabilidad del proceso.	80
Figura 6. 19. Periodo de cortocircuito contra voltaje.	81
Figura 6. 20. Desviación estándar del periodo de cortocircuito contra voltaje.	82
Figura 6. 21. Gráficas de frecuencia vs voltaje para la zona de mayor estabilidad.	82
Figura 6. 22. Soldadura de cupón de abertura de raíz variable y registro de las señales. a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.	86
Figura 6. 23. Soldadura con cambio del caudal de gas y registro de las señales. a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.	87
Figura 6. 24. Soldadura con cambio de la DTCP, a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.	88
Figura 6. 25. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en la abertura de raíz.	98
Figura 6. 26. Graficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambios en la abertura de raíz.	99
Figura 6. 27. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en el caudal de gas.	101
Figura 6. 28. Gráficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambio en el caudal de gas.	102
Figura 6. 29. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en DTCP.	105
Figura 6. 30. Gráficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambio en la DTCP.	106

Figura 6. 31. Señales de a) Corriente, b) Voltaje y c) Presión acústica, para las condiciones de la soldadura de referencia	108
Figura 6. 32. Gráficas de los parámetros de forma de la señal de presión acústica con diferentes perturbaciones.....	109
Figura 6. 33. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) abertura de raíz baja, b) abertura de raíz normal y c) abertura de raíz alta.	111
Figura 6. 34. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) caudal de gas bajo, b) caudal de gas alto.	112
Figura 6. 35. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) DTCP baja, b) DTCP alta.	113

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2. 1. Clasificación de los modos de transferencia de metal propuesta por el IIW en 1976 [3].	14
Tabla 2. 2. Clasificación de los modos de transferencia de metal en GMAW propuesta por Iordachescu y Quintino [4].	15
Tabla 3. 1. Resumen de los estudios realizados en soldaduras GMAW de aceros al carbono (ER 70S-6, ϕ 1.2mm) con las Señales E & A.	44
Tabla 5. 1. Parámetros de soldadura fijos durante la soldaduras “Bead on Plate”.	56
Tabla 5. 2. Perturbaciones del proceso	58
Tabla 6. 1. Resultados obtenidos en la región de mayor estabilidad.	76
Tabla 6. 2. Reporte de análisis de varianza para la frecuencia de cortocircuito.....	79
Tabla 6. 3. Características geométricas de los cordones de soldadura.	83
Tabla 6. 4. Especificación del procedimiento de soldadura de referencia para junta cuadrada.	84
Tabla 6. 5. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas en la soldadura de referencia.	91
Tabla 6. 6. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de abertura de raíz baja.	92
Tabla 6. 7. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de abertura de raíz alta.	92
Tabla 6. 8. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de caudal de gas bajo.	93
Tabla 6. 9. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de caudal de gas alto.	94
Tabla 6. 10. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de DTCP alta.	95
Tabla 6. 11. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación DTCP baja.	96
Tabla 6. 12. . Resumen de los parámetros de las señales eléctricas y los defectos de soldadura.	106
Tabla 6. 13. Resumen de los parámetros de la señal acústica y los defectos de soldadura.	110

Introducción

El proceso de soldadura por arco de metal y gas GMAW (Gas Metal Arc Welding), es uno de los principales procesos utilizados en la fabricación de estructuras metálicas debido a las ventajas técnicas y económicas que brinda frente a otros procesos de soldadura. Sus principales atributos son las altas tasas de deposición de metal, la posibilidad de realizar soldaduras de mayor longitud sin interrupción en todas las posiciones, la facilidad para acoplarse a sistemas automatizados ó mecanizados de manufactura y la posibilidad de soldar la mayor parte de las aleaciones comercialmente disponibles.

En la mayoría de los casos, en la secuencia de etapas que involucra la fabricación de un producto, los procesos de unión y particularmente de soldadura, se usan en las últimas etapas para realizar el ensamble o cuando se han hecho varios procesos previamente como laminación, fundición, corte, mecanizado, etc. En esta etapa de la fabricación, los costos por reproceso ó por descarte debidos a la aplicación de soldaduras defectuosas, aumentan considerablemente. En consecuencia, es necesario garantizar que las soldaduras se realicen con los parámetros más adecuados del proceso que eviten la aparición de discontinuidades que produzcan soldaduras rechazables.

Entre los principales problemas que se encaran en la industria de la soldadura que usan procesos por arco se encuentran: (1) la pobre estabilidad del arco, que es promovida por diferentes factores como la mala selección de los parámetros de soldadura; (2) la escasa información técnica disponible y (3) el ajuste subjetivo de los parámetros de soldadura, a partir de las características sensibles que puede apreciar el mismo soldador o el personal con más experiencia. La inadecuada selección de los parámetros de soldadura se relaciona a su vez con la escasa o nula información técnica disponible respecto a variables tan importantes en un procedimiento de soldadura como el modo de transferencia de metal y los amplios intervalos de parámetros de soldadura (velocidad de alimentación y voltaje) recomendados por los fabricantes de los electrodos y gases de protección.

El arco eléctrico es el principal descriptor de los diferentes fenómenos que ocurren en esta clase de procesos de soldadura, como la transferencia de masa y de calor. Especialmente, en GMAW éste se encuentra relacionado directamente con la estabilidad y con la aparición de discontinuidades o defectos que pueden alterar la calidad de las uniones soldadas, tales como poros, faltas de fusión o penetración incompleta, etc. A su vez, se presenta una relación directa con características como el voltaje, la corriente, el sonido, la emisión de luz visible, infrarroja y ultravioleta del arco. En este sentido, las señales eléctricas y acústicas generadas en GMAW han sido usadas para monitorear el proceso, debido a que los sensores de corriente, de voltaje y de sonido (micrófonos) son los que mejor adquieren la dinámica del proceso (se puede capturar las señales a una alta tasa de muestreo) y soportan el ambiente hostil de la soldadura (elevada temperatura, salpicaduras, entre otros) sin perder fidelidad en las mediciones.

El objetivo del presente trabajo es encontrar la relación entre las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW y la calidad de las uniones soldadas para unas condiciones particulares de soldadura, diferentes de las reportadas por otros autores, así como establecer una metodología de empleo de estas técnicas en la medición de la estabilidad del proceso, aplicable al desarrollo de procedimientos de soldadura y al diagnóstico de la calidad de uniones soldadas.

Para alcanzar los objetivos propuestos, inicialmente se seleccionaron las variables esenciales del procedimiento de soldadura requerido para unir láminas de 3/16" de espesor, de acero ASTM A36, con un solo pase de soldadura. Para estos requerimientos de la unión, se seleccionó un electrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diámetro y una mezcla de gas de protección de 75% argón y 25% dióxido de carbono. Inicialmente, se aplicaron soldaduras "*Bead On Plate*" y se construyeron mapas de modos de transferencia de metal, enfocado en la zona de transferencia por cortocircuito y sus fronteras; y de frecuencias de cortocircuito. Las soldaduras más estables correspondieron a las frecuencias más altas (mayores que 90 Hz), para estos parámetros de soldadura se caracterizaron las señales eléctricas y acústicas, obteniendo unas condiciones de referencia que permitieran evaluar la calidad de una junta soldada con base en la variación, respecto a la referencia en presencia de diferentes perturbaciones del proceso. Con la información levantada en este trabajo, se tendrían las bases para detectar

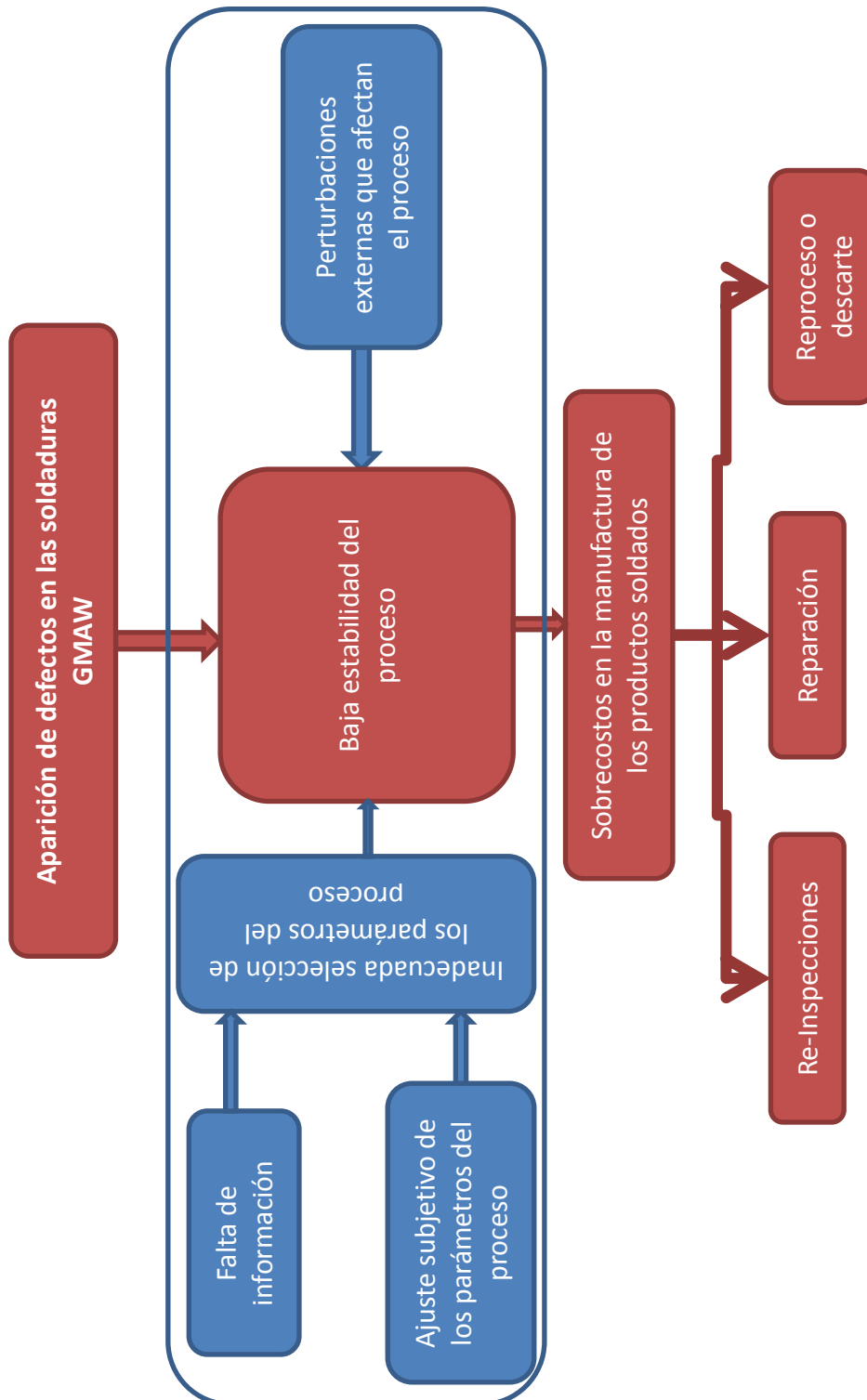
eventuales perturbaciones en soldaduras reales que permitan identificar la aparición de un defecto.

1. Planteamiento y justificación del problema de investigación

Entre los problemas más frecuentes que se encaran en la industria con el proceso de soldadura GMAW está la baja estabilidad del arco que conlleva a la aparición de diferentes tipos de discontinuidades en las uniones, lo cual reduce la calidad de los productos soldados y en consecuencia conduce a sobrecostos en la manufactura de un producto. Por un lado, la aparición de discontinuidades se debe a que en muchas industrias que usan este proceso, es recurrente operarlo con una baja estabilidad puesto que la selección de algunos parámetros del proceso y el ajuste final se realiza mediante observaciones subjetivas que hace el soldador o el ingeniero de soldadura, por ejemplo, a través del sonido que se puede oír ó a la apreciación cualitativa de la salpicadura ó a la forma final del cordón. Adicionalmente, en muchos casos se llega a una inadecuada selección de los parámetros del proceso debido al desconocimiento y a la falta de información acerca de aspectos fundamentales de este tales como: los modos de transferencia de metal y el efecto de los parámetros del proceso en la estabilidad del arco y la sanidad de las soldaduras.

Por otro lado, también se presenta una baja estabilidad cuando se alteran algunos parámetros de la soldadura, que se pueden ver como parámetros externos al proceso pero que finalmente influyen en el estado de este, tales como: cambios en la configuración del ensamble de la junta de la soldadura, alteraciones de la atmosfera de protección, presencia de contaminantes en el metal base ó metal de aporte, entre otros. En la Figura 1. 1 se resume el problema de investigación y se enmarca en color azul el campo de trabajo de esta tesis.

En este sentido, es necesario identificar estas perturbaciones del proceso, tanto para corregir las causas como para registrar la zona donde se presentan y pueden causar defectos en la soldadura.

Figura 1. 1. Causas de la aparición de defectos en las soldaduras GMAW.

Con este estudio se busca levantar información técnica del proceso GMAW para los diferentes profesionales relacionados con la soldadura (Ingenieros, personal técnico,

estudiantes de áreas afines, etc.) sobre la estabilidad del proceso, así como plantear una metodología para la medición y cuantificación de diferentes características del proceso que se realizan actualmente de forma cualitativa. Adicionalmente, se busca relacionar la calidad de las soldaduras con las señales acústicas y eléctricas del proceso, para evaluar el potencial de este método en el control de la calidad de las uniones soldadas.

2. Marco Teórico

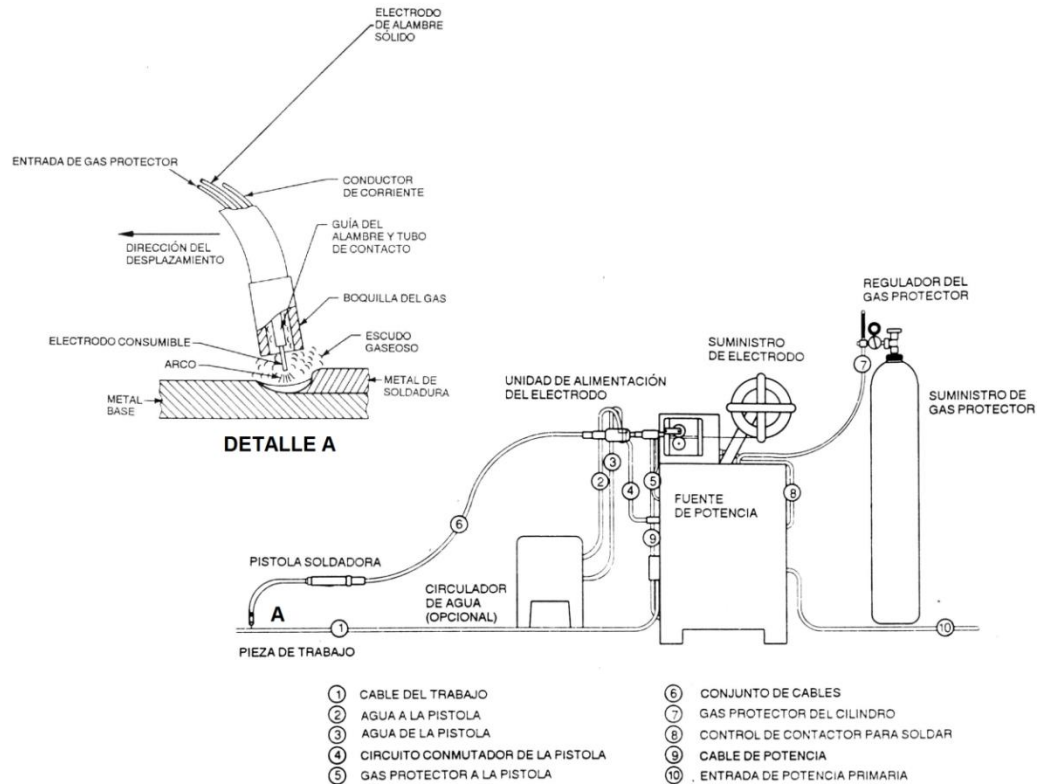
En este capítulo se abordan los conceptos básicos necesarios para la discusión del presente trabajo. Inicialmente, se explica el funcionamiento del proceso de soldadura GMAW y los diferentes modos de transferencia de metal (MTM) desde un punto de vista fenomenológico para poder entender e interpretar las señales eléctricas y acústicas del arco. Luego se abordan algunos conceptos básicos de acústica, para entender la generación de sonido en GMAW, así como las herramientas de análisis de señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

2.1. El proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se esquematiza el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) donde se pueden ver los principales componentes de un equipo de soldadura típico: la fuente de potencia, el sistema de suministro de gas de protección, la unidad de alimentación del alambre, la pistola y los cables de soldadura. Este proceso de soldadura requiere la fusión del material base y material de aporte, para formar el metal soldado (como se observa en el detalle A), en presencia de una atmósfera protectora conformada por gases inertes y/o activos. El calor requerido para la fusión es aportado por un arco eléctrico que se genera entre el material base y el material de aporte. De esta forma, con la solidificación del metal soldado, formado por el material de aporte y los bordes del metal base, se logra la unión de las piezas.

El material de aporte es alimentado de forma continua, así como la corriente y el gas de protección, a través de la pistola y los cables que la conectan a la unidad de alimentación.

Este proceso se utiliza principalmente en la manufactura de estructuras metálicas (puentes, edificios, tuberías, barcos, etc.) y permite soldar casi todas las aleaciones comercialmente disponibles. Sus principales ventajas son las altas tasas de depósito

Figura 2. 1. Esquema del proceso GMAW [1].

de metal comparada con otros procesos como SMAW y GTAW, así como la facilidad que presenta para integrarse a sistemas automatizados de manufactura.

Las fuentes de potencia para el proceso GMAW presentan dos variantes y se diferencian fundamentalmente en su configuración eléctrica que modifica el comportamiento del voltaje y la corriente del arco. 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 del arco. La relación Voltaje-Corriente de este tipo de fuentes se muestra en la Figura 2. 2, donde se puede apreciar que ante cambios pequeños de voltaje (longitud del arco) la fuente responde con un gran cambio en la corriente. El segundo tipo de fuentes de potencia son las de corriente constante, que 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 muestra en la Figura 2. 3. El primer tipo de fuente y configuración del equipo de soldadura es el más económico y el más usado, mientras el segundo tipo es menos usado en la industria, debido al costo adicional del sistema variable de velocidad de alimentación del alambre.

Figura 2. 2. Relación voltaje-corriente para una fuente de voltaje constante [1].

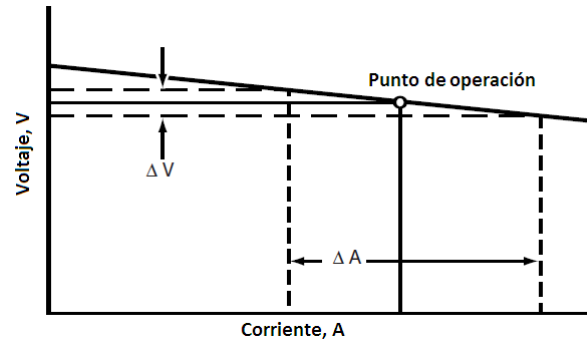
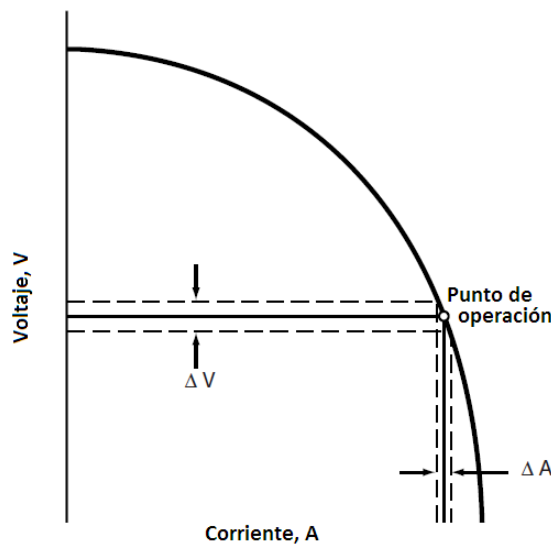


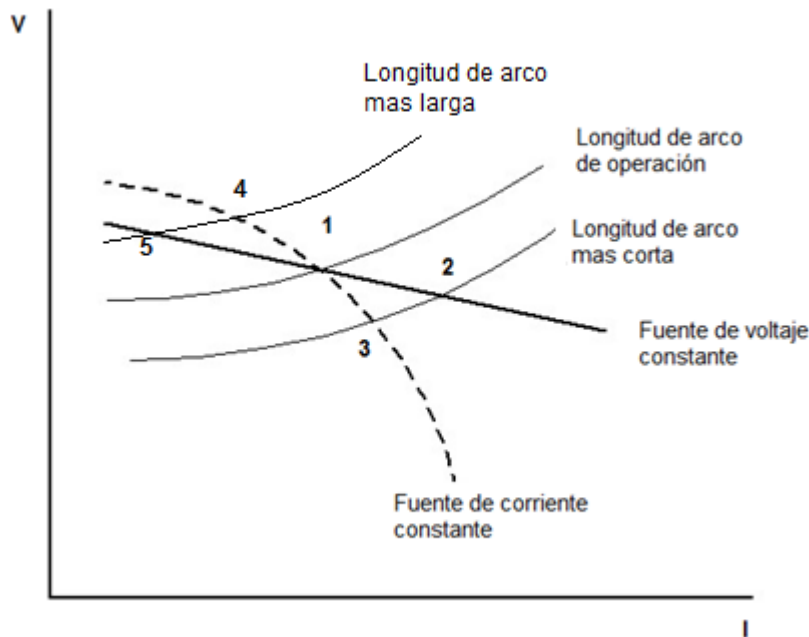
Figura 2. 3. Relación voltaje-corriente para una fuente de corriente constante [1].



La autorregulación del proceso se da cuando se presentan cambios en la distancia pieza-pistola de soldadura (debido a pequeños desalineamientos de las piezas a soldar o a movimientos errados del soldador). Como se puede ver en la Figura 2. 4, inicialmente se tienen las condiciones de corriente y voltaje dadas en el punto 1, que corresponden a una

longitud de arco de operación; si se presenta un cambio que produzca una longitud de arco más corta, entonces el voltaje se reduce y la corriente a su vez aumenta (este aumento depende del tipo de fuente de potencia puntos 2 o 3), de tal forma que con este aumento en la corriente aumenta también la tasa de fusión del alambre y la longitud del arco es restablecida. Lo contrario ocurre cuando la longitud del arco es mayor, es decir el voltaje también aumenta (punto 4 o 5) y la corriente disminuye. Con esto, la tasa de fusión disminuye y en consecuencia se restablece la longitud del arco de operación.

Figura 2. 4. Principio de autorregulación en el proceso GMAW [2].



2.2. Modos de transferencia de metal en GMAW

Los modos de transferencia de metal (MTM) del proceso GMAW son las formas como se transfiere el metal desde la punta del alambre sólido hasta el charco de soldadura. Los modos de transferencia dependen de diferentes parámetros del proceso como la

polaridad, la corriente de soldadura, la extensión del electrodo, el voltaje, el diámetro y material del alambre y el gas de protección. Cuando se suelda en un modo de transferencia se tienen unas condiciones particulares de penetración de cordón, de entrada de energía, de tasa de deposición de metal, de estabilidad del arco y de producción de salpicadura, lo cual hace que una soldadura aplicada con uno u otro MTM tenga unas propiedades y aplicaciones diferentes.

2.2.1. Clasificación de los modos de transferencia de metal

El Instituto Internacional de Soldadura (IIW) [3], desarrolló una clasificación de los MTM en el año de 1976, la cual es de carácter fenomenológica y abarca todos los procesos de soldadura por arco. La

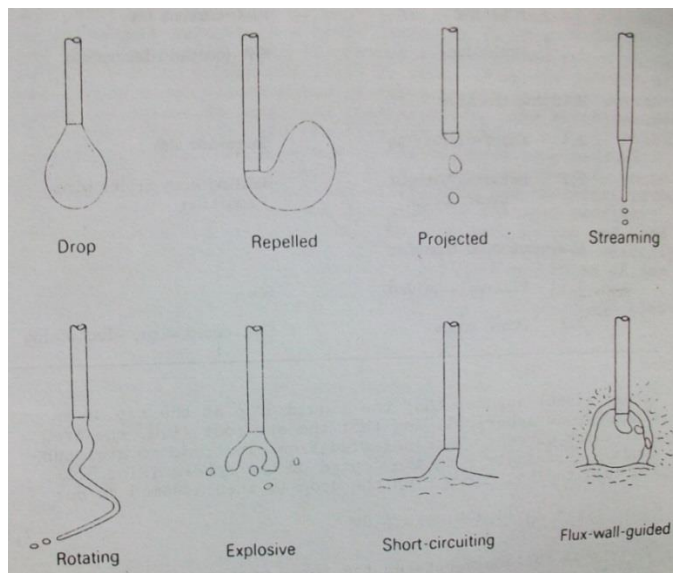
Tabla 2. 1 presenta los diferentes MTM propuestos por el IIW y la Figura 2. 5 muestra esquemáticamente la forma de las gotas de metal.

Esta clasificación es bastante general para los procesos de soldadura y lo suficientemente simple para permitir su identificación en el campo técnico; sin embargo, no aborda los avances posteriores logrados en el desarrollo de fuentes de potencia. Iordachescu y Quintino [4] en el 2006, propusieron una clasificación específica para GMAW, en la que se consideran tanto las tecnologías modernas de las fuentes de potencia como el comportamiento fenomenológico clásico para introducir conceptos como los modos fundamentales, controlados, mezclados, combinados y las variantes de los modos de transferencia de metal. La Tabla 2. 2 presenta la clasificación propuesta por los autores, el diagrama correspondiente para los modos de transferencia fundamentales se puede observar en la **Figura 2. 6**, estos modos de transferencia se logran con fuentes de potencia normales, es decir sin ningún tipo de control o programación de los parámetros del proceso (velocidad de alimentación, corriente ó voltaje) y son los que se van a tratar en este trabajo. Scotti et al [5] recopilaron en el 2012 la información publicada hasta la fecha para proponer una clasificación que incluye los desarrollos en control modernos y los fenómenos físicos presentes en la transferencia de metal.

Tabla 2. 1. Clasificación de los modos de transferencia de metal propuesta por el IIW en 1976 [3].

Tipo de Transferencia	Designación	Subcategoría	Ejemplo de proceso de soldadura
Vuelo libre	Globular	En gota (axial)	GMAW
		Repelida	
	Aspersión	Proyectada	
		Chorro	
		Rotacional	
Explosiva		SMAW	
Contacto de metal	Cortocircuito		GMAW
	Contacto sin interrupción		Soldadura con adición externa de metal aporte
Protegida por fundente	Guiada por pared de fundente		SAW
	Otros modos		SMAW, ESW

Figura 2. 5. Esquema de los modos de transferencia de metal propuesta por el IIW [3].



Esta clasificación se apoya igualmente en el desarrollo de nuevas tecnologías en las fuentes de potencia, en técnicas avanzadas de visualización del arco y medición del proceso de transferencia de metal, así como en los modelos físicos relacionados con el desprendimiento de metal.

Tabla 2. 2. Clasificación de los modos de transferencia de metal en GMAW propuesta por Iordachescu y Quintino [4].




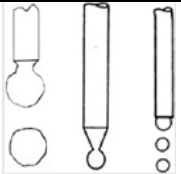

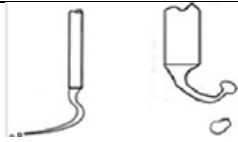
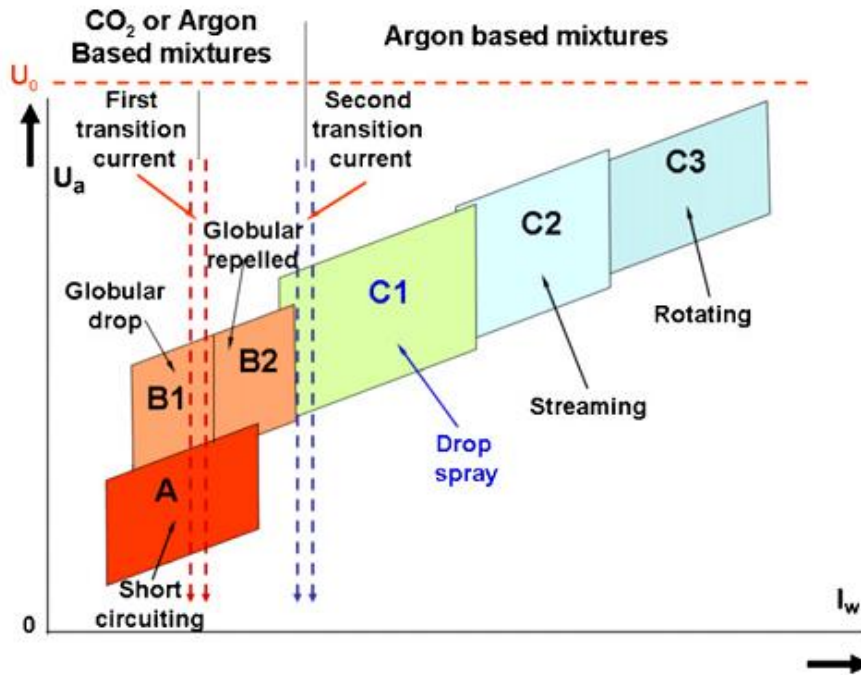
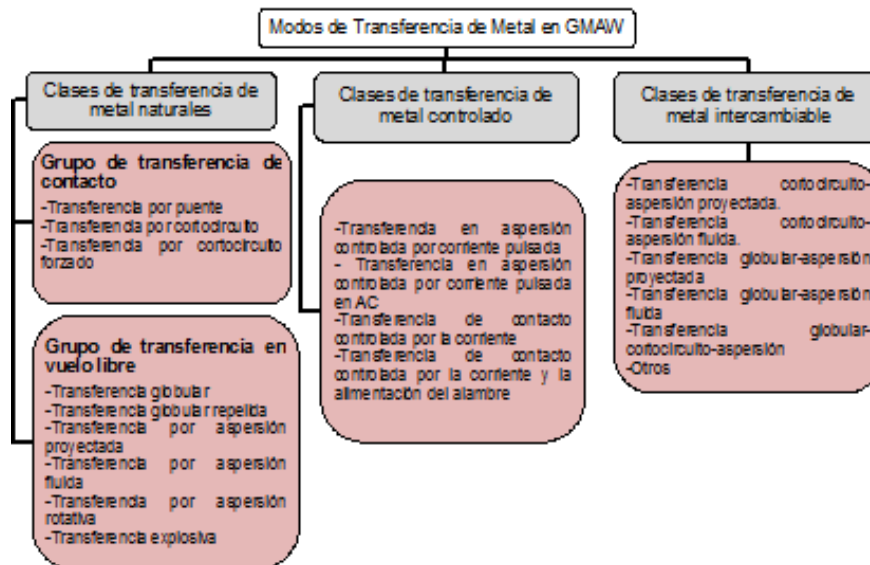
Denominación propuesta	Nombre	Esquema
A	Cortocircuito	
B1	Globular por gota	
B2	Globular Repelida	
C1	Aspersión por gota	
C2	Fluida	
C3	Rotacional	

Figura 2. 6. Diagrama de modos de transferencia de metal fundamentales en la gráfica de corriente vs voltaje, propuesta por Iordachescu y Quintino [4]: U_a voltaje del arco; U_0 voltaje de circuito abierto; I_w corriente del arco.



Como un aporte adicional los autores incluyen los MTM intercambiables como una nueva clase, los cuales se presentan en ciertas condiciones de soldadura (sin ninguna interferencia externa y con una fuente convencional), donde dos o más de los modos naturales ocurren en secuencias periódicas, estos modos de transferencia se presentan en las fronteras del mapa de modo de transferencia. La Figura 2. 7 muestra la nueva clasificación.

Figura 2. 7. Clasificación de los modos de transferencia de metal propuesta por Scotti et al, en el 2012 [5].



A pesar de que actualmente no existe un consenso general de la comunidad científica, ingenieril y técnica en el campo de la soldadura alrededor de alguna de las nuevas clasificaciones de modos de transferencia, es importante tomar de estos nuevos estudios algunos conceptos que se pueden verificar con las herramientas disponibles en el laboratorio y que servirán para la discusión de esta investigación. Particularmente, los modos de transferencia mezclados son un nuevo concepto que ayuda a explicar lo ocurrido en las fronteras entre los modos de transferencia “puros” y de esta manera a delimitar mejor las zonas más estables del proceso.

2.2.2. Teoría de transferencia de metal en GMAW: Balance de Fuerzas Estáticas

Los modos de transferencia de metal son afectados por los parámetros del proceso e involucran fenómenos complejos como el arco eléctrico y la transferencia de calor. En el caso del proceso GMAW los MTM se presentan en algunos casos con cierta regularidad y simetría axial, que ha incentivado a diferentes autores a proponer modelos teóricos para explicar el fenómeno de la transferencia de masa [3]. Una de los modelos propuestos mas aceptado por diferentes autores es la Teoría del Balance de Fuerzas Estáticas.

Ésta teoría afirma que una gota de metal fundido se desprende del electrodo cuando en el balance de las fuerzas estáticas, las fuerzas de desprendimiento superan a las fuerzas de retención, la ecuación (1) corresponde al balance general de las fuerzas involucradas. Las fuerzas de desprendimiento son: la fuerza gravitacional y la fuerza de arrastre por el flujo del plasma. Las fuerzas de retención son: la fuerza de tensión superficial y la fuerza de vaporización. La fuerza electromagnética puede ser de retención o de desprendimiento dependiendo del tamaño del "Spot" anódico (Superficie de conducción de la corriente para generar el arco). En el caso de soldaduras de acero se desprecia la fuerza de evaporación, tal como lo plantean Kim y Eagar [6].

(1)

$$F_s = F_g + F_{em} + F_d$$

Donde:

Fs: Fuerza de tensión superficial.

Fg: Fuerza de la gravedad.

Fem: Fuerza electromagnética.

Fd: Fuerza de arrastre.

La **fuerza de tensión superficial** está dada por la ecuación (2) y se da en la zona de formación del cuello, justo antes del desprendimiento. El cuello se forma cerca del electrodo, por lo tanto:

(2)

$$F_s = 2\pi r\gamma$$

Donde:

r: Radio del Electrodo

γ : Coeficiente de tensión superficial del metal fundido

La **fuerza de la gravedad** depende de la masa de la gota y es considerada de desprendimiento cuando se trabaja en posición plana. La ecuación (3) describe la fuerza de la gravedad para una gota de metal.

$$F_g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_g g$$

(3)

Donde:

R: Es el radio de la gota

ρ_g : La densidad de la gota

g: La aceleración de la gravedad

La **fuerza electromagnética** corresponde a la **fuerza de Lorentz**, que está dada por la ecuación (4). Esta fuerza puede ser de desprendimiento o de retención dependiendo de la convergencia o divergencia del flujo de corriente hacia la punta gota, donde se forma el “spot” anódico. La Figura 2. 8 muestra el sentido de la fuerza de acuerdo a la forma del flujo de corriente y la Figura 2. 9 muestra como el ángulo θ describe la zona de conducción. Esta fuerza es de desprendimiento cuando se tienen mezclas de gas de protección ricas en argón.

$$F_{em} = JxB \quad (4)$$

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_2 \quad (5)$$

Donde:

$$f_2 = \left[\ln \frac{R \sin \theta}{r} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right] \quad (6)$$

J: Densidad de corriente.

B: Flujo magnético.

I: Corriente de soldadura.

μ_0 : Permeabilidad magnética del espacio libre.

R: Radio de la gota.

r: Radio del electrodo.

θ : Angulo que describe el tamaño de la zona de conducción de corriente.

Figura 2. 8. Fuerza electromagnética actuando sobre un pequeño elemento de gota para un flujo de corriente divergente y convergente, respectivamente.

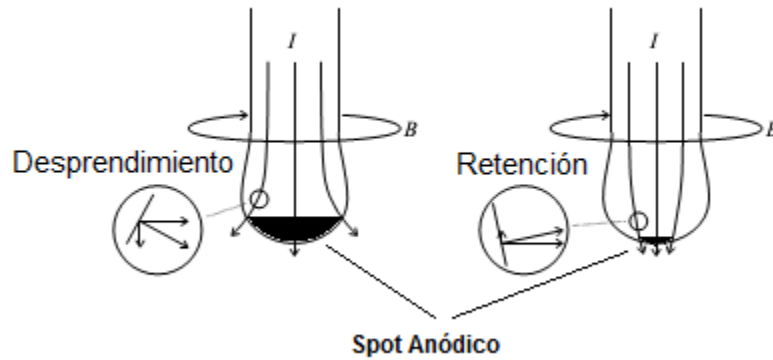
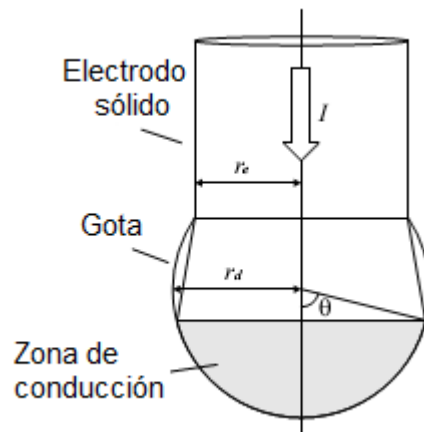


Figura 2. 9. Esquema del flujo de corriente en la zona de conducción de la gota, descrita por el ángulo θ .



La **fuerza de arrastre** se debe a la velocidad del plasma del arco y se estima haciendo una similitud con una esfera inmersa en un fluido, de acuerdo a la ecuación (7).

$$F_d = C_D A_P \left(\frac{\rho_F V_f^2}{2} \right) \quad (7)$$

Donde:

C_D : Es el coeficiente de arrastre.

A_p : Es el área proyectada de la gota en un plano perpendicular al flujo del fluido.

ρ_F : Es la densidad del fluido.

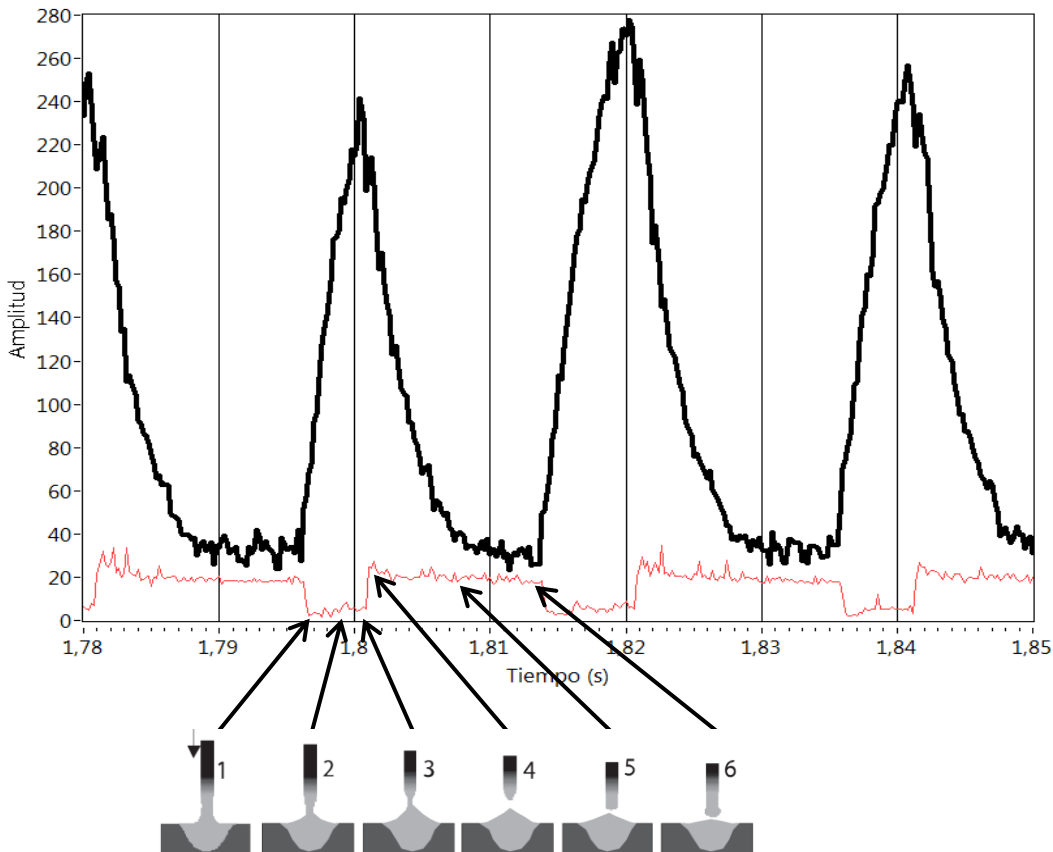
v_f : Es la velocidad del fluido.

Los modelos desarrollados para explicar la transferencia de metal predicen relativamente bien modos de transferencia particulares que se caracterizan por presentar una transferencia regular y axial (a lo largo del eje del electrodo), aunque partiendo de ciertos supuestos. Por otro lado, como se puede ver este modelo no tienen en cuenta ciertos parámetros, que se sabe influyen en los modos de transferencia de metal, como lo son el voltaje, la extensión del electrodo, las propiedades de los gases de protección (como la conductividad térmica y eléctrica), entre otros. Sin embargo, de esta teoría se pueden sacar conclusiones y explicación válidas para la discusión de este trabajo.

2.2.3. Transferencia de metal por cortocircuito

El modo de transferencia de metal por cortocircuito se caracteriza por un contacto periódico entre el electrodo y el charco de soldadura. En la Figura 2. 10 se muestra un esquema de la posición relativa entre el electrodo y el charco de soldadura durante el ciclo de transferencia de metal y el comportamiento de las señales de corriente y voltaje en el tiempo. El tiempo en el que el voltaje del arco se mantiene cercano a cero se conoce como tiempo de cortocircuito (instantes 1 a 3). Durante este tiempo el arco se extingue y la corriente aumenta desde el nivel de corriente de arco hasta un nivel máximo, que depende de las características del sistema (diámetro del alambre, material de aporte y de las características eléctricas de la fuente de potencia). Una vez el electrodo entra en contacto con el charco de soldadura, las principales fuerzas que actúan sobre la gota de metal fundido son la tensión superficial y la fuerza de estrangulamiento electromagnético que, en este caso, son de desprendimiento [5]. El periodo de extinción del arco y de desprendimiento de metal es pequeño comparado con el periodo de arco, sin embargo, en este modo de transferencia se produce un charco de soldadura de rápida solidificación y con una entrada de energía menor que en el caso de un modo de transferencia con arco abierto [7].

Figura 2. 10. Esquema de la posición del electrodo y el charco de soldadura para el modo de transferencia cortocircuito sincronizado con las señales de corriente y voltaje [8].

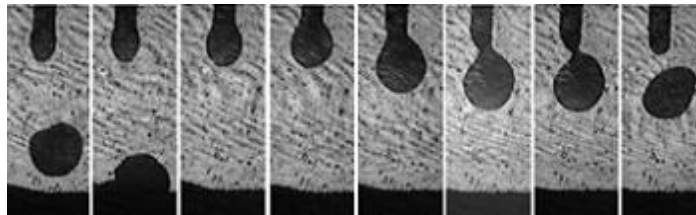


Durante el periodo de arco (instantes 4 a 6) el voltaje permanece constante en su valor máximo e inmediatamente se produce el desprendimiento de metal, la corriente comienza a caer hasta el nivel de corriente de arco. Este periodo corresponde al inicio del ciclo de transferencia de una nueva gota de metal ya que por medio del arco eléctrico se inicia la formación y crecimiento de la gota en la punta del electrodo y a su vez se calienta el charco de soldadura. Al final del periodo de arco se presenta el contacto de la gota con el charco de soldadura y de esta forma comienza un nuevo ciclo de cortocircuito.

2.2.4. Transferencia de metal globular

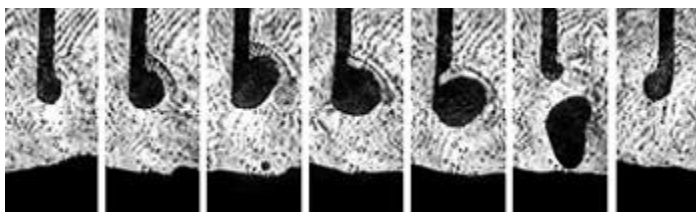
El modo de transferencia globular hace parte del grupo de los modos de vuelo libre. Las gotas de metal fundido alcanzan un diámetro de 1.5 a 3 veces el diámetro del electrodo y, para evitar el contacto con el charco de soldadura el voltaje debe estar en un nivel entre medio a alto en relación a los demás MTM. La tasa de transferencia de metal es del orden de 1 a 10 gotas por segundo. Como se observa en la Figura 2. 11, al inicio del ciclo de desprendimiento la gota de metal comienza a crecer y es retenida por la tensión superficial y de acuerdo a algunos autores por la fuerza de evaporación [6], [9]; con el posterior crecimiento de la gota la fuerza de la gravedad, la fuerza electromagnética y la fuerza de arrastre superan las fuerzas de retención y la gota se desprende.

Figura 2. 11. Secuencia de imágenes del modo de transferencia globular axial o estable [5].



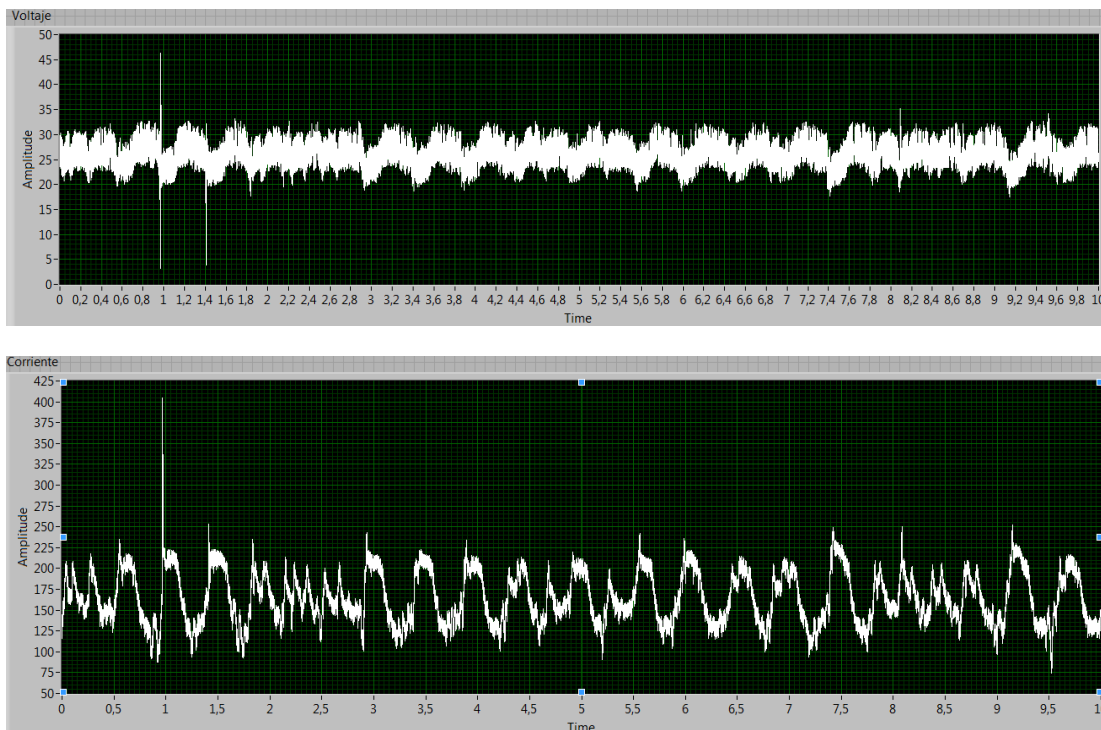
Como se describió en la anterior figura, este modo de transferencia se conoce como globular axial o globular estable, el cual se presenta en atmósferas protectoras ricas en argón. Cuando se cambia a mezclas de gas de protección ricas en dióxido de carbono ó helio y bajo ciertos parámetros de soldadura, la fuerza electromagnética se convierte en una fuerza de retención [6], produciendo un desprendimiento errático de la gota y en ocasiones ésta cae por fuera del charco de soldadura, (ver **Figura 2. 12**). A este modo de transferencia se le denomina globular repelida.

Figura 2. 12. Secuencia de imágenes del modo de transferencia globular repelida [5].



La Figura 2. 13 corresponde al registro de las señales de corriente y voltaje para el modo globular, se puede observar una variación regular de la corriente que es inversa a la variación del voltaje en el tiempo, debido a la variación de la longitud del arco durante la formación y desprendimiento de las gotas. En ningún momento el voltaje llega a ser cero, ya que en caso de alcanzar este valor, se estaría presentando una mezcla de los modos globular y cortocircuito. Es de resaltar que la corriente es la señal que tiene las mayores variaciones debido al uso de una fuente de potencia de voltaje constante típica de GMAW.

Figura 2. 13. Señal de voltaje y corriente para el electrodo ER100S1 para transferencia globular [10].



Aumentado la corriente y el voltaje de soldadura se alcanza el modo de aspersión fluida o en chorro, en estas condiciones la punta del electrodo toma una forma afilada aun más pronunciada que en aspersión proyectada y con un diámetro de gotas menor, como se puede observar en la Figura 2. 15.

Figura 2. 14. Modo de transferencia en aspersión proyectada [4]

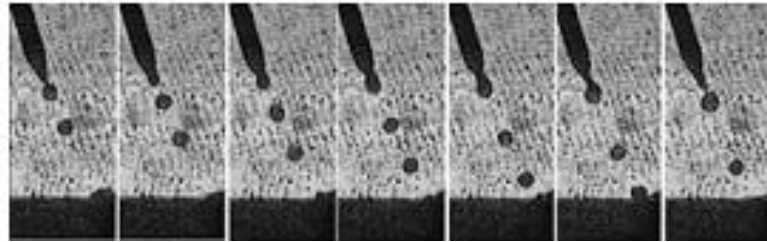
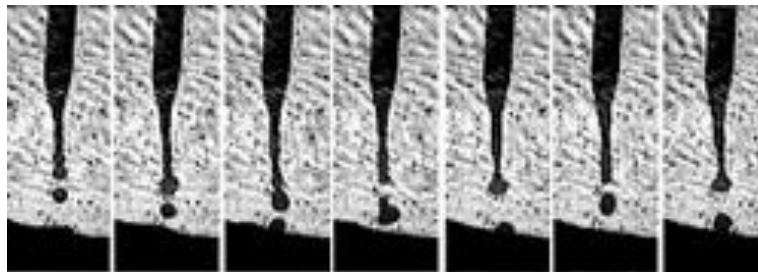
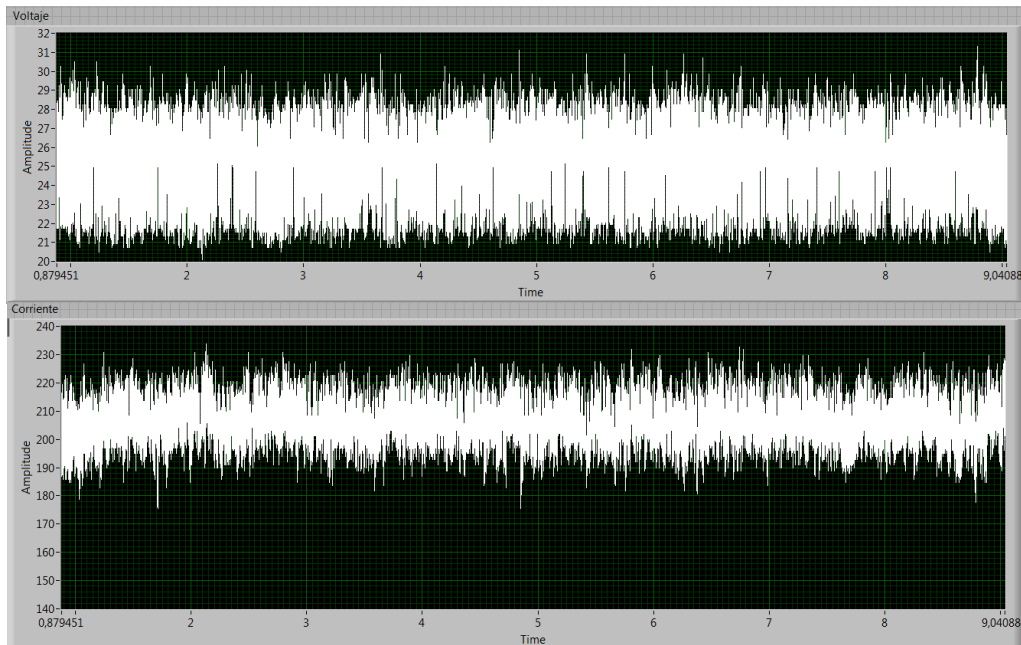


Figura 2. 15. Modo de transferencia en aspersión por chorro [5].



La Figura 2. 16 corresponde al registro de las señales de corriente y voltaje en el tiempo para el modo de transferencia por aspersión. A pesar que en la gráfica se usa una escala diferente para los ejes de corriente y voltaje, se puede observar que la variación es menor que en los demás modos. Las señales eléctricas para aspersión son generalmente más “planas” y uniformes en el tiempo, debido a las altas tasas de transferencia de gotas de pequeño diámetro, lo cual produce pequeños cambios en la longitud del arco que posiblemente son ocultados por el ruido capturado con los sistemas de adquisición de datos.

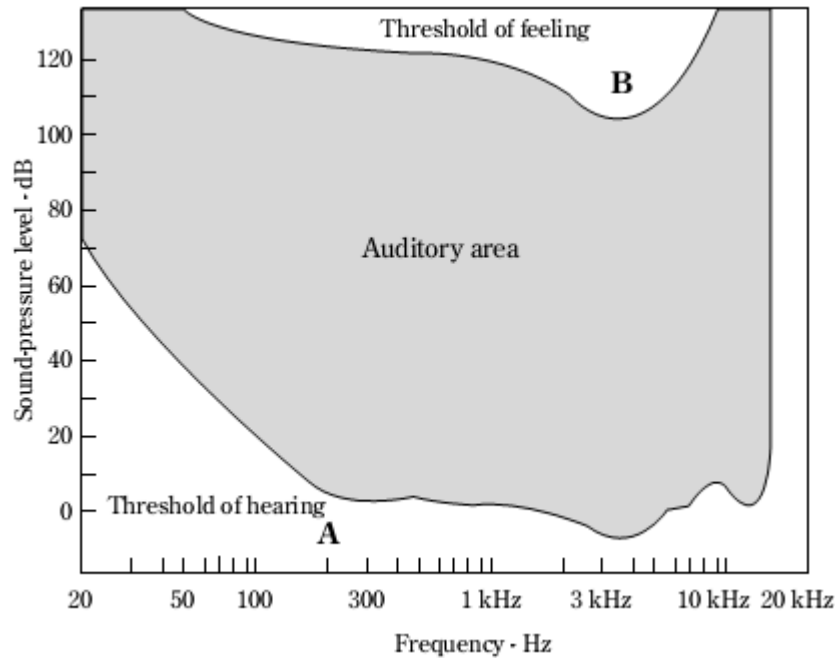
Figura 2. 16. Señal de voltaje y corriente del modo de transferencia por aspersion para el electrodo ER100S-1 [10].



2.3. Fundamentos de acústica y generación de sonido en el proceso GMAW

La Figura 2. 17 muestra el área de sonido audible por el ser humano, en un diagrama de nivel de presión sonora vs frecuencia. En este trabajo se estudia el sonido generado por el arco eléctrico en esta región, con la idea de cuantificar un fenómeno que ha sido evaluado de forma subjetiva por soldadores, supervisores e ingenieros porque se sabe que contiene información directa sobre las características del proceso de soldadura.

Figura 2. 17. Área de audición del oído humano, delimitada por el umbral de audición A de los sonidos más bajos que se pueden detectar y el umbral de dolor B [11].



Una onda sonora se produce por pequeñas variaciones periódicas en la presión de un medio. La fluctuación mínima en la presión a la cual el oído humano puede responder es del orden de 10^{-9} atmosferas. El umbral del dolor se encuentra aproximadamente en 10^{-3} atmosferas.

Para describir las variaciones de presión de las ondas sonoras se utiliza comunmente una escala logarítmica (Sound Preassure Level) SPL donde el nivel de presión esta dado por la ecuación (8)

$$\beta = 20 \text{ Log} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (8)$$

Donde:

β es el nivel sonoro (dB)

P es la amplitud en términos de la presión de la onda en (Pa)

P_0 es la presión de referencia y es igual a 2×10^{-5} Pa.

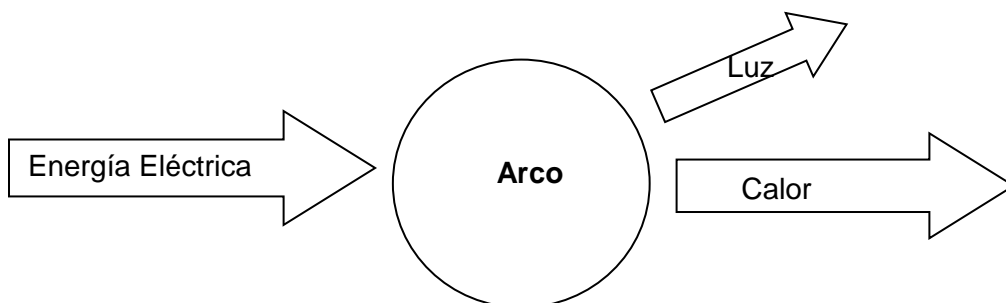
Como se puede notar en la, el nivel sonoro SPL es relativo, en este caso respecto a la presión atmosférica. El nivel cero de referencia para la presión de sonido en el aire es de

20 μ Pa, el cual usualmente es considerado como el umbral inferior de audición del ser humano. Lo que más interesa para caracterizar la señal acústica del proceso GMAW es la forma de la onda, su amplitud relativa y la distribución de frecuencias, así como el cambio de estas características en el tiempo, por lo tanto la medida absoluta de la presión acústica no es necesaria.

En general, un sonido puede ser descrito mediante tres características sensibles: la altura o Pitch, la sonoridad y el timbre. Estas se relacionan con tres características físicas: frecuencia, amplitud (presión) y composición armónica ó forma de la onda sonora. Básicamente, se conocen tres tipos de sonidos: sonidos simples sinusoidales, sonidos complejos con parciales armónicos y sonidos complejos con parciales no armónicos. Éste último tipo de sonido puede estar compuesto por parciales bien definidos que no guardan relaciones armónicas entre sí como los ruidos (sonidos conformados por una gran cantidad de frecuencias que se pueden ubicar en un ancho de banda determinado).

Un arco eléctrico puede ser visto como un proceso de conversión de energía, como se observa en la Figura 2. 18: la energía eléctrica suministrada al arco es convertida en calor y luz. Cuando un arco es estable en el tiempo, es decir su potencia es constante y nada cambia, muy poco o ningún sonido es producido. Para generar sonido es necesario entonces producir un movimiento de algún tipo en las moléculas de aire que rodean el arco. De esta forma, igual que un parlante, cuando la energía eléctrica varía se genera sonido debido a los cambios en la geometría del arco, los cuales son cambios en el volumen del plasma [12].

Figura 2. 18. Transformación de la energía en un arco estable.



Desde la de década de 1940 se sabe que existe una relación directa entre el sonido, el voltaje, la longitud del arco y la corriente del arco; los diferentes intentos para cuantificar el sonido del arco han llegado a determinar que por cada pulso o cambio en la energía de entrada una onda de sonido se genera [13]. De esta forma, la presión de sonido generada por el arco puede ser expresada por la ecuación (9)

$$S(t) = C \frac{d(VI)}{dt} \quad (9)$$

Donde:

S: Presión de sonido

V: Voltaje del arco

I: Corriente del arco

C: Constante

VI: Potencia del arco

De aquí se puede notar que la presión acústica variará siempre que existan cambios súbitos del voltaje y la corriente del arco en el tiempo.

La constante C es un factor de proporcionalidad, que en el caso de una propagación de onda esférica está dada por la ecuación (10) y depende de un factor geométrico α , del coeficiente de expansión adiabático y de la velocidad del sonido c. Para una mayor ampliación sobre el tema, se puede revisar el estudio realizado por Horvat et al [14].

$$C = \alpha (k - 1)/c^2 \quad (10)$$

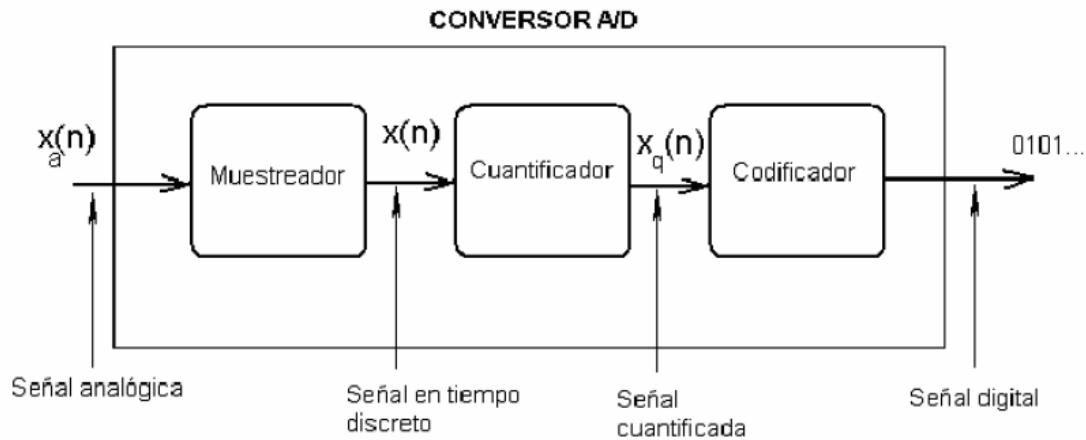
2.4. Procesamiento de las señales del arco

En el proceso GMAW las principales señales adquiridas son la corriente, el voltaje y la presión acústica. Estas son básicamente funciones de la variable tiempo que representan los cambios en voltaje de los sensores que se estén usando (un micrófono, un sensor de efecto Hall ó el voltaje del arco directamente). Dichas variables son de tipo analógico, ya que pueden asumir un número infinito de valores en un intervalo de tiempo dado. La

forma de registrar y procesar una señal es digitalizándola, es decir, tomando valores discretos tanto en la variable dependiente como en la independiente.

El proceso de conversión de una señal análoga a digital consta inicialmente de una etapa de muestreo donde se toman muestras de la señal original en diferentes instantes de tiempo. Luego, hay una etapa de cuantificación donde la muestra tomada de la señal se aproxima a un valor, el cual se selecciona de un conjunto de valores posibles. Finalmente, está la etapa de codificación, donde los valores cuantificados se codifican en una secuencia binaria de bits. En la Figura 2. 19 se describe el proceso de conversión de la señal.

Figura 2. 19. Conversión de una señal análoga a una señal digital.



Para que la señal digital sea una representación fiel de la señal original, es necesario utilizar una tasa de muestreo que cumpla la condición $F_s > 2F_{max}$. Donde F_{max} es la mayor componente en frecuencia de la señal análoga que se desea muestrear. La frecuencia de muestreo $F_N = 2F_{max}$, se conoce como la frecuencia de Nyquist.

3. Estado del arte

En este capítulo se revisan los avances logrados y las metodologías desarrolladas hasta el momento por los diferentes investigadores para el uso de las señales eléctricas y acústicas como fuente de información sobre el comportamiento del proceso GMAW y la calidad de las uniones soldadas. El capítulo está dividido en cuatro partes: la primera aborda las señales acústicas, la segunda parte las señales eléctricas, en la tercera parte se revisan los estudios sobre la estabilidad del proceso GMAW en el modo de transferencia por cortocircuito y en la última parte se incluye una síntesis del estado del arte.

3.1. Estudios de las señales acústicas en el proceso GMAW

Es habitual que un soldador o personal experimentado ajuste los parámetros de soldadura por medio del sonido que escucha durante la utilización del proceso, de tal forma que se obtengan las condiciones que produzcan un sonido particular y con el menor cambio de este en el tiempo [15]. Desde la década de 1960, se conocen diferentes estudios que han demostrado que las ondas acústicas generadas en los procesos de soldadura por arco eléctrico contienen información directa sobre la estabilidad, la transferencia de masa y el comportamiento del charco de soldadura. Los sensores utilizados para capturar las ondas acústicas en un proceso de soldadura comprenden los micrófonos, que capturan las ondas que se propagan por el aire, y los sensores de emisión acústica, que pueden capturar las ondas que viajan a través del metal base.

Los micrófonos son los sensores más simples y están entre los que mejor soportan el ambiente hostil de la soldadura por arco, caracterizado por una elevada temperatura, por la generación de humos, la formación de salpicaduras, etc. Adicionalmente, otras ventajas de este tipo de sensores es la capacidad de capturar la dinámica del proceso, pues se pueden realizar muestreos de las señales acústicas a altas velocidades, que

permiten realizar una inspección no destructiva de la soldadura en tiempo real y de forma externa al proceso [16], [15].

En las revisiones bibliográficas hechas en las investigaciones de Grad et al [15], Kamal et al [16] y de Cudina et al [17] se puede identificar de forma general y cronológicamente el estudio de señales acústicas en los procesos de soldadura por arco eléctrico. Los primeros estudios fueron hechos para correlacionar el sonido con los parámetros de los procesos. El primer estudio publicado sobre las ondas acústicas en el proceso GMAW fue realizado por Erdmann-Jesnitzer et al (1967) [18], quienes encontraron que la presión acústica aumenta con el incremento en el voltaje y la corriente de soldadura y que las ondas acústicas están sincronizadas con el modo de transferencia por cortocircuito. Otros importantes hallazgos que se pueden identificar en estas recopilaciones bibliográficas, aunque no se tuvo acceso a las fuentes originales son; el desarrollo de una técnica de monitoreo de la longitud del arco con un voltímetro acústico para hornos de arco y soldadura por arco en 1982; el uso de las señales acústicas para el monitoreo en línea del proceso de soldadura de arco sumergido (SAW), en 1983; y en 1996, se establecieron las bases teóricas y experimentales de las señales acústicas del arco para el monitoreo de GMAW en ambientes industriales.

Más recientemente Saini y Floid (1998) [12], estudiaron las señales acústica del proceso GMAW en soldaduras de acero al carbono para evaluar la posibilidad de usarlas en la detección de discontinuidades. Ellos propusieron caracterizar las señales de dos maneras, la primera consistió en hacer un análisis cualitativo de la forma de la señal y la segunda en hacer un análisis cuantitativo tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. En el caso del modo de transferencia por cortocircuito, la forma de la señal consta de una serie de fuertes pulsos que ocurren con un modelo regular, a diferencia de la señal de aspersion, que es mucho más suave y con la presencia ocasional de crepitaciones. En el análisis cuantitativo, encontraron que en el dominio del tiempo algunos de los parámetros que ellos propusieron no eran muy eficientes para caracterizar la señal acústica del proceso y compararla con una señal de referencia (la proveniente de una soldadura de “buena calidad”), en cambio, encontraron que el análisis en el dominio de la frecuencia ofrece una mayor posibilidad para caracterizar el proceso. Sin embargo, a nivel experimental, aunque los autores no reportaron todas las variables

esenciales de soldadura usadas, los parámetros de velocidad de alimentación y voltaje no corresponden con los rangos del modo de transferencia de metal por cortocircuito, para un alambre de acero al carbono cuando se suelda con los gases de soldadura normalmente usados. En el estudio de Pires et al [9], se encuentran los mapas de modos de transferencia de este electrodo para diferentes condiciones, con lo cual se puede hacer una idea del comportamiento de los MTM del proceso.

Ladislav Grad et al (2004) [15], estudiaron las señales acústicas durante el proceso GMAW y fueron relacionadas con la señal de corriente, para dos gases de protección (CO₂ y una mezcla 90% Ar + 10% CO₂), dos materiales base (acero de bajo carbono y acero de medio carbono) y un cambio en la distancia entre el tubo de contacto y la pieza (al soldar en una placa inclinada). En este estudio se mostró como los picos de la señal acústica están sincronizados con los de corriente, como se observa en la **Figura 3. 1**. Los autores afirman que el sonido es generado por varias causas: los cambios en las dimensiones y la geometría del arco (debido al cortocircuito), la transferencia de metal y la oscilación del charco de soldadura.

En la Figura 3. 2 [15], se muestran las señales de corriente y de sonido (el micrófono entrega un voltaje) en detalle para un solo cortocircuito. En esta gráfica se observa que hay dos picos significativos de sonido: el primero corresponde al contacto entre el material de aporte y el charco de soldadura (extinción del arco), el otro corresponde al reinicio del arco. Se puede observar que existe una diferencia significativa en la amplitud de los dos picos de sonido: el pico del reinicio del arco es cerca de 10 veces mayor que el de la extinción del arco.

Figura 3. 1. Señales de corriente y voltaje del proceso GMAW en cortocircuito [15].

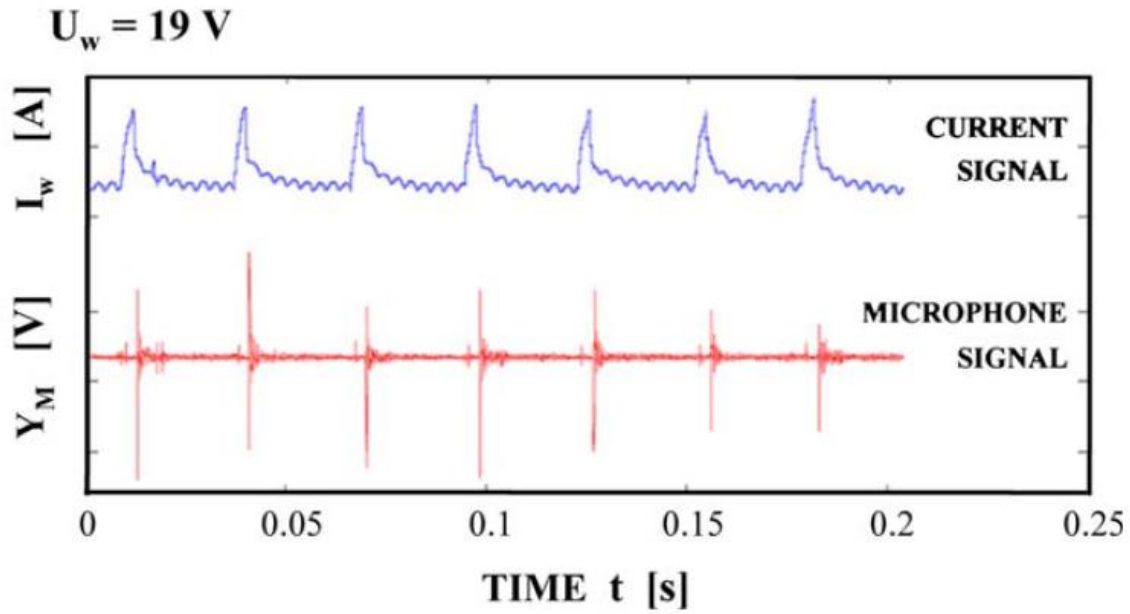
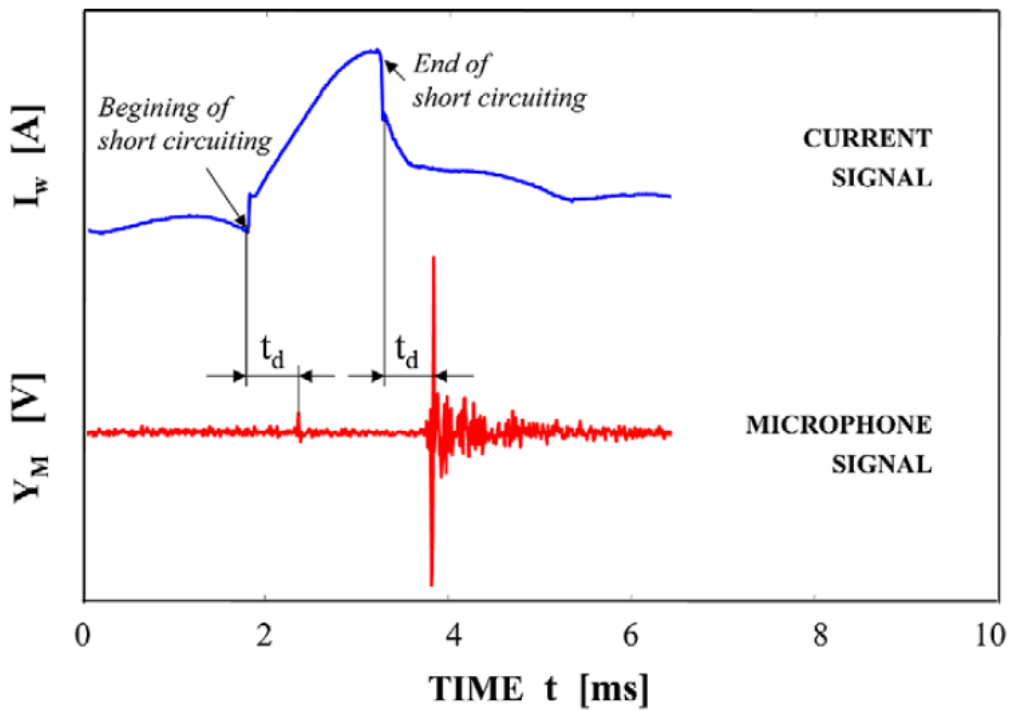


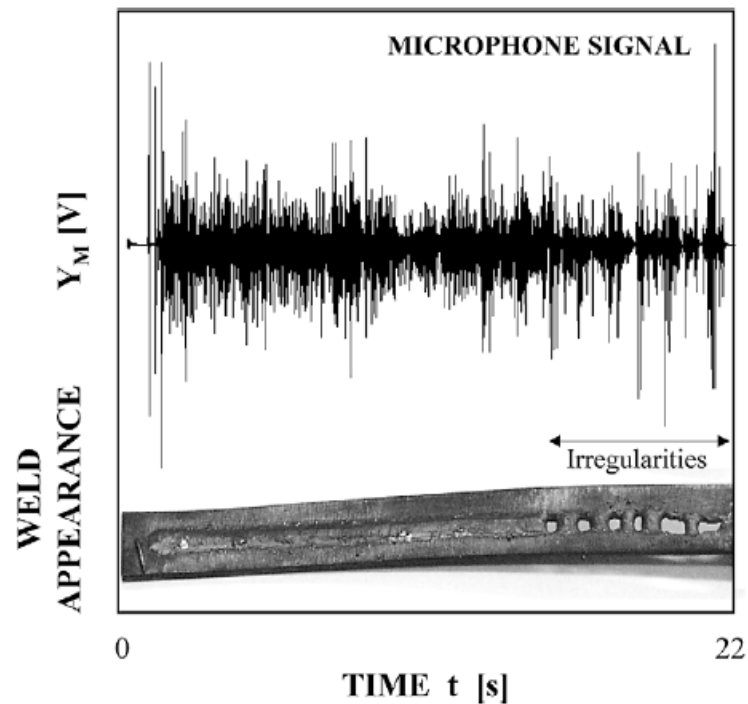
Figura 3. 2. Detalle de la señal acústica y de la señal de corriente para un cortocircuito [15].



El tiempo t_d corresponde al tiempo de retraso de la señal acústica respecto a la señal eléctrica, debido a la distancia que recorre el sonido desde el arco hasta el micrófono (30 cm en este caso). En este trabajo, también se encontró que cuando se suelda con corrientes más altas, los picos en la señal acústica debidos al reinicio del arco tienen una mayor amplitud. En este sentido, la mayor intensidad en el reinicio depende de la longitud de la columna del arco, la cual está relacionada con el potencial de ionización del gas de protección. Con la mezcla 90%Ar + 10% CO₂ se alcanzaron las mayores corrientes y en consecuencia las mayores amplitudes en la señal acústica. Los autores observaron también que hay un aumento en la amplitud del sonido con el aumento de la extensión del electrodo.

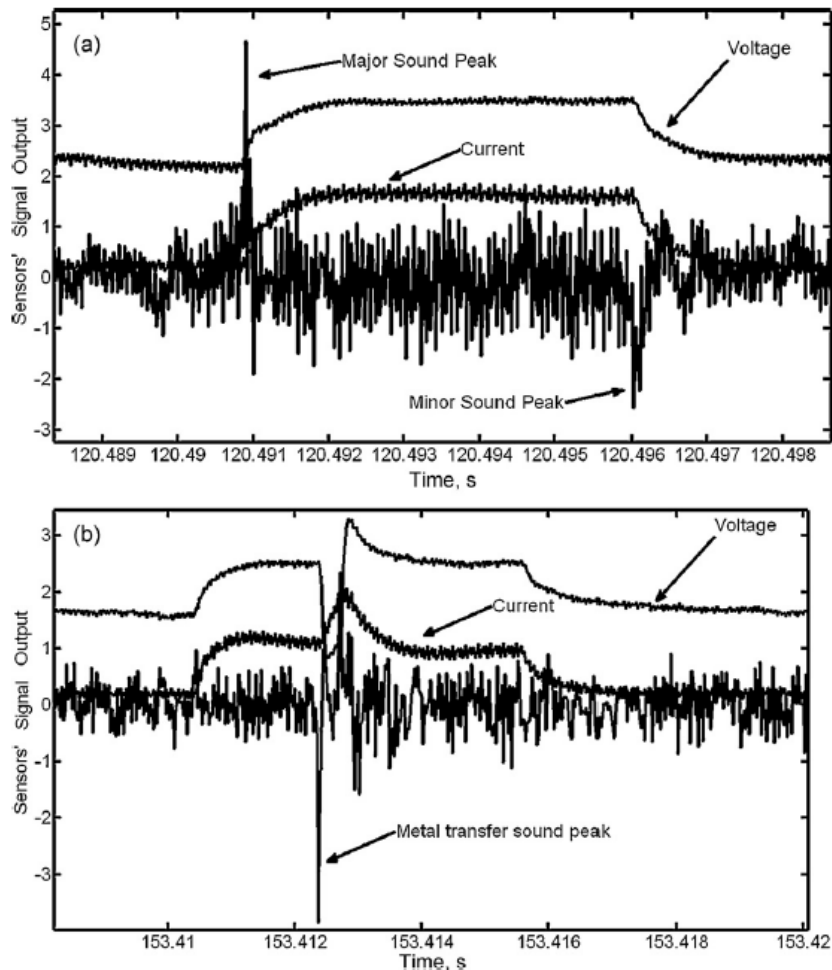
Finalmente, en este trabajo se encontró que algunas discontinuidades en las soldaduras (cambios en la forma del cordón que pueden producir soldaduras defectuosas) muestran claramente cambios en la señal acústica, los cuales pueden ser detectados, como se observa en la Figura 3. 3.

Figura 3. 3. Cambios en la forma de la señal acústica que correspondientes a la presencia de discontinuidades en la soldadura [15].



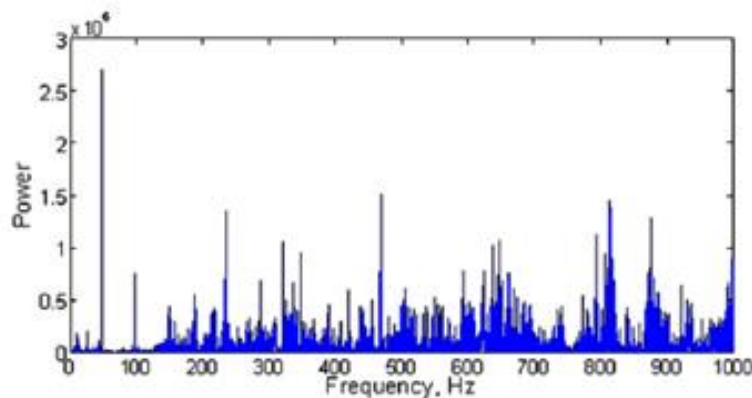
Kamal et al (2010) [16], investigaron las señales acústicas de los procesos GMAW y GMAW-P (pulsado), utilizaron acero al carbono como metal base, alambre ER70S-6 de 1.2 mm de diámetro y argón 100% como gas de protección. La señal fue analizada en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Uno de los mayores picos de sonido fue observado en el punto de “reinicio del arco”, cuando se pasa de corriente base a corriente pico, similar al proceso GMAW en cortocircuito. De igual forma se observó también un pico de sonido durante el cambio de corriente pico a corriente base. Pero, en el caso de voltajes bajos este menor pico no se observó y es del mismo nivel que el sonido producido por las demás fuentes de ruido durante el proceso tales como la generación de salpicadura, la transferencia de metal, etc, como se muestra en la Figura 3. 4.

Figura 3. 4. Presencia de picos de sonido en GMAW-P, en el caso de (a) Voltaje alto y (b) Voltaje bajo [16].



Para el análisis de la señal en el dominio del tiempo se calculó la curtosis y el valor RMS, estos parámetros arrojaron que una curtosis alta corresponde con un modo de aspersion y una baja puede ser o globular o una condición inestable del proceso. Sin embargo, no se demuestra en el trabajo una fuerte relación entre estos parámetros y la estabilidad del proceso, así como los valores de referencia en el caso de una soldadura estable para poder tener un punto de partida. En el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia, se encontraron varios picos que fueron relacionados con el modo de transferencia y la estabilidad del proceso. En el proceso GMAW se encontraron varios picos de baja frecuencia que fueron relacionados con la frecuencia de transferencia de metal (50-100 Hz), como se muestra en la Figura 3. 5, la cual corresponde a la distribución de la densidad espectral de potencia (PSD) en el dominio de la frecuencia.

Figura 3. 5. Gráfica de la densidad espectral de potencia del modo de transferencia por aspersion [16].

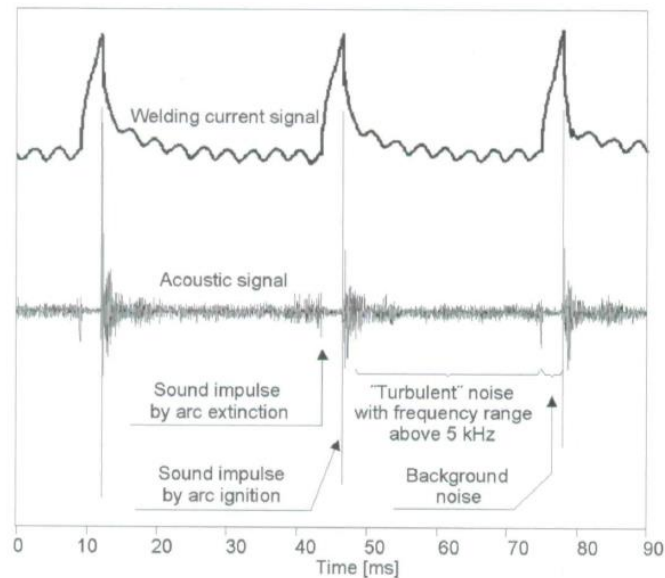


Por último en este trabajo los autores encontraron un cambio de la señal en la presencia de porosidad, que fue obtenida en uno de los cordones, encontrando que hay una variación significativa en la curtosis justo en la región del defecto de soldadura. Sin embargo, no se analizó el sonido en el dominio de la frecuencia, para caracterizar mejor el defecto y la perturbación generada en la señal.

Horvat et al (2011) [14], estudiaron la relación entre la corriente, el voltaje y el sonido del arco en GMAW para acero al carbono, alambre ER70S-6 de 1.2mm de diámetro y 82% Ar and 18% CO. En su trabajo explicaron y caracterizaron el sonido en un ciclo de cortocircuito. Encontraron que aparte de los impulsos de sonido debidos al inicio y a la extinción del arco, existe un ruido de una amplitud mucho menor que llamaron “ruido turbulento”, el cual es generado por diferentes fenómenos como las oscilaciones del arco,

del charco de soldadura y del electrodo. Además, existe un ruido base que se puede apreciar justo en el periodo de cortocircuito. En la Figura 3. 6, se muestran los diferentes sonidos durante la transferencia por cortocircuito, sincronizados con la señal de corriente.

Figura 3. 6. Diferentes sonidos producidos durante la transferencia por cortocircuito [14].



Los autores mostraron que en ambientes industriales, existe un ruido base causado por fuentes secundarias, en este caso, tanto el sonido debido a los impulsos, como el sonido turbulento del arco pueden ser afectados por el ruido base. Sin embargo, si la diferencia entre los niveles de presión del ruido base y del proceso es mayor a 10 DB (el sonido del proceso es el más alto), así que el efecto del ruido base puede ser despreciable.

3.2. Estudios de las señales eléctricas en el monitoreo del proceso GMAW

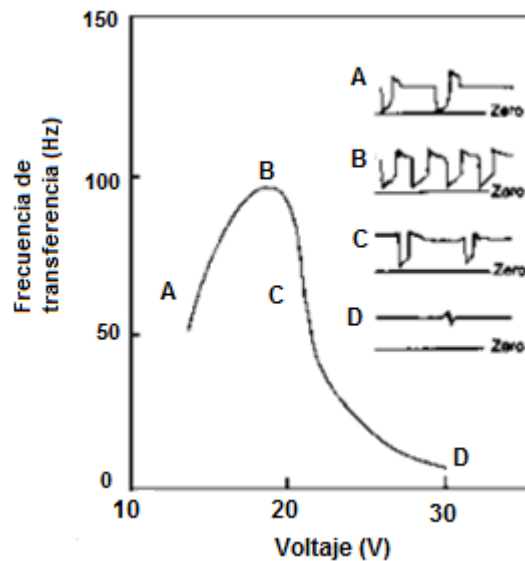
En general, la adquisición de las señales de corriente y voltaje del arco en los procesos de soldadura son la medida más directa del comportamiento del proceso, ya que el arco mismo es el principal descriptor de los fenómenos presentes en la aplicación de soldadura, que en el caso del proceso GMAW, está relacionado directamente con el

fenómeno de transferencia de masa y además brinda la posibilidad de detectar alteraciones externas al proceso que pueden afectar la calidad.

En estudios de transferencia de masa, verificación de modelos y de estabilidad de procesos de soldadura por arco, las señales eléctricas junto con cámaras de alta velocidad son las principales herramientas usadas [6], [9] y [7].

Adolfsson et al (1999) [19], plantearon un algoritmo basado en la detección de variaciones de los parámetros estadísticos del proceso para detectar cambios en la calidad de las soldaduras de forma automática, con base en la observación de que la varianza de la amplitud del voltaje disminuye cuando el proceso tiene una baja estabilidad. Este algoritmo es explicado por medio de la Figura 3. 7, donde se puede observar el cambio de la amplitud en la señal de voltaje, conforme cambia la frecuencia

Figura 3. 7. Frecuencia o tasa de cortocircuito Vs voltaje en el tiempo de arco y forma de la señal [19].



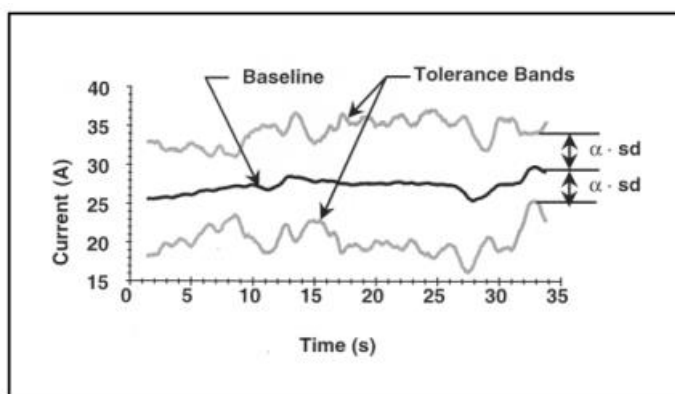
de transferencia de metal, la cual puede indicar tanto el modo de transferencia como la estabilidad del proceso.

Quinn et al (1999) [20], usaron las señales de corriente y voltaje del arco para la detección de defectos de soldadura de GMAW en aplicaciones automatizadas, ellos desarrollaron varios algoritmos que a partir de las señales la corriente y voltaje del arco

calculan de forma automática parámetros de calidad como: el voltaje promedio, la desviación estándar del voltaje, la resistencia eléctrica promedio, la desviación estándar de la resistencia, la corriente promedio, la desviación estándar de la corriente, la frecuencia de cortocircuito y la desviación estándar de la frecuencia.

Para identificar los defectos el algoritmo compara los registros de la soldadura actual con un registro patrón, el cual fue tomado de una soldadura libre de defectos, y se determina un umbral que es una fracción de la desviación estándar o del parámetro (α x desviación estándar), como se describe en la Figura 3. 8.

Figura 3. 8. Descripción del algoritmo usado por Quinn et al para la detección de defectos de soldadura [20].



En este sentido, cuando el parámetro de calidad está por fuera de las bandas de tolerancia establecidas, se alerta la presencia de un posible defecto en la soldadura. Finalmente, los autores encontraron que el algoritmo propuesto es sensible a defectos como sobre penetración (“melt - through”) de la junta, pérdida de protección del gas y superficies de la junta con capas de aceite o pintura que pueden causar porosidad.

Chu et al (2004) [21], trabajaron con alambre de acero de 0.9 mm de diámetro y una atmosfera de 75% Ar + 25% CO₂ y encontraron que existe una frecuencia de cortocircuito máxima dependiente de la velocidad de alimentación, y que no varía con la velocidad de aplicación con la cual se logran las soldaduras de mejor calidad. Ellos trabajaron con el análisis en el tiempo y la frecuencia de las señales de voltaje y corriente, y probaron la efectividad de este método para ayudar a refinar los parámetros del proceso y a identificar posibles defectos de la soldadura.

Luksa (2006) [22], estudió el efecto de diferentes perturbaciones en el proceso GMAW cortocircuito para un alambre ER70S-6 de 1.2 mm de diámetro y una mezcla de 82% Ar + 18% CO₂, con una corriente entre 120 y 130 amperios y 18 Voltios. Para diferentes perturbaciones promovidas en el proceso, se analizaron las señales de corriente y voltaje, así como la potencia del arco (Producto $I \cdot V$) y la resistencia del arco (Cociente V/I). El autor encontró que las señales de corriente y voltaje no representan completamente el fenómeno térmico de la soldadura, el cual es esencial para la estabilidad del proceso. En cambio, la potencia y la resistencia del arco representan el componente térmico del proceso de soldadura.

Además, Luksa determinó que las perturbaciones que afectan la atmosfera protectora como capas de pintura o grasa e interrupción del gas de protección, son detectadas por las señales registradas debido a que cambian las propiedades del gas de protección, como el potencial de ionización, su composición química, entre otras. Mientras que las perturbaciones que cambian la extensión del electrodo, pueden no ser reconocidos en el registro de la señal cuando los cambios generados no son lo suficientemente grandes. Sin embargo, no todas las señales registradas reaccionan con la presencia de las perturbaciones. Por lo que es necesario usar varias señales en conjunto para aumentar las posibilidades de detección.

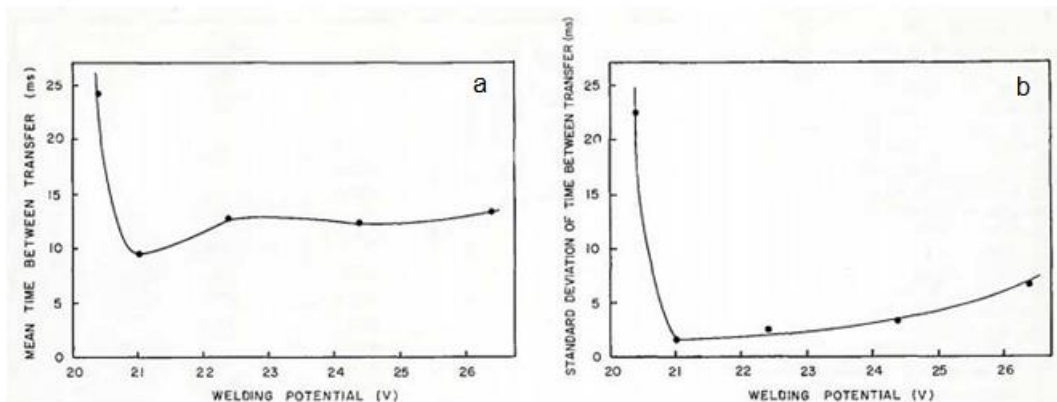
3.3. Estabilidad del proceso GMAW-cortocircuito

Los principales síntomas que indican la pérdida de estabilidad en el proceso de soldadura GMAW por cortocircuito, que se pueden identificar externamente o después de la aplicación de las soldaduras, son la intensa salpicadura, el frecuente “tropiezo” del electrodo con el charco de soldadura donde no hay desprendimiento de metal (conocido como “stubbing”) y la explosión del metal fundido del electrodo [22]. Estos criterios son cualitativos y, en ocasiones se convierten en una forma poco efectiva para determinar la estabilidad del proceso, además que brindan poca información sobre las causas del problema.

Investigaciones recientes de la estabilidad del proceso de soldadura, evalúan principalmente las características de las señales registradas durante la aplicación de la soldadura. Diferentes parámetros estadísticos de las señales eléctricas en los dominios del tiempo y la frecuencia se usan para definir los criterios de estabilidad.

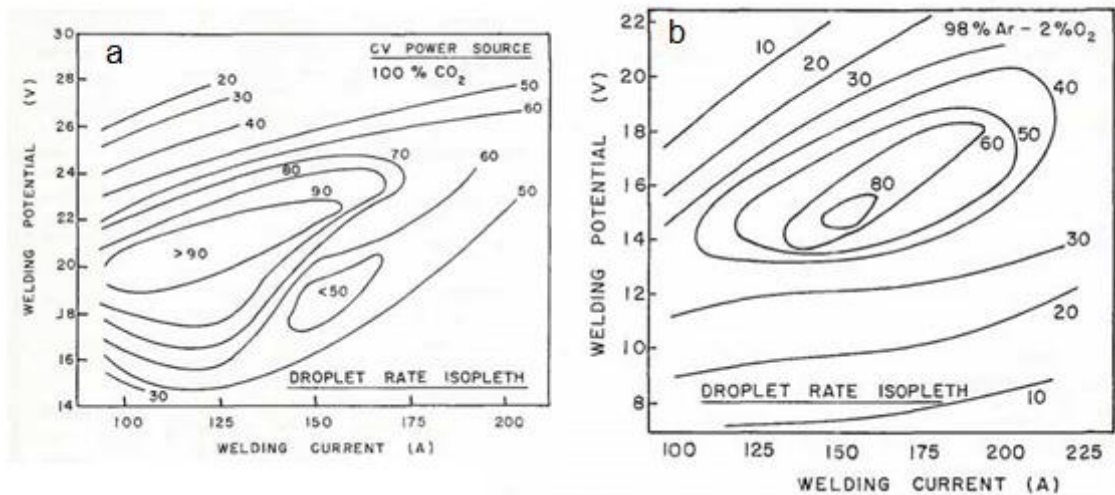
Liu y Siewert (1989) [23], estudiaron el cambio en la frecuencia de goteo para el proceso GMAW cuando se varía la corriente y el voltaje, para un alambre ER70S-1 de 1.2 mm de diámetro, con 100 CO₂ y la mezcla 98% Ar + 2% O₂. Los autores encontraron que el desempeño del proceso de soldadura puede ser descrito por la variación estadística del periodo del ciclo de transferencia o la tasa de goteo. Entre los parámetros estadísticos examinados, la media y la desviación estándar del periodo de transferencia son los que mejor caracterizan la estabilidad del proceso y hallaron que cuando el tiempo medio de cortocircuito alcanza el valor mínimo (máxima frecuencia de cortocircuito), la desviación estándar también es mínima. Lo anterior indica que la población de tiempos de cortocircuito tuvo una distribución pequeña o estrecha y que el proceso fue menos errático que con otros valores de voltaje. La Figura 3. 9 corresponde a la gráfica del periodo promedio de cortocircuito y de la desviación estándar del periodo en función del voltaje, para una velocidad de alimentación fija. Se puede observar que para el periodo de cortocircuito mínimo (es decir la frecuencia máxima, la frecuencia calculada como el inverso del periodo) la desviación estándar del periodo también es mínima.

Figura 3. 9. Grafica de (a) periodo promedio de cortocircuito y (b) desviación estándar del periodo de cortocircuito en función del voltaje [23].



Para ver el efecto de los parámetros de soldadura en la transferencia Liu y Siewert elaboraron mapas con las isopletas de la frecuencia de goteo. En la Figura 3. 10 se grafican estos mapas, donde se pueden identificar las regiones de operación de corriente-voltaje correspondientes a las máximas frecuencias de goteo.

Figura 3. 10. Mapas de frecuencia para dos gases de protección, frecuencia en Hz [23].



Hermans y Den Ouden (1999) [7], correlacionaron la estabilidad del proceso con la frecuencia máxima de cortocircuito y la compararon con la frecuencia de oscilación del charco de soldadura calculada a través del modelo de Sorensen y Eagar [24], y encontraron que cuando estas dos frecuencias son iguales se obtiene la máxima estabilidad del proceso. Y cuando se obtiene la máxima frecuencia de cortocircuito, la desviación estándar de esta es mínima, convirtiéndose la desviación estándar en otro criterio para la estabilidad del proceso. En la recopilación de Luksa (2006) [22], se identifican otros criterios de estabilidad como la variación del intervalo de tiempo entre una gota y otra, la desviación estándar de la corriente pico en el cortocircuito, la densidad de probabilidad de los parámetros de soldadura, la desviación y el valor medio del tiempo de arco y el tiempo de cortocircuito. También han definido diferentes parámetros como los coeficientes de variación que consisten en el cociente de la desviación estándar y el valor medio, siendo el rango de parámetros del proceso en los que el coeficiente de variación alcanza el valor mínimo el más estable.

3.4. Síntesis del estado del arte

En el tema de las señales acústicas, se puede concluir que los estudios se han restringido a soldaduras “Bead On Plate” de aceros al carbono con mezclas de gas de protección consistentes en 100% CO₂ y Ar + CO₂ (hasta 20%). Los parámetros seleccionados en los diferentes experimentos no coinciden con las zonas de mayor estabilidad del proceso, por lo que los estudios de estabilidad por medio del sonido quedan incompletos y no permiten tener un nivel de referencia para entrar a estudiar cambios en la magnitud y forma de las señales debidas a la aparición de las discontinuidades. En la tabla 3.1 se ilustra el resumen del estado del arte, en color rojo aparecen los campos de trabajo que aún no se han investigado y en verde los estudios que ya se han hecho. Sin embargo, los diferentes autores han propuesto metodologías válidas para el análisis de las señales acústicas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Tabla 3. 1. Resumen de los estudios realizados en soldaduras GMAW de aceros al carbono (ER 70S-6, ϕ 1.2mm) con las Señales E & A

Herramienta	Detección discontinuidades	Estabilidad del proceso	BOP	Junta	Gas de protección	
					100% CO ₂	Ar + CO ₂ (<20%)
Señales Eléctricas	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Señales Acústicas	Verde	Rojo	Verde	Rojo	Verde	Verde

Con las señales de corriente y voltaje hay un avance mayor, pues se reportan estudios de soldaduras en juntas con diferentes tipos de perturbaciones. Sin embargo, se encontró que solo se han explorado aceros al carbono con gases de protección iguales

que los utilizados en las señales acústicas. Por otro lado, también se puede concluir que los estudios de estabilidad del proceso se encuentran aislados de los estudios encaminados a la detección de discontinuidades por medio de estas señales pues, igual que con las señales acústicas los parámetros de las soldaduras en junta no se han seleccionado de acuerdo a los estudios de estabilidad reportados.

En el presente trabajo se plantea combinar las dos tendencias de estudios, acústicos y eléctricos para, determinar inicialmente las mejores condiciones de soldadura y caracterizar las señales acústicas y eléctricas de referencia para, posteriormente, compararlas con las señales registradas en los puntos donde hay presencia de perturbaciones y/o defectos de soldadura. Además, como un nuevo aporte de esta línea de investigación, se realizarán las soldaduras con un gas de protección 75% Ar + 25% CO₂, que es una mezcla binaria comercial de amplio uso en el país para la cual no se reportan estudios de este tipo.

Se deben incluir tantos capítulos como se requieran; sin embargo, se recomienda que la tesis o trabajo de investigación tenga un mínimo 3 capítulos y máximo de 6 capítulos (incluyendo las conclusiones).

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Determinar la relación de las señales acústicas y eléctricas del proceso GMAW con la calidad de las soldaduras.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar y procesar las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW.
- Seleccionar los criterios de estabilidad para el proceso GMAW verificables con las señales eléctricas y acústicas del proceso.
- Identificar el tipo de discontinuidades detectables por medio de las señales eléctricas y acústicas.

5. Materiales y métodos

En el presente capítulo se describe la metodología, los equipos y montajes usados en el desarrollo experimental de este trabajo. Inicialmente, se muestra mediante un diagrama de flujo con la secuencia de pasos necesarios para cumplir con los objetivos propuestos. Una vez esbozado el panorama experimental, se describen en detalle los equipos y montajes utilizados, para finalmente se explicar los experimentos realizados.

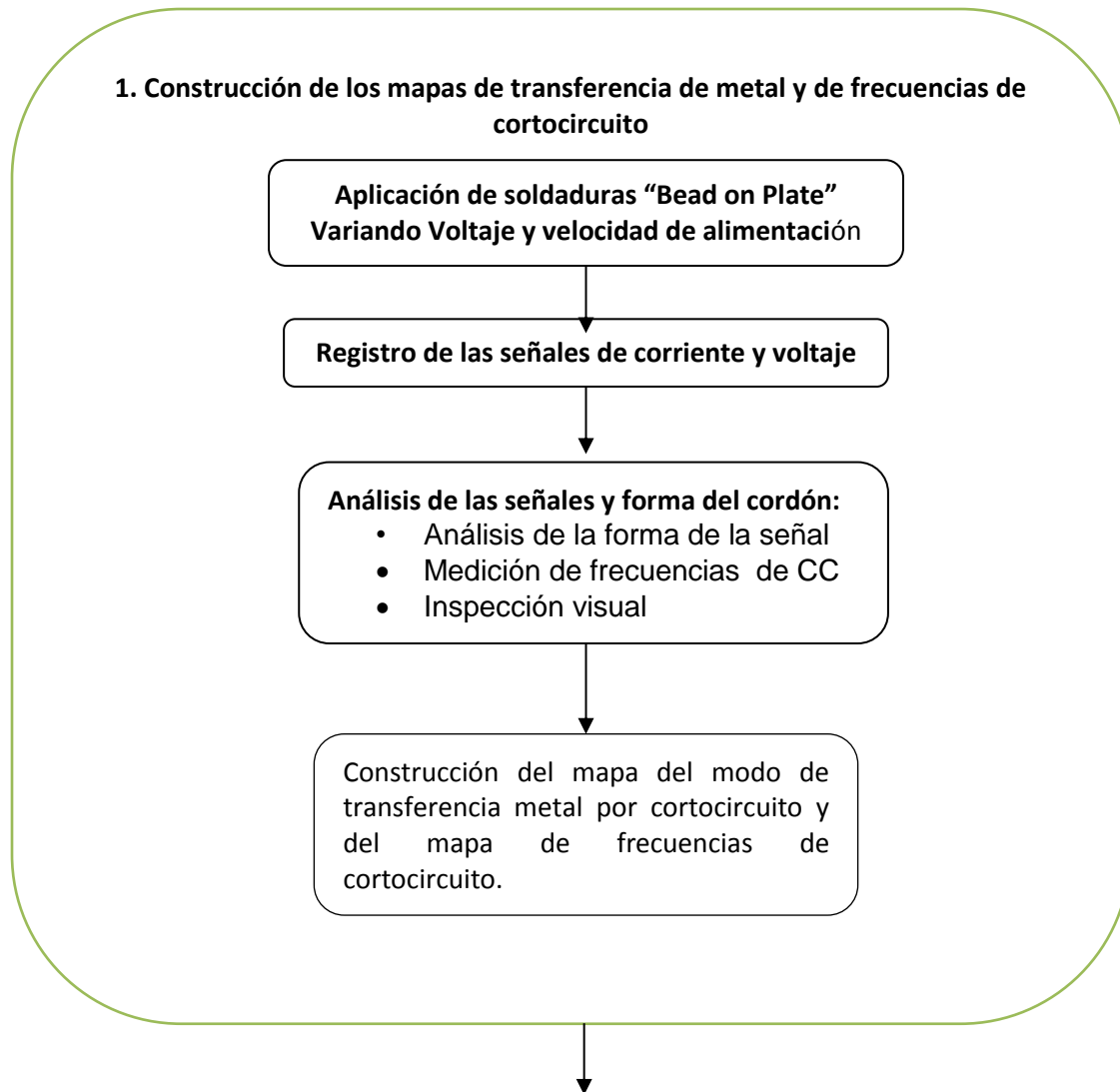
5.2. Diagrama de flujo del procedimiento experimental

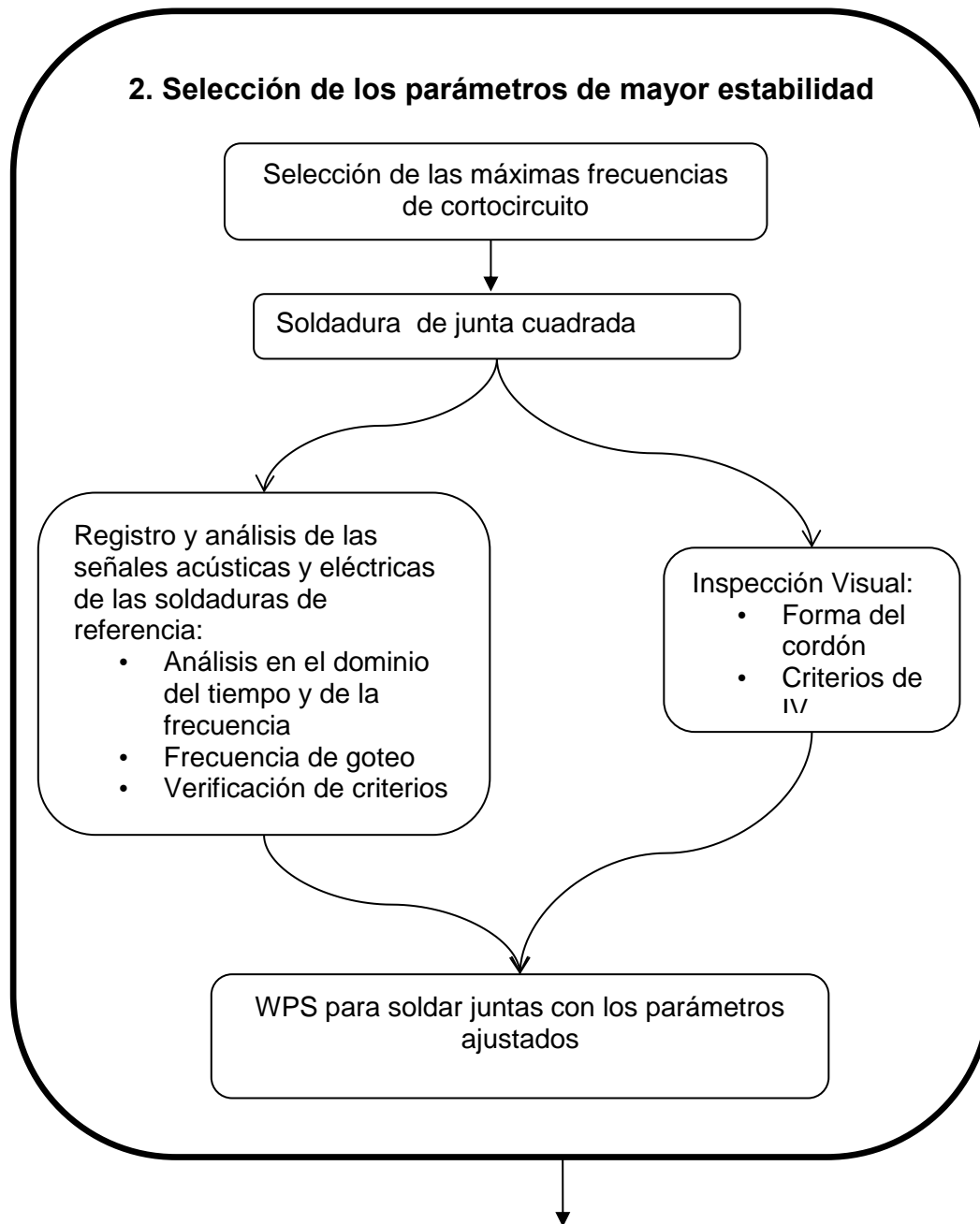
La **Figura 5. 1** muestra los tres pasos seguidos en la parte experimental:

Paso 1: consiste en identificar los rangos de parámetros de operación para la combinación de material de aporte y gas de protección seleccionados con los cuales se logra la mayor estabilidad del proceso, a partir de la construcción de los mapas de transferencia de metal y de frecuencias de cortocircuito.

Paso 2: A partir de los registros de las señales de las soldaduras BOP, se determinan los parámetros que brindan la mayor estabilidad y se ajusta un WPS de referencia para realizar las soldaduras en junta y caracterizar las señales acústicas y eléctricas, así como la forma del cordón.

Paso 3: Finalmente, se desarrolla un experimento en el cual se inducen varias perturbaciones en el proceso con miras a obtener defectos en la soldadura que se puedan identificar con base en los respectivos cambios de las señales eléctricas y acústicas del proceso.

Figura 5. 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.



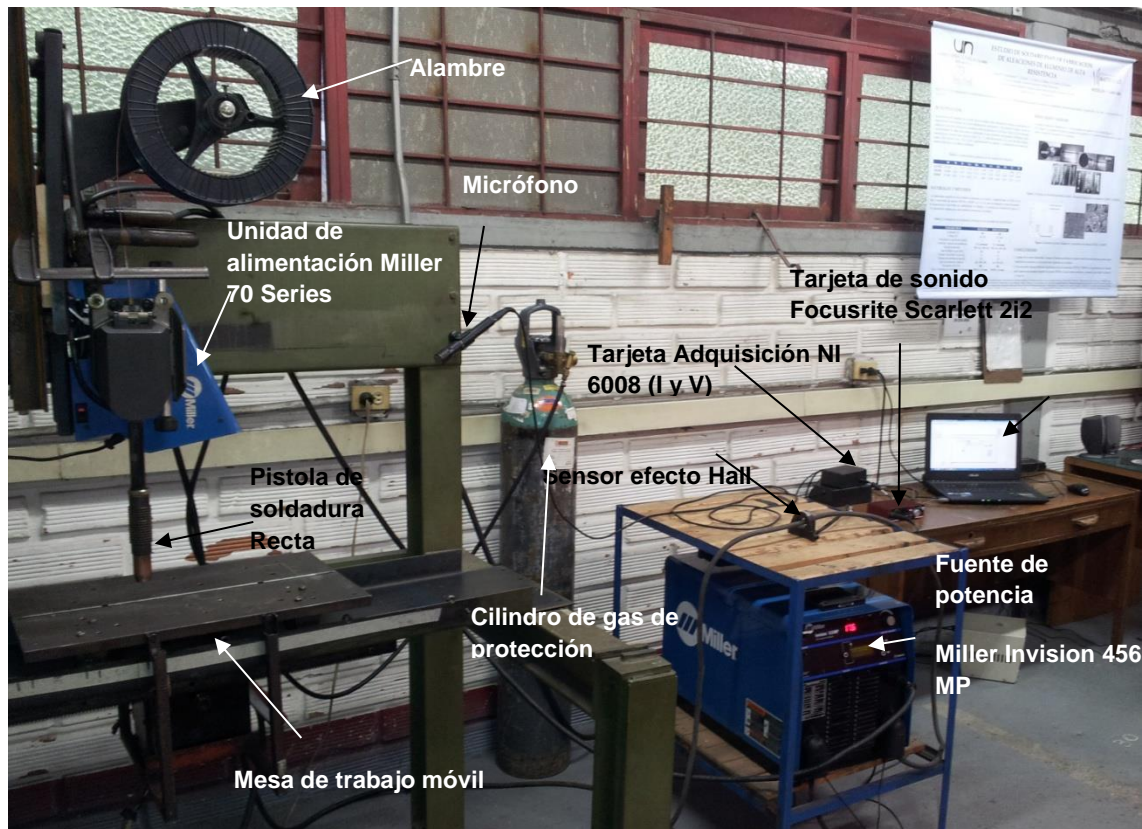


5.3. Equipo de soldadura y sistema de instrumentación

La Figura 5. 2 corresponde a una imagen del montaje de soldadura utilizado, que consistió de una fuente de potencia *Miller Invision 456 MP*, con una unidad de alimentación *Miller 70 Series*, a la cual se le acopló una pistola de soldadura recta que permaneció fija. El movimiento relativo entre la pistola de soldadura y la placa de metal base lo proporcionó un motor con velocidad variable acoplado a la mesa de soldadura, con el fin de evitar variaciones en la velocidad de alimentación que se presentan con

pistolas de soldadura con mangueras relativamente largas, lo cual produce un ruido adicional en las señales adquiridas.

Figura 5. 2. Imagen del montaje de soldadura y del sistema de instrumentación de las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW.



La Figura 5. 3 muestra el diagrama del sistema de instrumentación de las señales acústicas y eléctricas junto con el equipo de GMAW. El cual consta de un sensor de efecto hall para medir la corriente, un divisor de voltaje y una tarjeta de adquisición de datos NI 6008. El sonido fue capturado por medio de una tarjeta de sonido *Focusrite Scarlet 2i2*. Los datos fueron adquiridos con el software *LabView* y procesados por medio de *Excel*; en el caso del sonido, también se usó el software *Reaper*, que es de uso libre. La Figura 5. 4 muestra el detalle del montaje de un cupón de soldadura en junta a tope con ranura cuadrada.

Figura 5. 3. Diagrama del sistema de instrumentación de las señales eléctricas y acústicas del proceso GMAW.

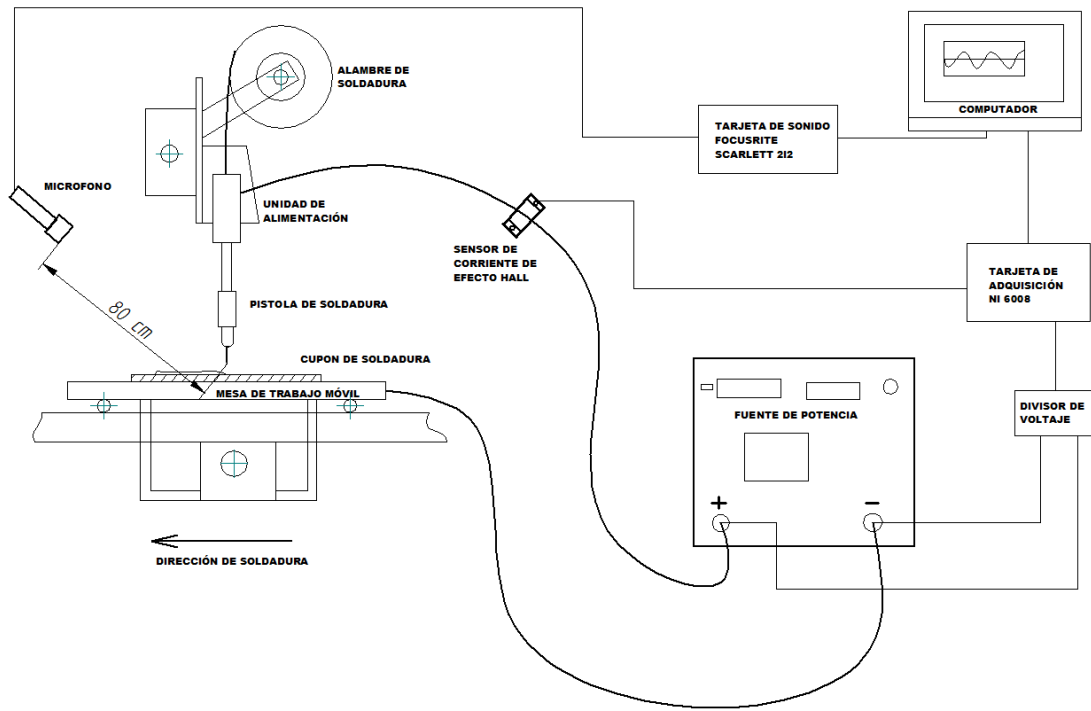


Figura 5. 4. Montaje de soldadura en junta.



5.4. Procedimientos experimentales

En la primera parte de esta investigación se realizó un diseño de experimentos factorial con dos factores y una réplica, para construir el mapa de modos de transferencia y el mapa de frecuencias de cortocircuito del electrodo ER70S-6 de 1.2mm de diámetro y un gas de protección 75% Ar + 25% CO₂. Adicionalmente, con este diseño de experimentos se busca verificar la exactitud en las observaciones, analizar el efecto de los factores sobre las variables de respuesta y conocer su variabilidad experimental. Finalmente, también se busca identificar la combinación de parámetros que ofrezcan la mayor estabilidad del proceso a partir de los datos obtenidos.

El tratamiento de los datos se realizó cumpliendo con el criterio de aleatorización y se estudiaron las variables involucradas, definidas como se explica a continuación:

- **Variables independientes o de entrada (VE):** Corresponden a las que se van a cambiar de nivel durante la fase experimental y están constituidas por: la velocidad de alimentación del alambre y el voltaje.
- **Variables dependientes, respuesta o de salida (VS):** Corresponden a las variables cuya variación se va a determinar como una respuesta a la modificación de las variables independientes. Las variables dependientes son las siguientes: señal de voltaje en el tiempo, señal de corriente en el tiempo, nivel de salpicadura y forma del cordón.
- **Factores fijos:** Los factores fijos corresponden a los parámetros de soldadura restantes que son requeridos para soldar un acero ASTM A36 por el proceso GMAW en transferencia por cortocircuito, estos son resumidos en la **Tabla 5. 1**.
- **Variables de ruido:** Aquí se encuentra el ruido externo, para ello se realizaron los experimentos en una hora fija (en la noche) cuando el laboratorio estaba relativamente solo y no estaban en funcionamiento las máquinas de los laboratorios vecinos

Los rangos de valores de las variables independientes fueron seleccionados probando las combinaciones de voltaje y velocidad de alimentación del alambre extremas, a partir de las cuales se logra tener el modo de transferencia por cortocircuito. De esta forma se trazó la ventana de trabajo para correr el experimento. La velocidad de alimentación se

tomo desde 100 hasta 600 in/min con aumentos de 50 in/min, el voltaje desde 12 hasta 34 voltios con incrementos de 1 voltio.

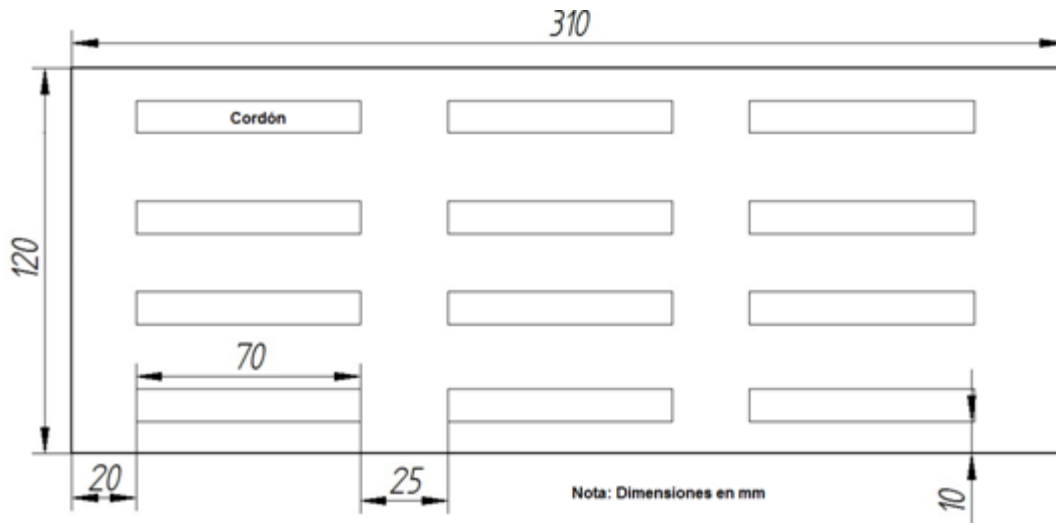
En principio, se tenían 11 niveles para la velocidad de alimentación y 23 niveles para el voltaje, lo que da 253 combinaciones de las variables independientes, valor que finalmente se redujo a 133 cordones, ya que no en todas estas combinaciones de parámetros se generó arco eléctrico, y en otros casos se pasó a otro modo de transferencia diferente. Lo cual no era de interés para este trabajo.

Tabla 5. 1. Parámetros de soldadura fijos durante la soldaduras “Bead on Plate”.

PARÁMETROS DE SOLDADURA FIJOS	
Material Base	ASTM A36
Espesor de la placa (mm)	4.8
Material de Aporte	ER 70S-6
Diámetro aporte (mm)	1,2
Mezcla de Gas de Protección	75% Ar + 25% CO2
Caudal (CFH)	30
Inductancia (%)	75
Distancia tubo de contacto-pieza (mm)	16
Velocidad de aplicación (mm/s)	4.2
Angulo Avance (°)	0
Angulo trabajo (°)	90
Diámetro tobera (mm)	16
Corriente y Polaridad	CDEP
Máxima temperatura interpases (°C)	100

Una vez definidos los parámetros fijos del experimento, los rangos de las variables independientes y sus niveles, se diseñó el cupón de soldadura mostrado en la **Figura 5. 5**. Los cordones de soldadura fueron aplicados sobre la placa (Bead On Plate) con una longitud de 70 mm, suficiente para adquirir en la región estable del cordón 10 segundos de datos y dejar un descarte de 15 mm al inicio y al final.

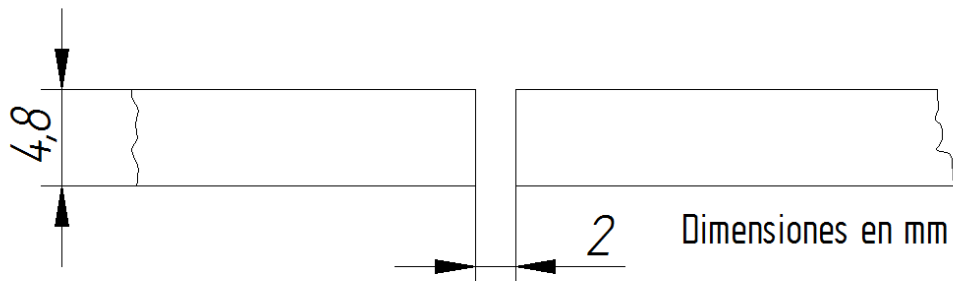
Figura 5. 5. Dimensiones de los cupones de soldadura usados para construir los mapas de modos de transferencia y de frecuencias de cortocircuito.



La segunda parte experimental consistió en inducir tres tipos de perturbaciones durante la soldadura de una junta a tope con ranura cuadrada, con el fin de promover la aparición de diferentes discontinuidades.

La junta seleccionada para obtener una soldadura sana en un solo pase y usando los parámetros definidos en el primer experimento se muestra en la Figura 5. 6, que corresponde a una junta precalificada B-L1b-GF de acuerdo al código AWS D1.1:2010 [25].

Figura 5. 6. Detalles de la junta de soldadura usada como referencia.



Se indujeron las siguientes perturbaciones en la junta: abertura de raíz variable, cambio en el flujo de gas y cambio en la distancia tubo de contacto piesa (DTCP). En la Tabla 5.

2 se describen los niveles en los que se variaron las perturbaciones. Para definir las dimensiones de la abertura de raíz y la distancia tubo de contacto pieza (DTCP) fue necesario realizar ensayos previos. Para definir los flujos de gas de protección se partió de los valores mínimos y máximos que se podían medir con el flujómetro de gas y que podrían afectar el proceso.

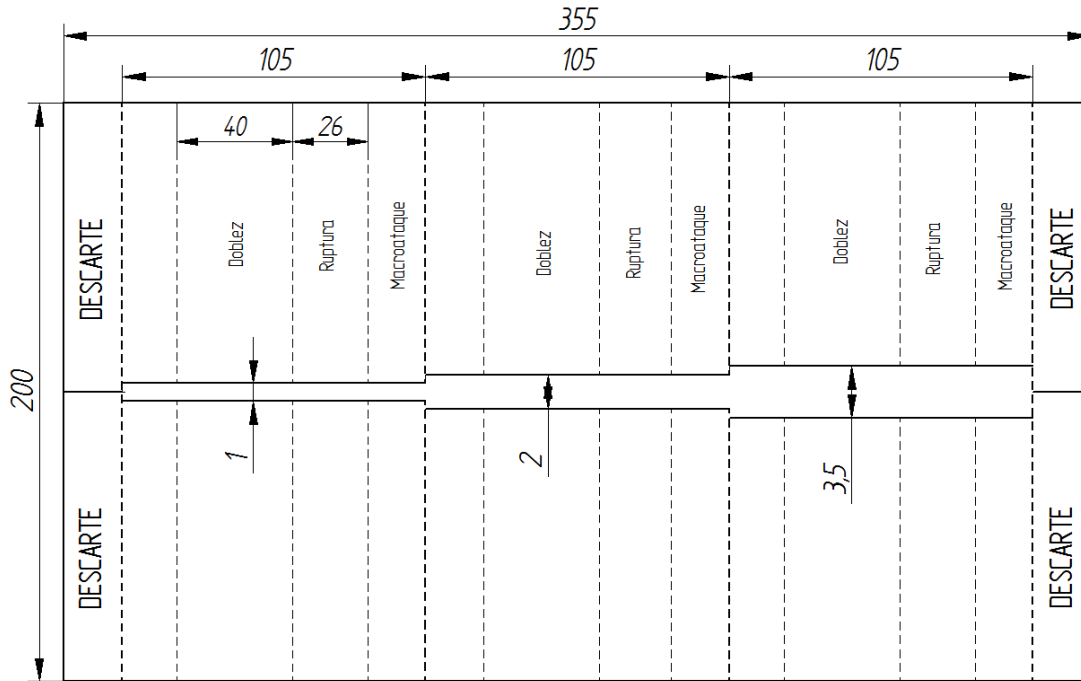
Tabla 5. 2. Perturbaciones del proceso

Tipo de perturbación	Niveles	Posibles discontinuidades
Variación de la abertura de raíz	Bajo (1 mm)	Falta de penetración
	Normal (2 mm)	Ninguna
	Alto (3.5 mm)	Sobrepenetración
Cambio en el Flujo de gas	Bajo (3 l /min)	Porosidad
	Alto (25 l /min)	Porosidad
Cambio en DTCP*	Alto (25mm)	Salpicadura
	Bajo (10 mm)	Sobrepenetración salpicadura

*DTCP: Distancia tubo de contacto pieza.

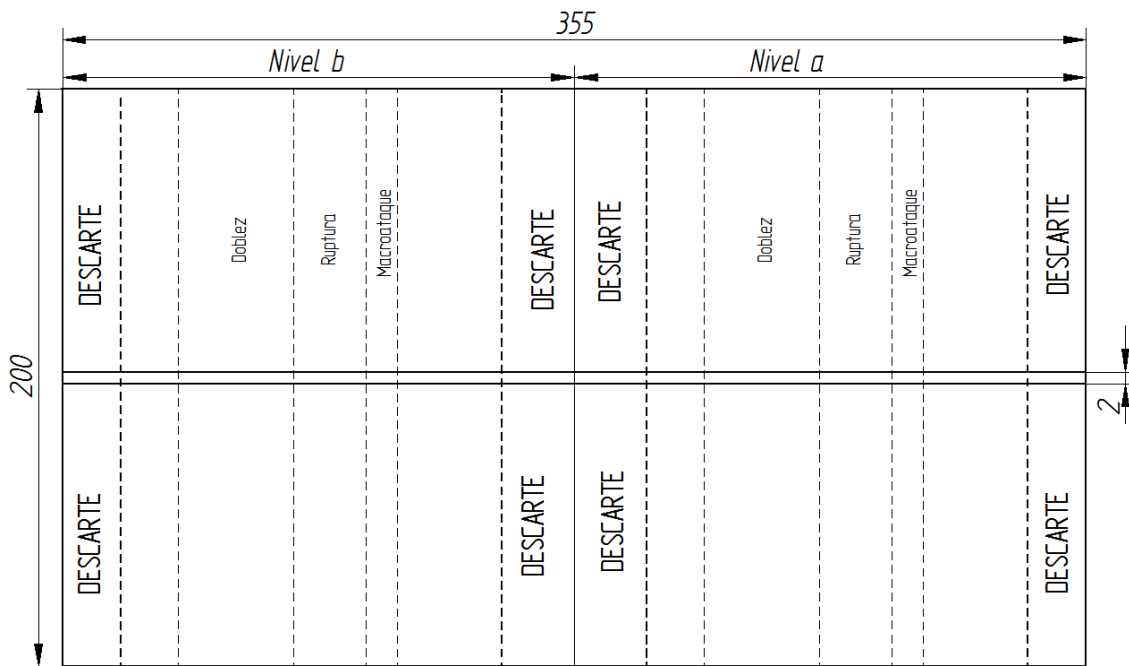
Para cada tipo de perturbación se utilizó un cupón de soldadura con una réplica. Se diseñaron dos cupones de soldadura: uno con abertura de raíz variable; y uno con abertura de raíz constante, en el que se evaluaron el cambio de flujo de gas y el cambio de la DTCP. En la Figura 5. 7 y la Figura 5. 8 se pueden observar las dimensiones de los cupones y la distribución de las probetas. Las señales acústicas y eléctricas fueron capturadas cuando el arco pasaba por las zonas con perturbación.

Figura 5. 7. Cupón de soldadura de abertura de raíz variable.



Nota: Dimensiones en mm

Figura 5. 8. Cupón de soldadura de abertura de raíz constante, cambio del flujo de gas y de la DTCP.



Nota: Dimensiones en mm

Después de aplicar las soldaduras, se realizó la inspección visual y el análisis de las señales acústicas y eléctricas y, finalmente, se hicieron los ensayos destructivos de dobléz, ruptura y macroataque de la sección transversal, para determinar la sanidad al interior de las soldaduras.

6. Resultados y análisis

Los resultados y su respectivo análisis se presentarán en el mismo orden seguido en el plan experimental. Inicialmente, se expone el estudio de la estabilidad del proceso realizado en la primera parte experimental, donde se construyeron el mapa del modo de transferencia de metal por cortocircuito y el mapa de frecuencias de cortocircuito, con los cuales se seleccionaron y ajustaron los parámetros del procedimiento de soldadura de referencia.

La segunda parte de los resultados corresponde al análisis de las señales acústicas y eléctricas registradas durante las soldaduras en junta a tope de ranura cuadrada aplicando diferentes perturbaciones, donde se caracteriza la señal y se relaciona con la calidad de las soldaduras. El análisis de las señales fue dividido en tres secciones: inicialmente se presentan los resultados de la inspección visual y los ensayos destructivos junto con las señales eléctricas y acústicas registradas durante la aplicación de las soldaduras, para cada una de las condiciones evaluadas. En la segunda sección, se realiza un análisis detallado de las señales eléctricas mediante los diferentes parámetros de estabilidad del proceso (potencia del arco, resistencia del arco, frecuencia de cortocircuito, periodo de cortocircuito y desviación estándar del periodo de cortocircuito). La tercera sección corresponde al análisis de la señal acústica por medio de los parámetros de forma de la señal (el valor RMS y la curtosis de la señal); finalmente, la señal acústica es analizada también en el dominio de la frecuencia para cada una de las condiciones de soldadura.}

6.1. Mapa del modo de transferencia de metal por cortocircuito

En la primera parte de los experimentos se analizaron los registros de las señales de corriente y voltaje, así como la forma de los cordones de soldadura. Con esta información se construyó la gráfica de la región de transferencia de metal por cortocircuito y el mapa de frecuencias de cortocircuito para el alambre y el gas seleccionados.

Para construir el mapa de transferencia de metal por cortocircuito se analizó la forma de la señal, se midió la frecuencia de cortocircuito promedio, la corriente y el voltaje RMS para cada cordón de soldadura. La **Figura 6. 1** muestra el mapa de transferencia por cortocircuito obtenido para el alambre ER 70S-6 de 1.2 mm de diámetro y un gas de protección 75% Ar + 25% CO₂, en función de la corriente y el voltaje RMS del arco. La **Figura 6. 2** corresponde al mapa de transferencia en función de la velocidad de alimentación y el voltaje RMS. Los mapas se componen de 4 zonas: la zona de cortocircuito, la zona de cortocircuito/globular, la zona de cortocircuito/aspersión y la zona de interrupción del arco (IA). A continuación se hace una descripción de cada zona por medio de las señales adquiridas y las imágenes de los cordones de soldadura típicos:

Figura 6. 1. Mapa del modo de transferencia por cortocircuito en función de la corriente y el voltaje RMS.

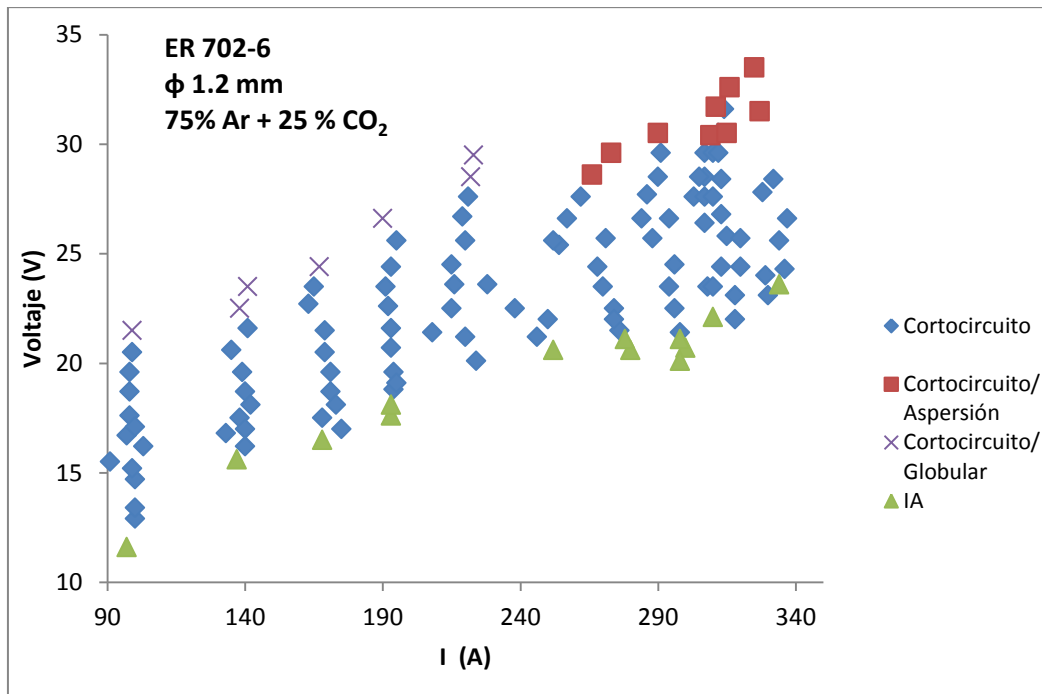
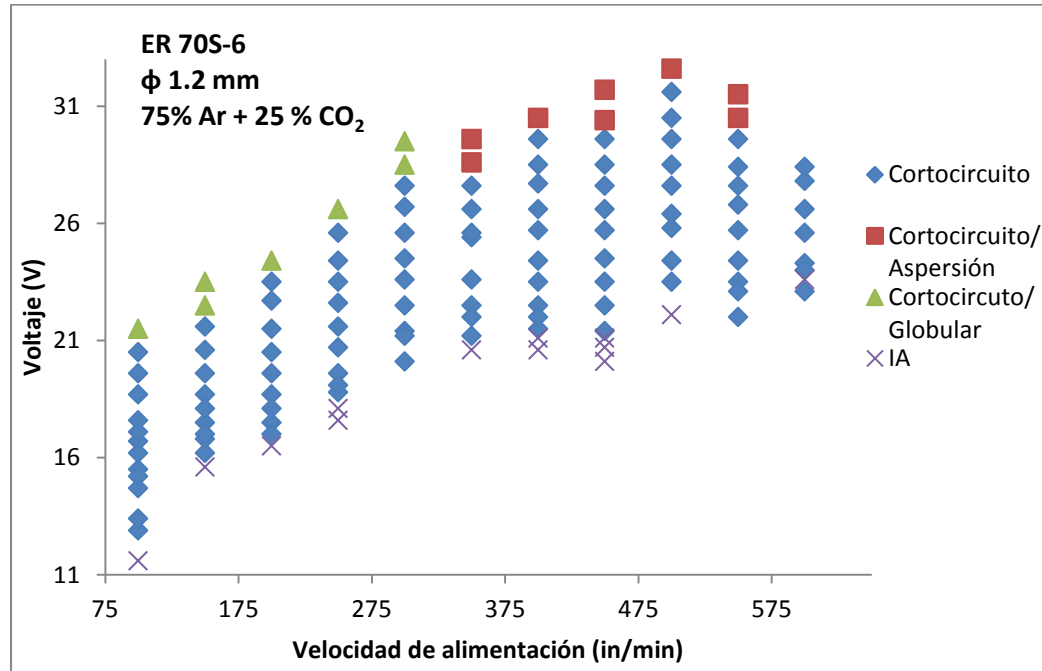


Figura 6. 2. Mapa del modo de transferencia por cortocircuito en función de la velocidad de alimentación y el voltaje RMS.



a. Zona de cortocircuito: En esta zona se logra un cordón homogéneo y la transferencia es por cortocircuito puro. La **Figura 6. 3** muestra las gráficas de las señales de corriente y voltaje en el tiempo para diferentes puntos del mapa donde se presenta la transferencia. El comportamiento de las señales es similar al descrito en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y las frecuencias de cortocircuito se encuentran por encima de 20 Hz. En general el nivel de la corriente aumenta con la velocidad de alimentación. Este modo de transferencia abarca un amplio rango de corrientes y voltajes. En la **Figura 6. 4** se presentan imágenes de varios cordones de soldadura que corresponden a esta zona y se puede observar también que se tiene una gran variedad de tamaños, debido a las diferentes entradas de energía para este modo de transferencia.

Figura 6. 3. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuito. a) 100 in/min – 17 V, b) 200 in/min - 18 V y c) 400 in/min- 26 V.

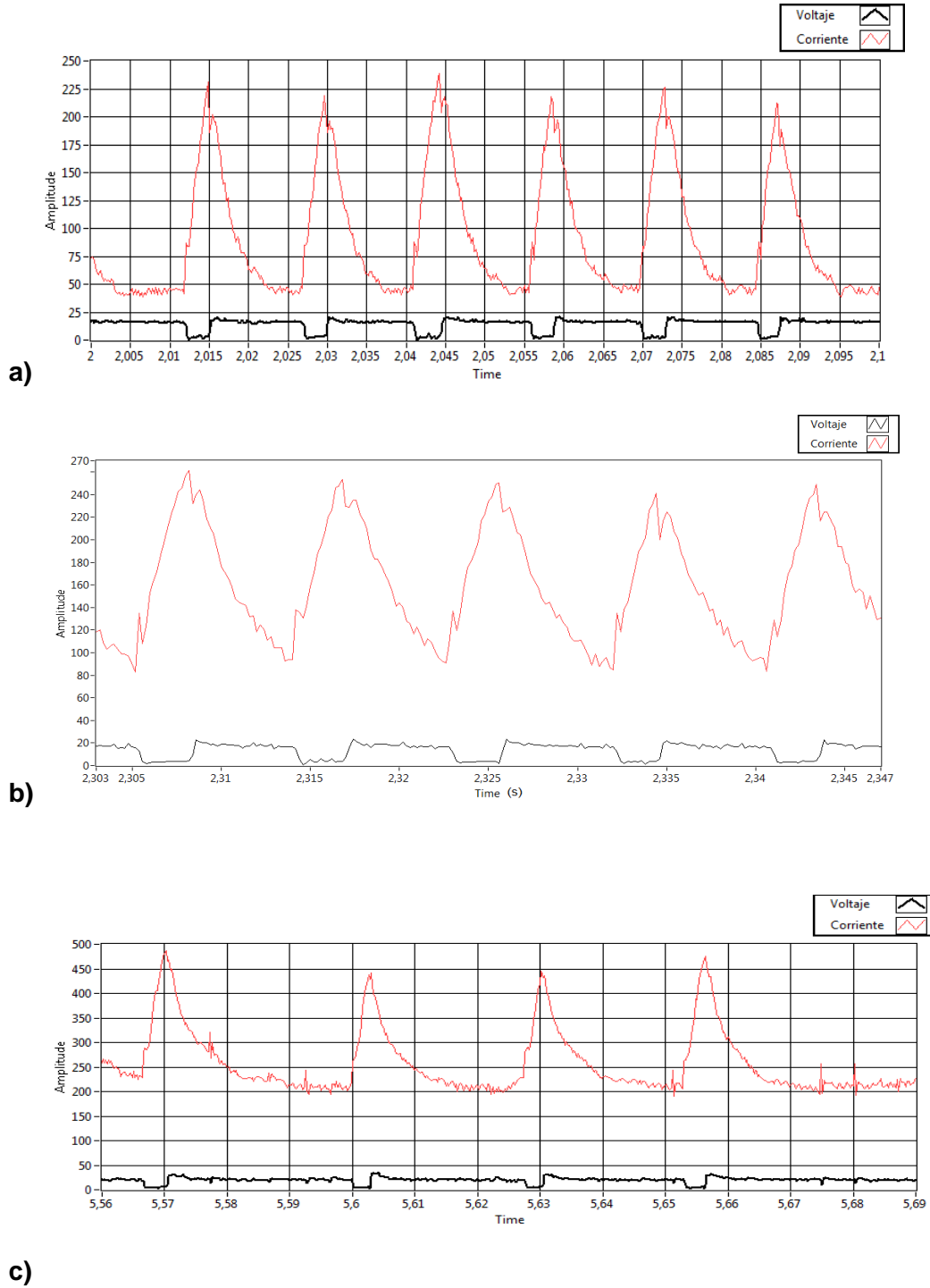
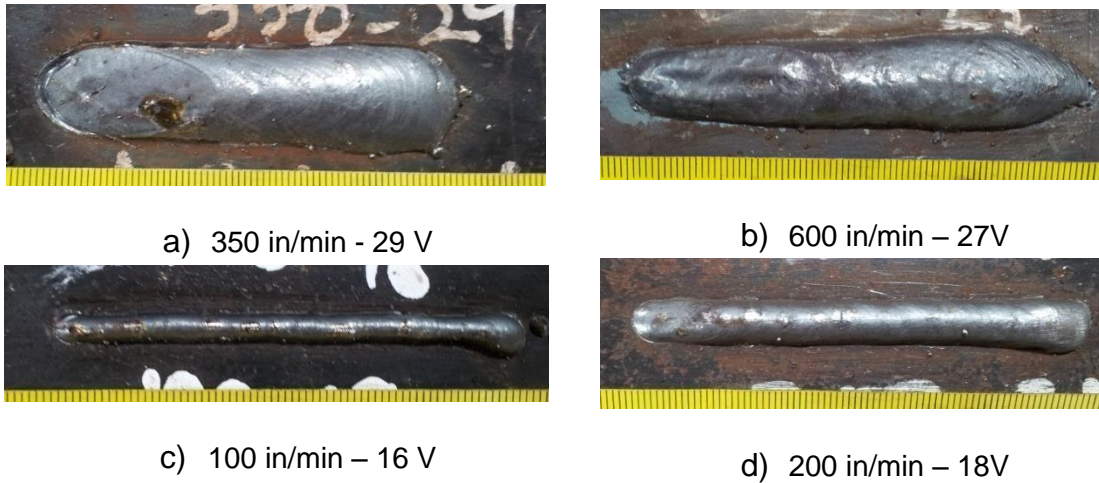
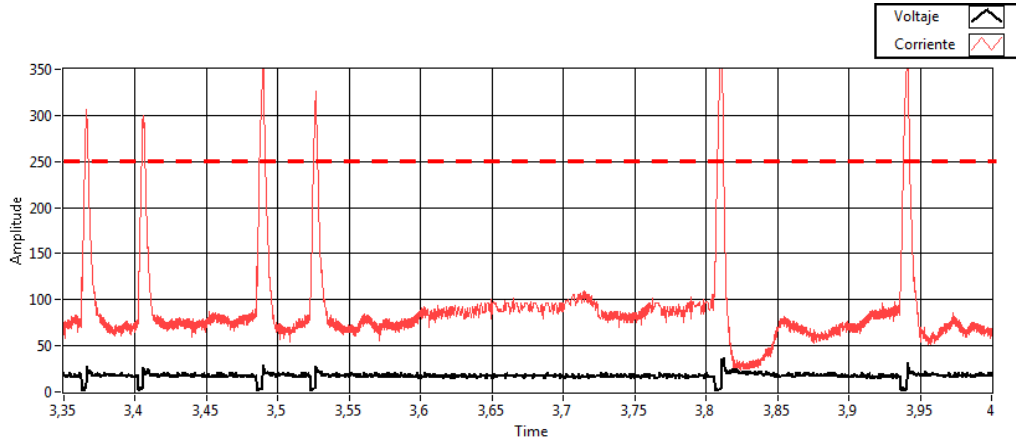


Figura 6. 4. Imágenes de los cordones de soldadura correspondientes a la zona de cortocircuito.

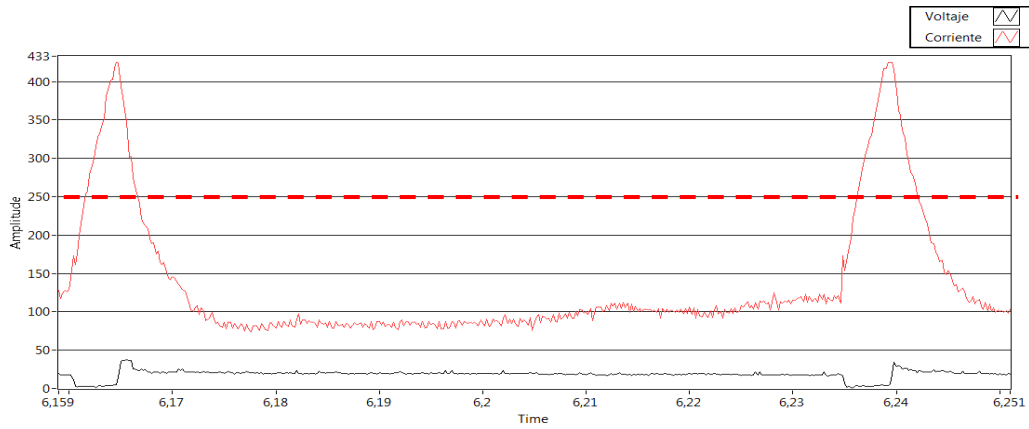


- b. Zona de cortocircuito/globular:** En esta zona se presenta una mezcla de los modos de transferencia por cortocircuito y globular. Se caracteriza porque la frecuencia de cortocircuito cae por debajo de 20 Hz. La **Figura 6. 5** corresponde a las gráficas de corriente y voltaje para tres cordones de soldadura en esta zona, de la que se puede observar que el periodo de arco es mucho mayor que en cortocircuito puro, además la corriente durante el periodo de arco se encuentra por debajo de la corriente de transición del alambre. En este caso se consideró la corriente de transición entre los modos combinados de Cortocircuito/Globular y Cortocircuito/Aspersión alrededor de 250 amperios, similar a lo reportado por Pires et al [9], quienes trabajaron con gas de protección 82% Ar + 18% CO₂ y el mismo alambre. En la **Figura 6. 6**, se muestran las gráficas de corriente y voltaje, a las cuales se les aplicó una media móvil de 10 para suavizar la señal durante el tiempo de arco. De esta forma, se puede observar que el voltaje disminuye ligeramente (pasa de 20 a 17,5 voltios aproximadamente), mientras que la corriente aumenta (pasa de 80 a más de 100 Amperios), este comportamiento se debe a que durante el tiempo de arco las gotas crecen más de lo normal y en ocasiones se puede presentar vuelo libre.

Figura 6. 5. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuito/globular. a) 100 in/min - 22 V, b) 150 in/min - 24 V y c) 300 in/min - 30 V.a)



b)



c)

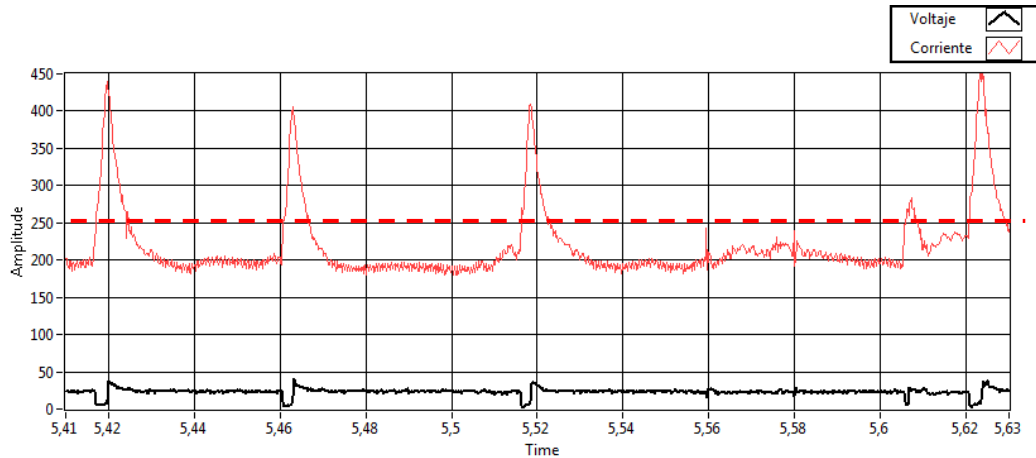
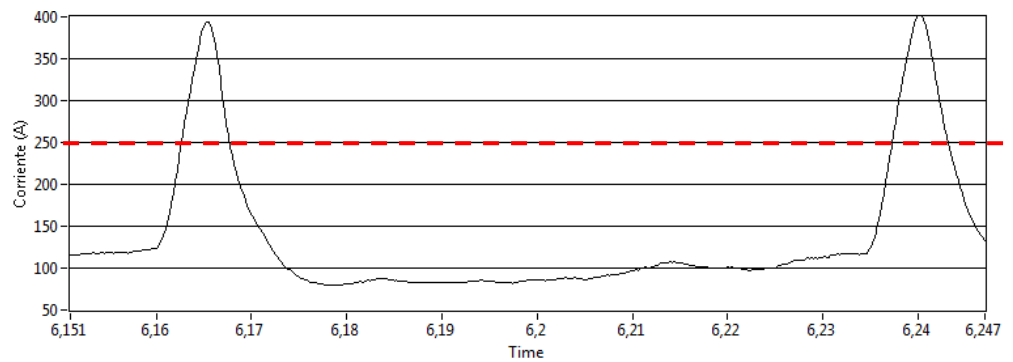
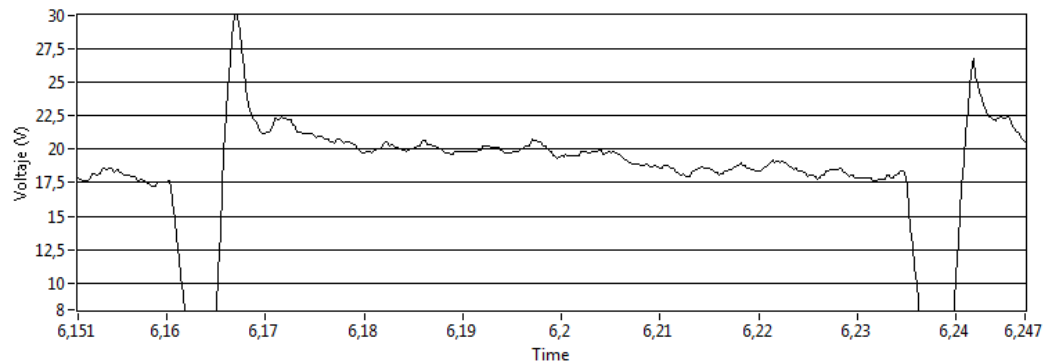


Figura 6. 6. Graficas de a) corriente y b) voltaje filtrada. Para 150 in/min – 24V.

a)



b)

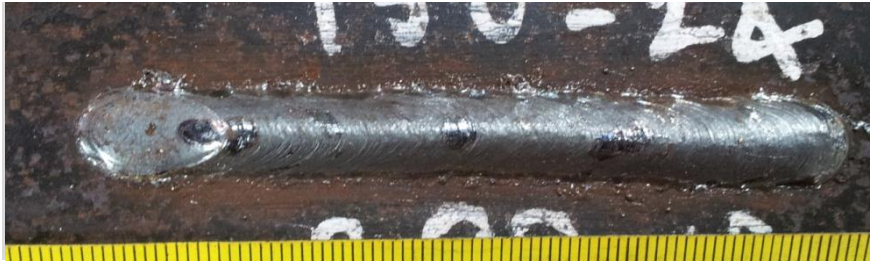


La Figura 6. 7 muestra las imágenes de los cordones correspondientes a la transferencia cortocircuito/globular, se puede observar que los cordones presentan salpicaduras grandes, lo cual se debe a que en algunas combinaciones de parámetros se logra el modo de transferencia cortocircuito/globular repelido.

Figura 6. 7. Imágenes de los cordones de soldadura correspondientes a la zona de cortocircuito / globular.



a) 100 in/min - 22 V

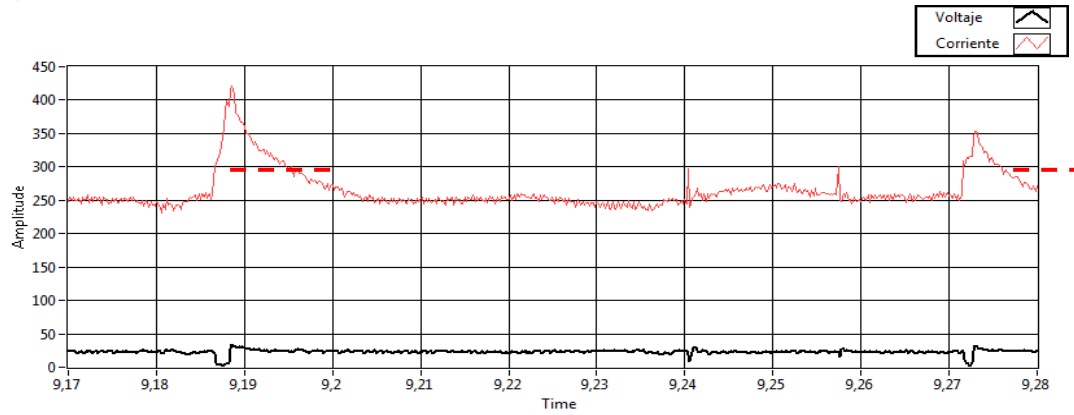


b) 150 in/min – 24 V

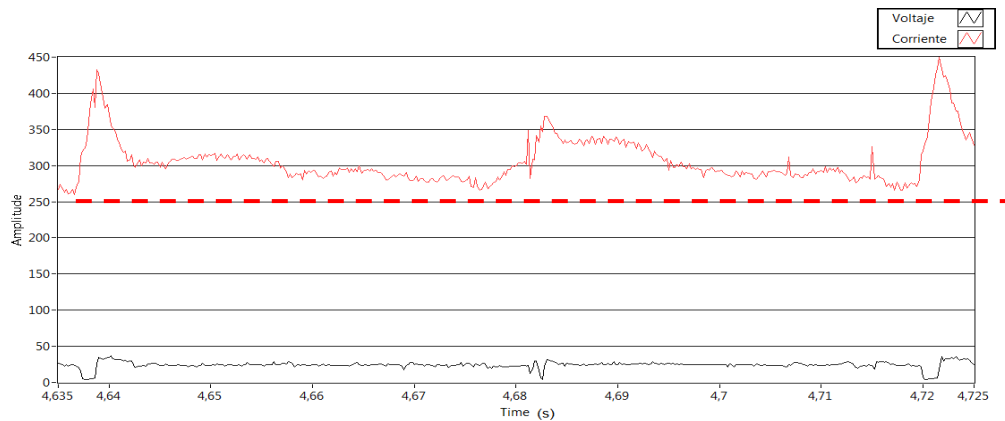
c. Zona de cortocircuito/aspersión: corresponde a la zona del mapa donde se presenta una mezcla de los modos de transferencia cortocircuito y aspersión. En esta zona la frecuencia de cortocircuito cae también por debajo de 20 Hz, el periodo de arco es mucho mayor que en cortocircuito puro y la corriente durante el arco está por encima de 250 amperios, como se puede observar en la **Figura 6. 8**.

Figura 6. 8. Señales de corriente y voltaje representativas de la zona de cortocircuto/aspersión, a) 350 in/min - 30 V, b) 450 in/min - 31 V, c) 550 in/min - 31 V

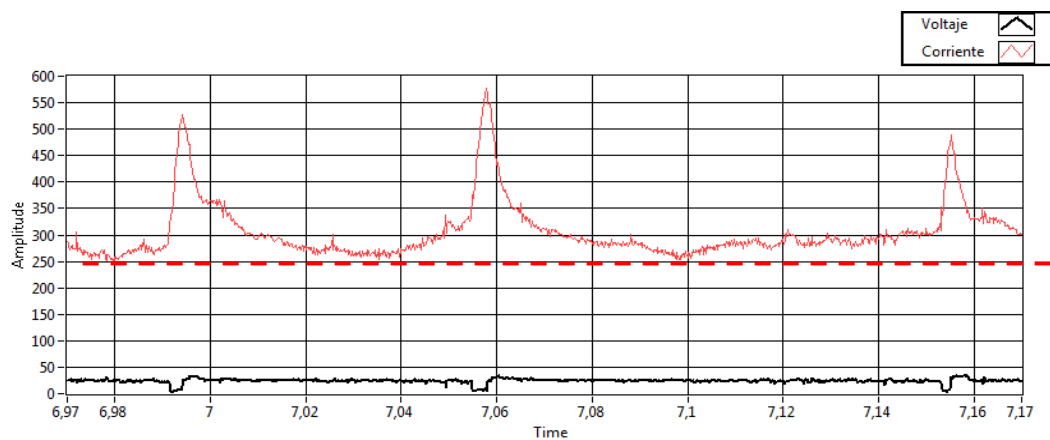
a)



b)



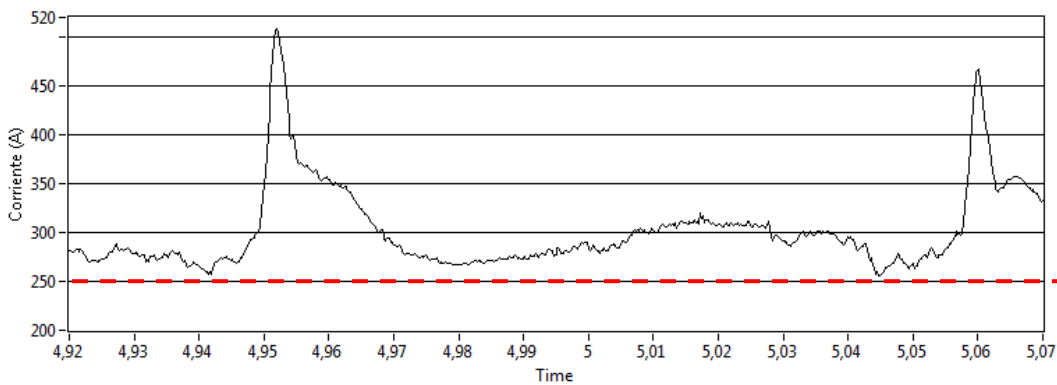
c)



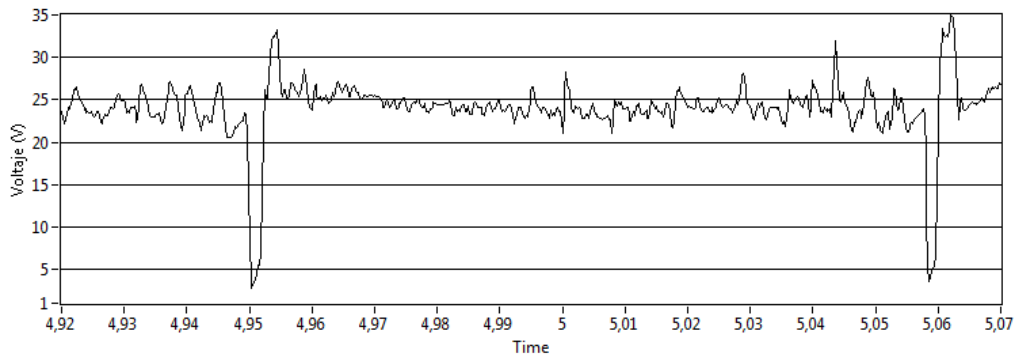
La **Figura 6. 9** corresponde a las gráficas de corriente y voltaje en el periodo de arco, allí se puede observar que la corriente no muestra la tendencia a aumentar durante el periodo de arco, y el voltaje permanece constante alrededor 24 voltios. Lo cual es diferente a lo ocurrido en la Figura 6. 6.

Figura 6. 9. Graficas de a) corriente y b) voltaje, para 450 in/min – 31V.

a)



b)



En esta región se alcanzaron las mayores entradas de energía, en consecuencia los mayores tamaños de cordón, como se observa en la **Figura 6. 10**. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A diferencia de los cordones en cortocircuito / globular, la salpicadura que se observa es más fina y en mayor cantidad a lo largo del cordón.

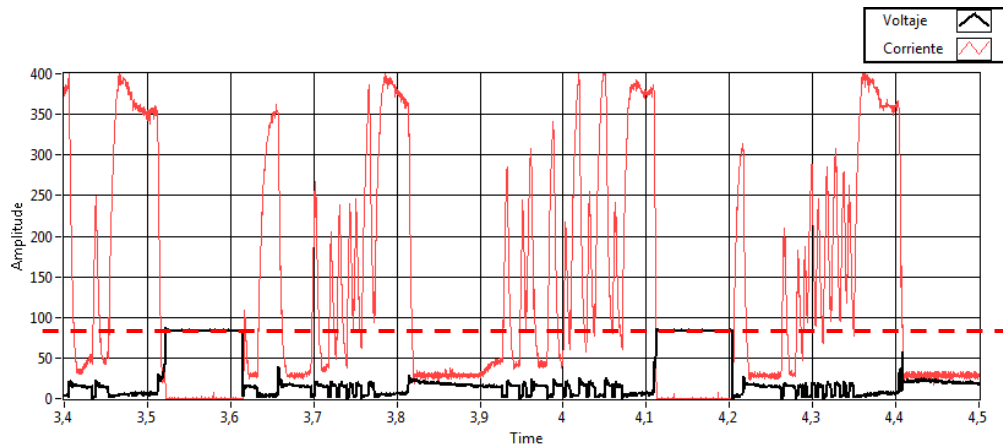
Figura 6. 10. Imagen de un cordón de soldadura correspondiente a la zona de cortocircuito / aspersión. Para 350 in/min - 30 V.



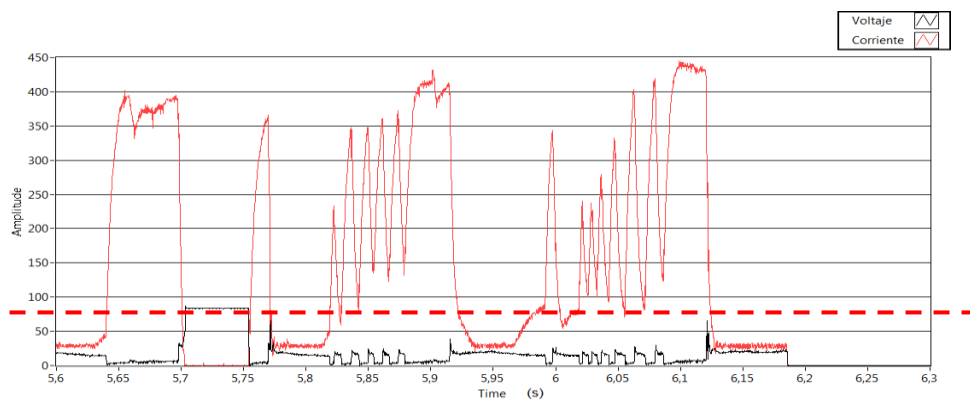
- d. **Zona de interrupción del arco (IA):** Se nombró de esta manera la zona del mapa donde el arco se interrumpía sucesivamente unos pocos segundos después de iniciado el cordón y era necesario apagar el proceso; en consecuencia, no se alcanzaba un cordón homogéneo. La **Figura 6. 11** muestra las señales de corriente y voltaje, donde se puede identificar la interrupción del arco cuando el voltaje aumenta alrededor de los 90 voltios, este valor coincide con el voltaje de circuito abierto ó “Open Circuit Voltage” (OCV). de la fuente de potencia La **Figura 6. 12** corresponde a las imágenes de los cordones de soldadura.

Figura 6. 11. Señales de corriente y voltaje de la zona de interrupción del arco, a) 250 in/min – 17 V, b) 150 in/min – 16 V, c) 550 in/min – 23V.

a)



b)



c)

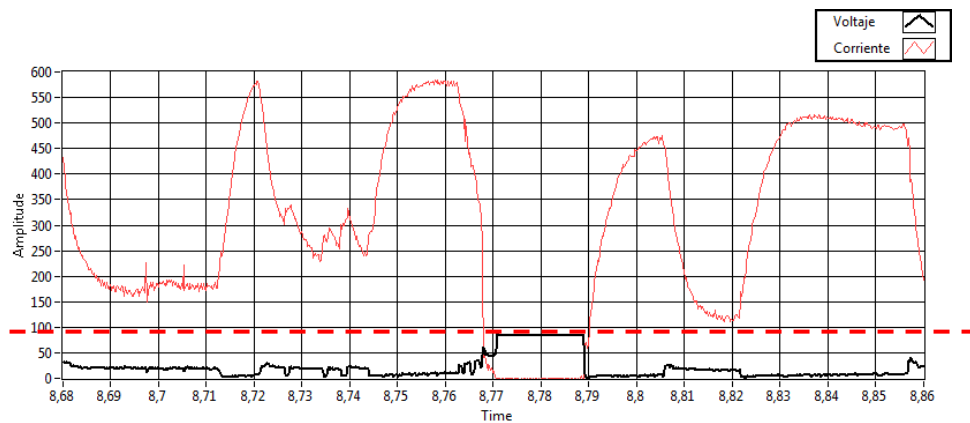


Figura 6. 12. Cordones de soldadura correspondientes a la zona IA.



a) 250 in/min – 18V

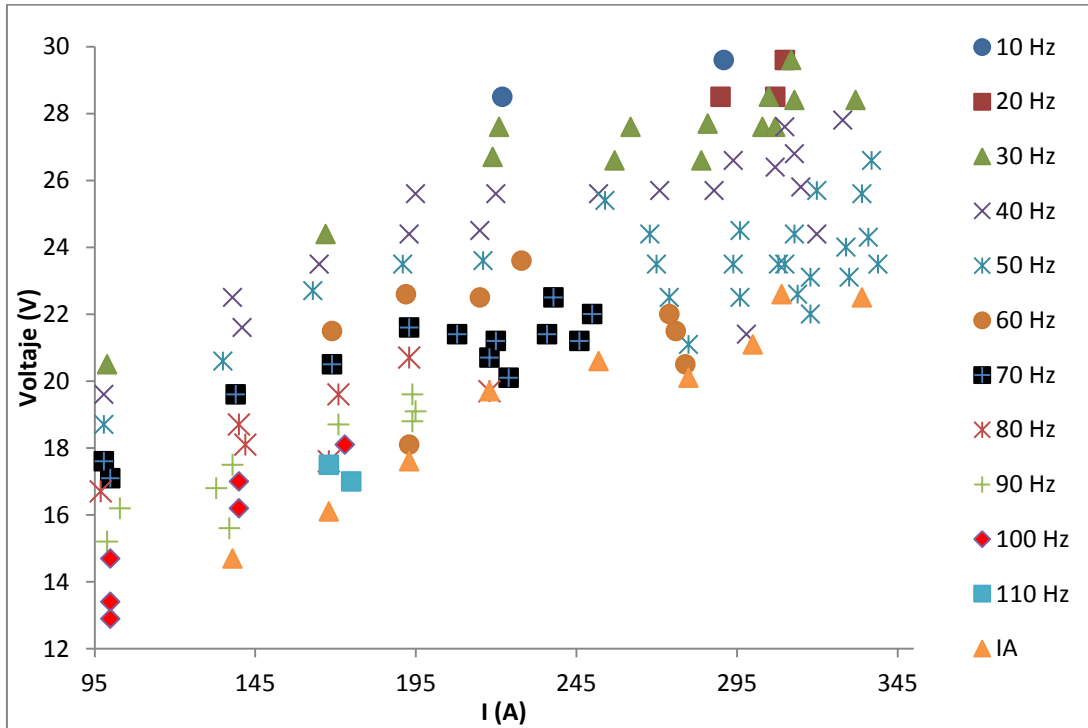


b) 300 in/min – 18V

6.2. Mapa de frecuencias de cortocircuito y selección de parámetros para soldaduras en junta

En la Figura 6. 13 se presenta el mapa con las isopletas de las frecuencias de cortocircuito (regiones de igual frecuencia). Los registros de las señales de cada cordón de soldadura y su réplica fueron procesados en *EXCEL* para calcular los promedios del tiempo de arco, el tiempo de cortocircuito, el periodo, la desviación estándar del periodo y la frecuencia de cortocircuito. Las frecuencias calculadas se encuentran entre 0 y 110 Hz y para poder graficar las isopletas de frecuencias, los valores fueron agrupados cada 10 Hz asumiendo el punto central como el valor para mostrar en el gráfico. De esta forma 10 HZ corresponde a frecuencias entre 0 y 15 HZ (desde cero por ser el valor inicial), 20 Hz a frecuencias entre 15 y 25 Hz y así sucesivamente hasta 110Hz.

Figura 6. 13. Mapa de frecuencias de cortocircuito para el alambre ER70S-6 y 75% Ar + 25% CO₂.



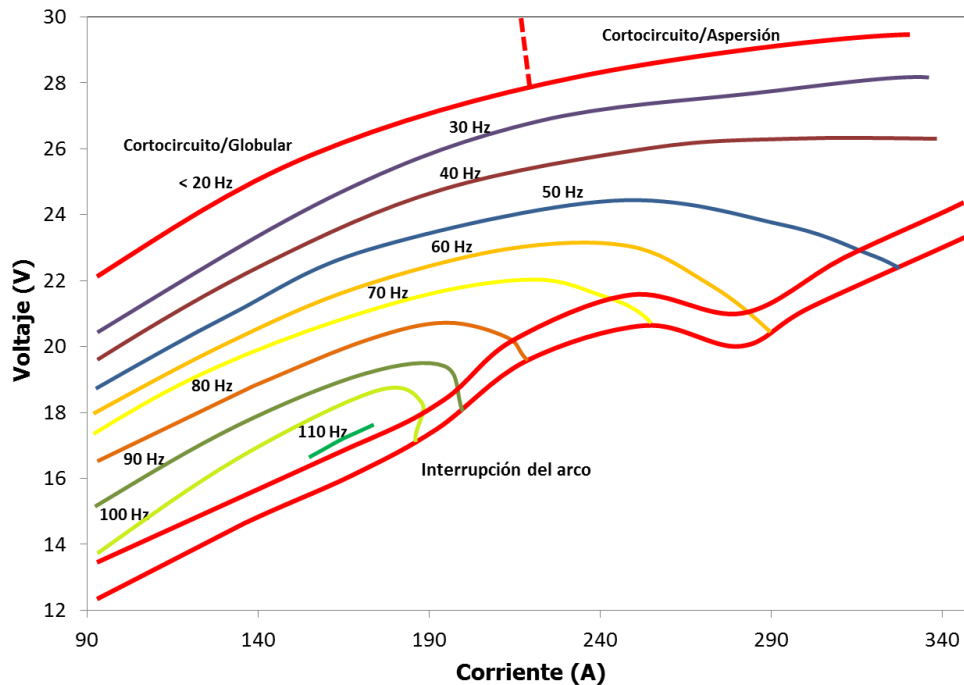
El mapa de frecuencias de la Figura 6. 13 tiene una distribución similar a los mapas desarrollados por Liu y Siewert [23] para el alambre ER70S-6 con 100% CO₂ y una mezcla 98% Ar + 2% O₂ (ver Figura 3.10). Es decir, una frecuencia de cortocircuito dada se puede obtener con diferentes combinaciones de corriente y voltaje, esto se puede observar mejor en la

Figura 6. 14, la cual corresponde al mapa de frecuencias esquemático.

En este sentido, se encuentra una zona de combinación de parámetros en la cual se alcanzan las frecuencias máximas y es considerada como la región de operación adecuada para el proceso.

Sin embargo, a diferencia de Liu y Siewert [23], se encontró que para ciertas combinaciones de velocidad de alimentación (o corriente) y voltaje, se da la interrupción del arco e inclusive con voltajes aun más bajos y la misma velocidad de alimentación, es más difícil el inicio del arco. Este fenómeno se debe a que la rata de fusión es menor a la velocidad de alimentación del material de aporte, en consecuencia, se da un contacto

Figura 6. 14. Mapa de frecuencia de cortocircuito esquemático para el alambre ER70S-6 y 75% Ar + 25% CO₂.



entre el electrodo y el charco de soldadura sin desprendimiento del material, conocido como "stubbing" [7].

Con el software estadístico Minitab, fue analizada una parte de la región de cortocircuito en la que se espera la mayor estabilidad del proceso, pues fue donde se observaron las mayores frecuencias de cortocircuito (80-110Hz). Esta región corresponde a los datos mostrados en la Tabla 6. 1 con corrientes RMS desde 95 A hasta 200 A (100 in/min – 250 in/min) y voltajes en fuente desde 18 V hasta 20 V (voltajes RMS desde 17.6 V a 19.6 V).

Tabla 6. 1. Resultados obtenidos en la región de mayor estabilidad.

Velocidad alimentación (in/min)	Voltaje (V)	Promedio Periodo (ms)	Desviación Estandar Periodo (ms)	Frecuencia (Hz)
100	18	14,5	8,2	69
100	18	15,4	7,5	65
100	19	19,0	10,0	53
100	19	20,7	8,9	48
100	20	25,6	11,8	39
100	20	28,5	9,6	35
150	18	11,1	4,6	90
150	18	11,0	4,8	91
150	19	13,0	5,6	77
150	19	13,0	5,3	77
150	20	15,0	6,3	67
150	20	15,8	6,6	63
200	18	9,3	2,0	108
200	18	9,2	1,1	109
200	19	10,4	2,1	96
200	19	10,7	2,3	94
200	20	12,1	3,9	83
200	20	11,8	3,6	84
250	18	28,6	30,6	35
250	18	24,1	34,2	41
250	19	10,6	2,2	94
250	19	11,2	2,5	89

250	20	11,2	2,5	89
250	20	11,1	2,3	90

En las **Figura 6. 15**, 6.16 y 6.17 se muestran los resultados gráficos obtenidos; en dichas figuras se puede observar que se cumplen los supuestos de homogeneidad, aleatorización y normalidad.

Figura 6. 15. Distribución de probabilidad para la frecuencia de cortocircuito.

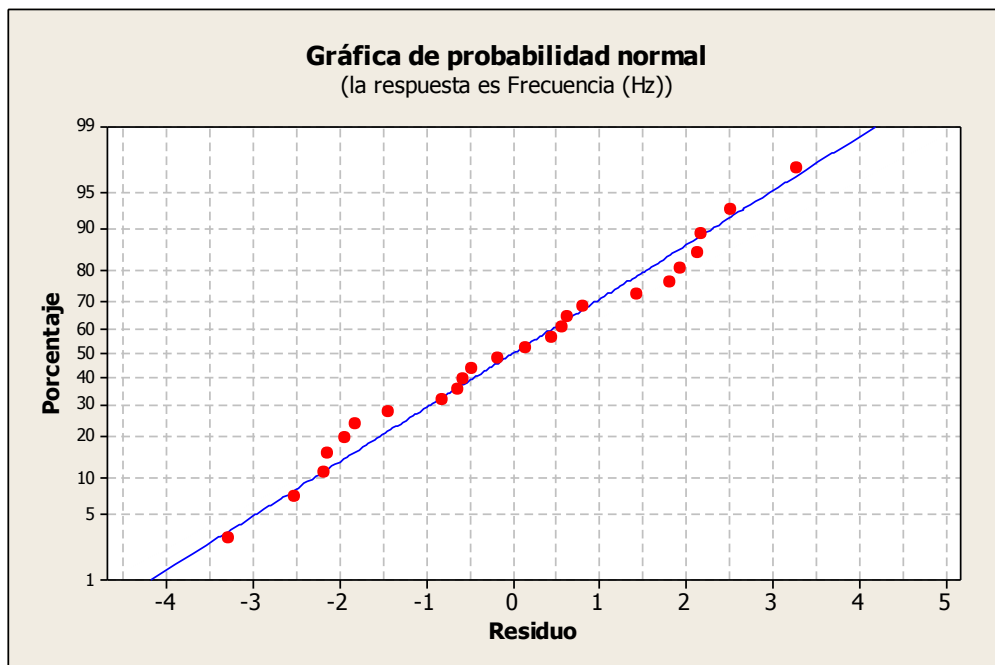


Figura 6. 16. Residuales contra a) velocidad de alimentación y b) voltaje.

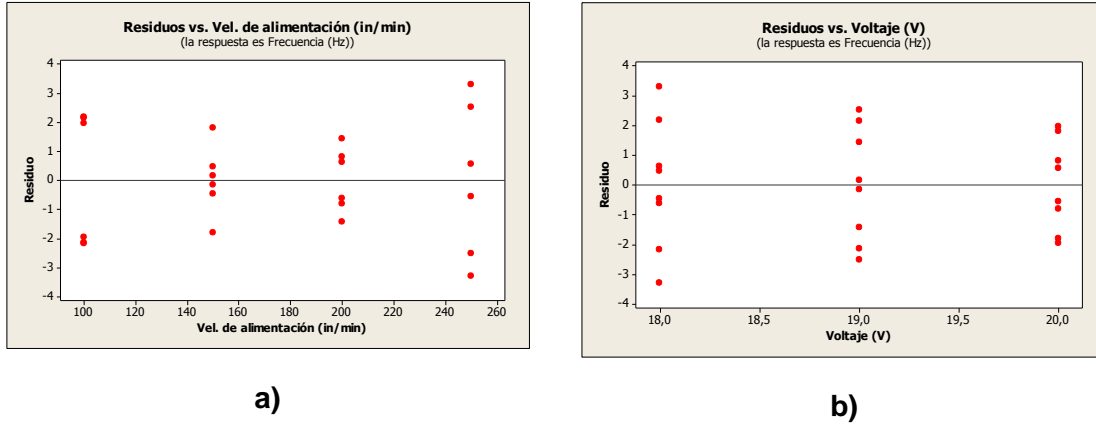
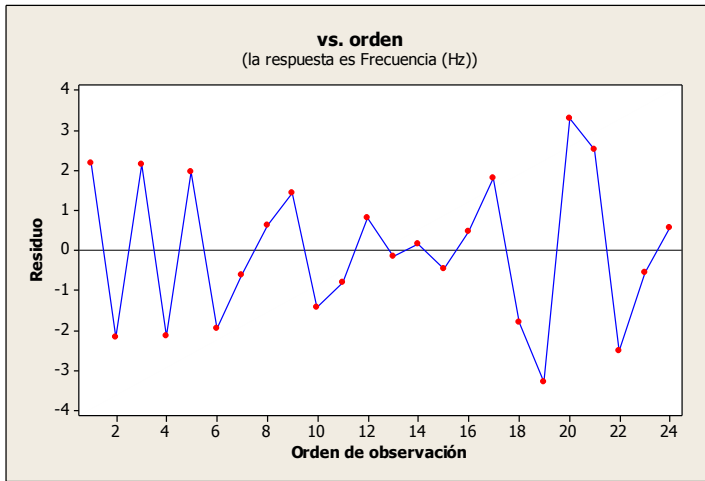


Figura 6. 17. Residuales contra orden de observación para la frecuencia de cortocircuito.



En la Tabla 6. 2 se muestra el análisis de varianza, Con los datos obtenidos se deduce que la velocidad de alimentación, el voltaje y la interacción entre ambas tienen un efecto muy significativo en la frecuencia, pues el valor P para dichos factores es mucho menor que 0,05. Además, se observa que el valor de R^2 es del 99,4% y el valor de R^2 ajustado es 98,8%, lo cual indica que el modelo es adecuado y que la variación obtenida en los valores de la frecuencia se debe exclusivamente a cambios en los factores.

Tabla 6. 2. Reporte de análisis de varianza para la frecuencia de cortocircuito.

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Vel. de alimentación (in/min)	fijo	4	100. 150. 200. 250
Voltaje (V)	fijo	3	18. 19. 20

Análisis de varianza para Frecuencia (Hz), utilizando SC ajustada para pruebas

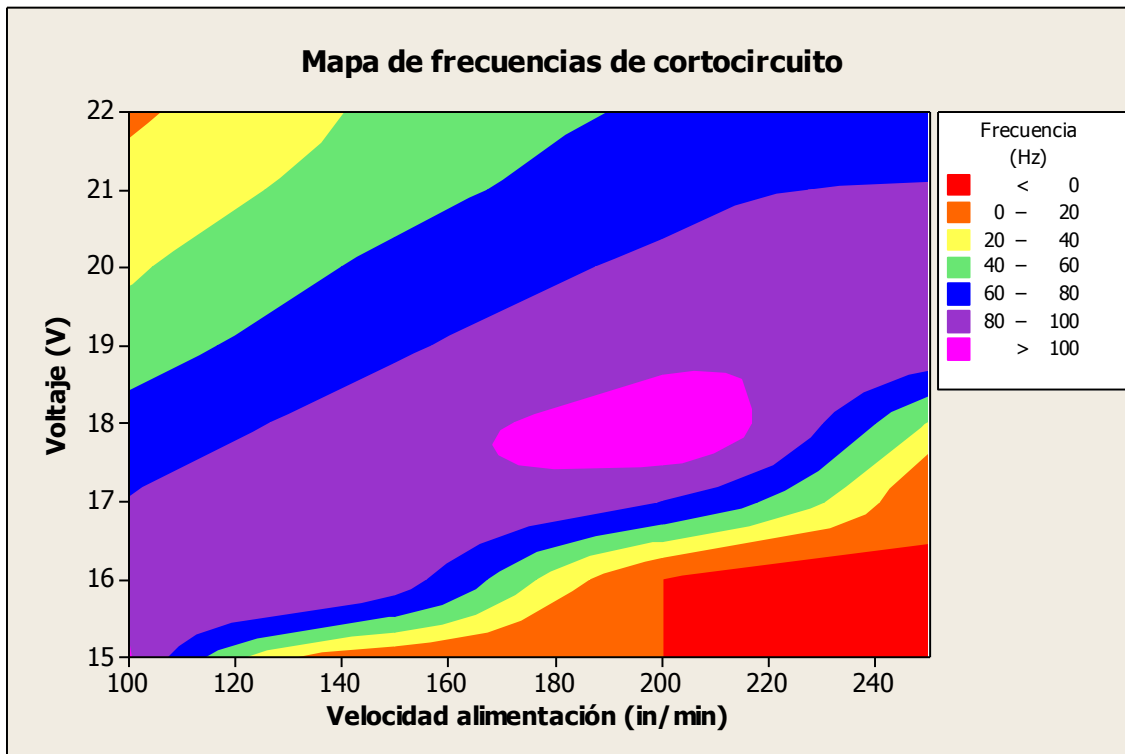
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F
Vel. de alimentación (in/min)	3	5921,0	5921,0	1973,7	318,91
Voltaje (V)	2	396,4	396,4	198,2	32,02
Vel. de alimentación (in/min)*	6	5468,6	5468,6	911,4	147,27
Voltaje (V)					
Error	12	74,3	74,3	6,2	
Total	23	11860,2			

Fuente	P
Vel. de alimentación (in/min)	0,000
Voltaje (V)	0,000
Vel. de alimentación (in/min)*	0,000
Voltaje (V)	
Error	
Total	

S = 2,48771 R-cuad. = 99,37% R-cuad.(ajustado) = 98,80%

Por medio del software *Minitab*, se creó el mapa de frecuencias de la zona donde se presentan las mayores frecuencias, el cual se calcula interpolando los valores suministrados para crear una gráfica de contornos para la frecuencia de cortocircuito, como la mostrada en la Figura 6. 18. Como se puede observar en esta gráfica, existes dos regiones, una de color rojo y una de color naranja. La región roja corresponde a altas velocidades de alimentación y bajos voltajes, en la cual el arco se extingue. La región naranja por su parte, corresponde a la región donde la frecuencia de cortocircuito está por debajo de los 20Hz y en consecuencia se trata de una región de mezcla de modos de transferencia o inestabilidad el proceso. Por otro lado, existe una región donde se presenta la mayor frecuencia, definida como mayores a 100Hz y que corresponde a velocidades de alimentación entre 170 in/min y 215 in /min y a voltajes entre 17 y 19 voltios.

Figura 6. 18. Gráfica de contornos de la frecuencia de cortocircuito para la zona de mayor estabilidad del proceso.



También, se construyeron las gráficas del periodo vs voltaje, la desviación estándar del periodo vs voltaje y la frecuencia de cortocircuito vs voltaje; para cada velocidad de alimentación, como se presenta en la Figura 6. 20, la Figura 6. 21 y la Figura 6. 21, respectivamente. Se puede observar que los menores periodos (mayores frecuencias) corresponden a las menores desviaciones estándar del periodo; y a su vez con la condición más estable del proceso, puesto que cuando la desviación estándar del periodo de transferencia es baja, la señal de cortocircuito es constante en el tiempo y en consecuencia la transferencia de metal se da de una forma regular durante el cordón de soldadura.

Figura 6. 19. Periodo de cortocircuito contra voltaje.

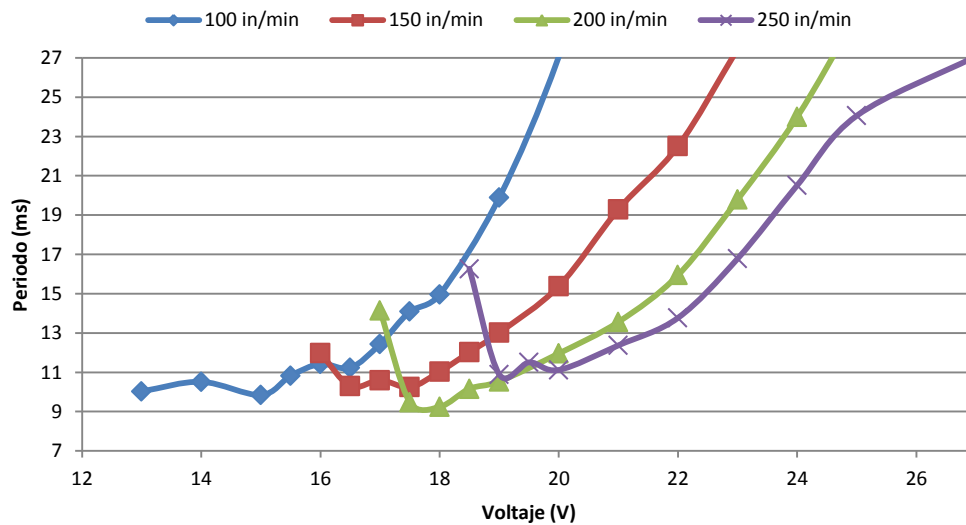


Figura 6. 20. Desviación estándar del periodo de cortocircuito contra voltaje.

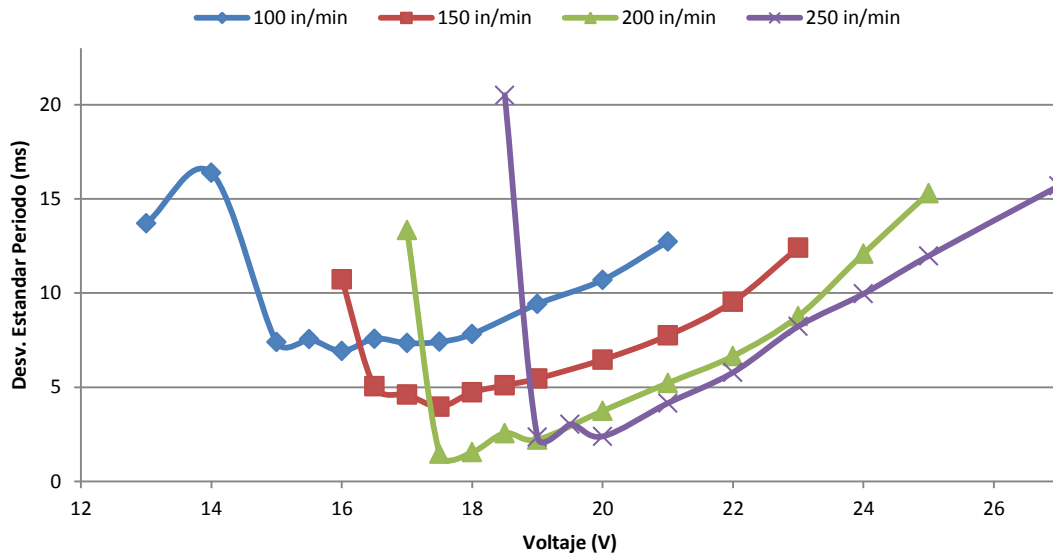
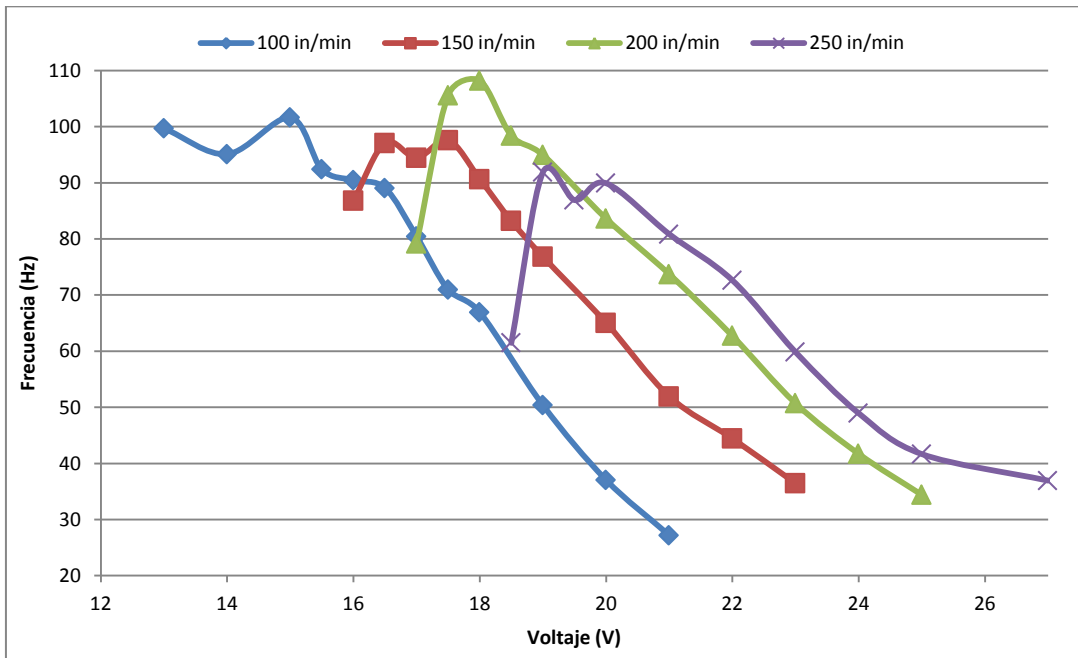


Figura 6. 21. Gráficas de frecuencia vs voltaje para la zona de mayor estabilidad.



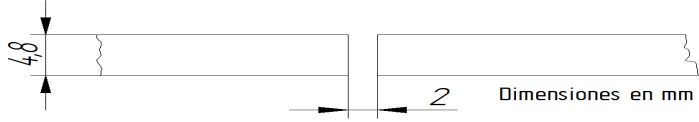
En la Tabla 6. 3 se resumen las características geométricas de los cordones que presentaron las mayores frecuencias de cortocircuito. Se puede observar que para las condiciones de soldadura utilizadas en esta parte del trabajo, ocurre que coinciden la

mayor frecuencia de cortocircuito y la mayor relación ancho/altura (mojabilidad), las cuales se dan para 200 in/min y 18V. Estos parámetros fueron seleccionados para realizar la soldadura en un solo pase de la junta a tope con ranura cuadrada mostrada en la Figura 5.6. Finalmente, con el procedimiento de soldadura presentado en la Tabla 6. 4, se logró realizar una soldadura de penetración completa en un solo pase. Este procedimiento fue tomado como referencia para caracterizar las señales acústicas y eléctricas en esta nueva condición (soldadura en junta) y para comparar los cambios que se presentan cuando se induce una perturbación y / o se genera una discontinuidad.

Tabla 6. 3. Características geométricas de los cordones de soldadura.

Forma del cordón					
Velocidad de alimentación (in/min)	Voltaje en fuente (V)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Ancho/Altura	Frecuencia (Hz)
100	15	3,7	3,3	1,1	102
150	17,5	6	3,2	1,9	98
200	18	8	3,1	2,6	108
250	19	8,5	3,5	2,4	92

Tabla 6. 4. Especificación del procedimiento de soldadura de referencia para junta cuadrada.

PROCEDIMIENTO PARA SOLDADURA EN JUNTA	
	
Detalles de la junta	
Tipo de junta	A tope
Soldadura	Ranura cuadrada
Posición	1G
Material Base	ASTM A36
Espesor de la placa (mm)	4.8
Material de Aporte	ER 70S-6
Diámetro aporte (mm)	1,2
Mezcla de Gas de Protección	75% Ar + 25% CO2
Caudal (L/min)	15
Inductancia (%)	75
Distancia tubo de contacto-pieza (mm)	16
Velocidad de aplicación (mm/s)	4.2
Angulo Avance (°)	0
Angulo trabajo (°)	90
Diámetro tobera (mm)	16
Corriente y Polaridad	CDEP
Velocidad de alimentación (in/min)	200
Voltaje (V)	18

6.3. Análisis de las señales eléctricas y acústicas de las soldaduras en junta con perturbaciones.

6.3.1. Caracterización de las soldaduras e Inspección de las señales eléctricas y acústicas

Con el procedimiento de soldadura especificado en la Tabla 6. 4 se realizaron las soldaduras de los cupones mostrados en la Figura 5.7 y la Figura 5.8, variando los parámetros indicados en la Tabla 5.2 para generar la perturbación indicada.

La Figura 6. 22, la Figura 6. 24 y la Figura 6. 24, muestran los cordones y las señales registradas durante las soldaduras. La Figura 6. 22 corresponde a la soldadura donde se evaluó: la abertura de raíz baja (1mm), la abertura de raíz normal (2mm) y la abertura de raíz alta (3.5mm). La sección del cupón de soldadura con la abertura de raíz normal corresponde a las condiciones de referencia de la soldadura.

Figura 6. 22. Soldadura de cupón de abertura de raíz variable y registro de las señales. a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.

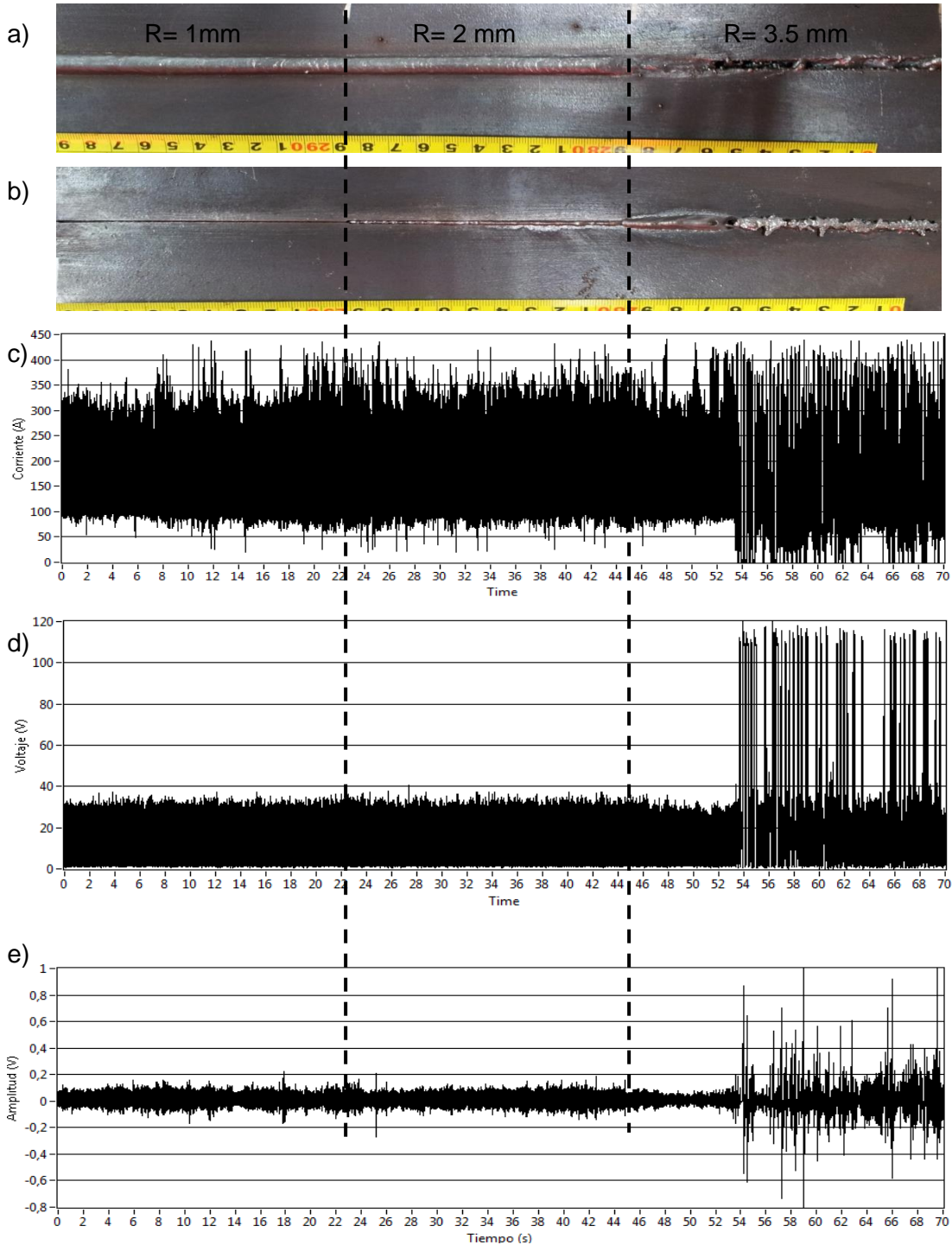


Figura 6. 23. Soldadura con cambio del caudal de gas y registro de las señales. a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.

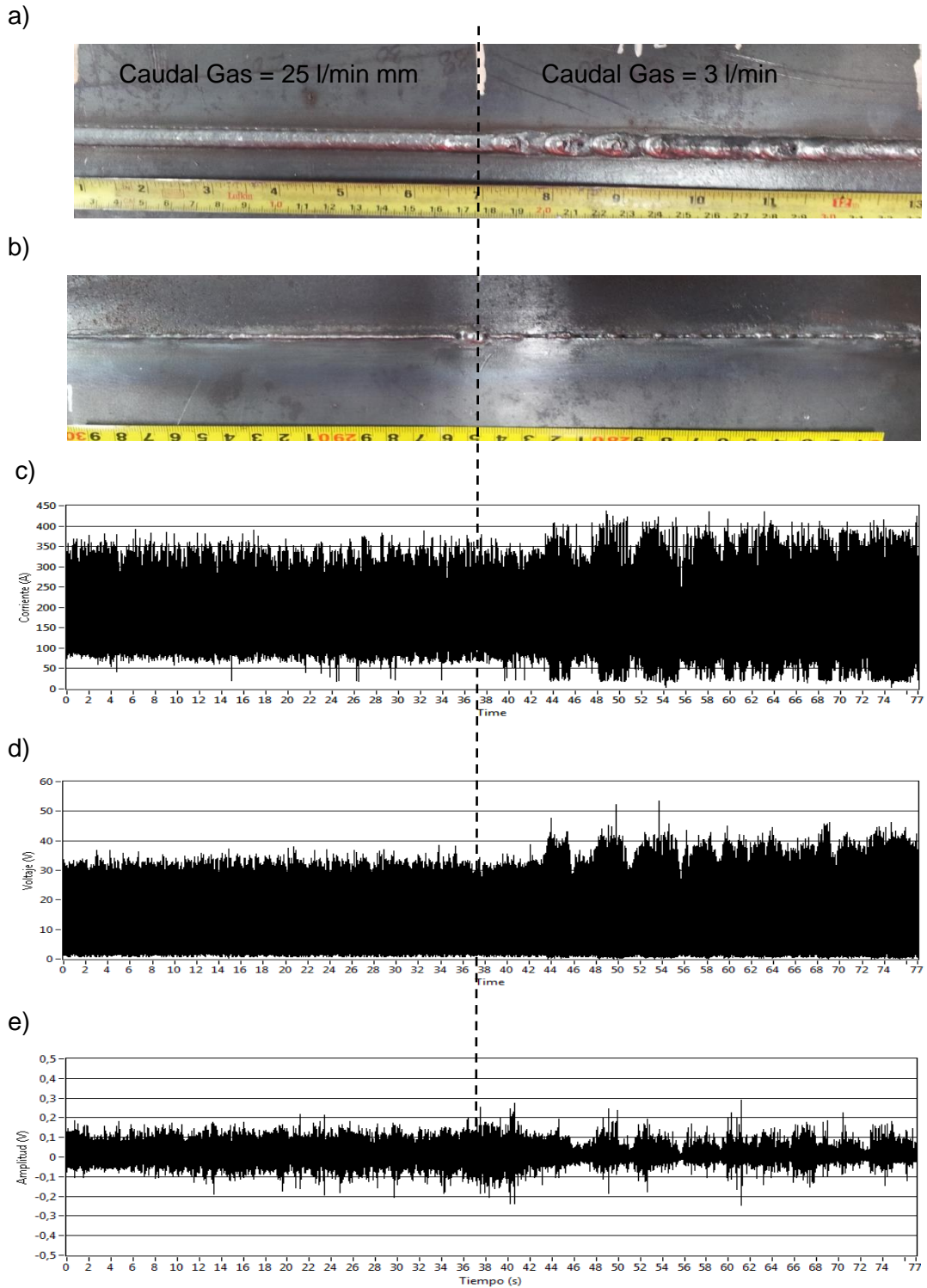
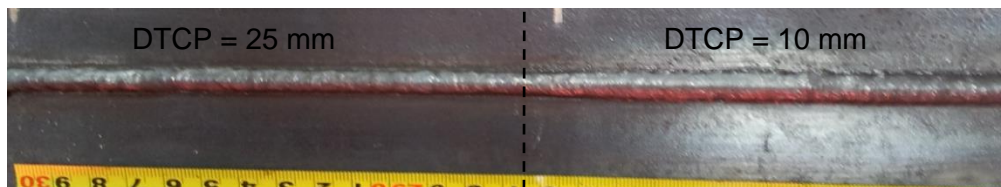
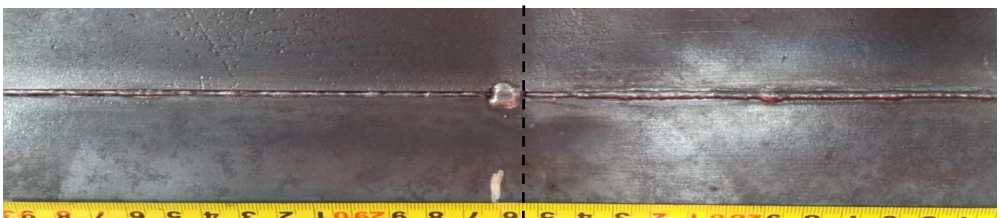


Figura 6. 24. Soldadura con cambio de la DTCP, a) cara de la soldadura, b) raíz de la soldadura, c) señal de corriente, d) señal de voltaje y e) señal de presión acústica.

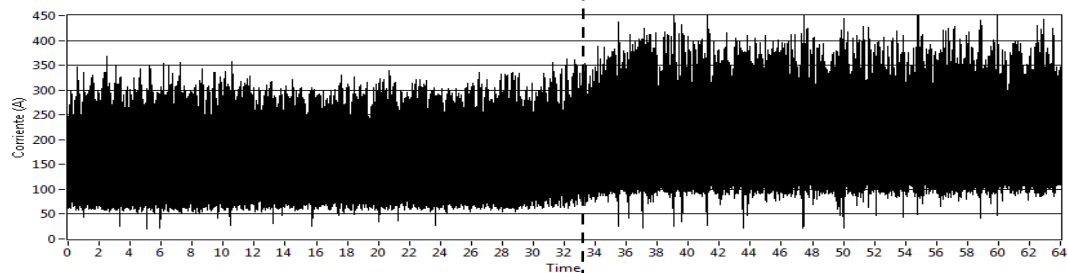
a)



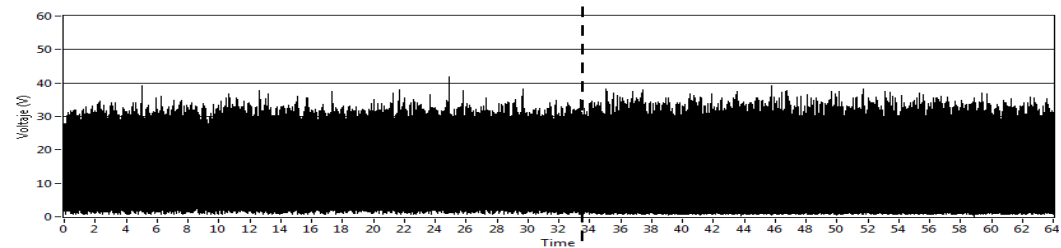
b)



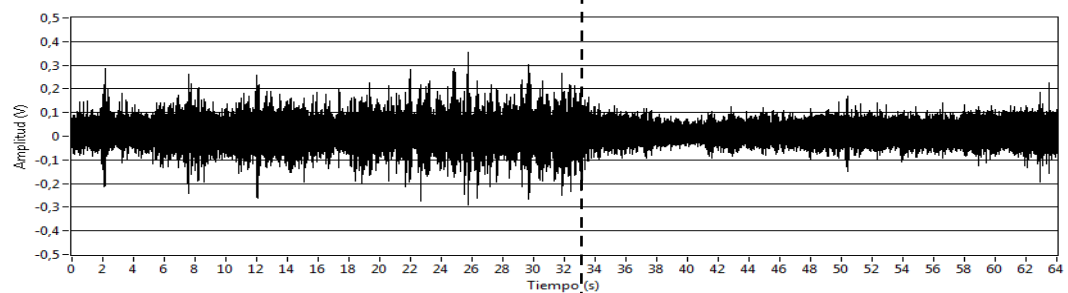
c)



d)



e)



En las Figura 6. 22 b), c) y d), se presentan las señales de corriente, voltaje y presión acústica registradas durante la soldadura. Las señales de corriente y voltaje son muy similares en las secciones correspondientes a abertura de raíz baja y normal, 1 y 2mm respectivamente. En la sección con abertura de raíz grande, 3.5 mm, donde se presenta sobrepenetración y el cordón de soldadura es irregular, se puede observar un fuerte cambio en la forma de las señales, que consiste en un aumento de la amplitud y un cambio en la regularidad con la que se presentaba la señal en las demás secciones. La señal de presión acústica en esta región, presenta fuertes pulsos de manera irregular, los cuales coinciden con los cambios en la potencia del arco (producto de la corriente y el voltaje).

La Figura 6. 23 corresponde al cupón de soldadura para el cual se cambió el caudal de gas de protección de alto (25 litros/min) a bajo (3 litros/min), se puede observar que la primera mitad del cordón posee una superficie homogénea y libre de defectos, así como una adecuada penetración. La segunda mitad del cordón presenta poros visibles en la cara del cordón y distribuidos a lo largo de este; además, se presentan una superficie irregular donde se observan ondulaciones del cordón (aumento y disminución del refuerzo o altura, entre 2 mm y 4 mm) las cuales se alternan con faltas de penetración. Las señales de corriente, voltaje y presión acústica son homogéneas a lo largo de la primera mitad del cordón donde se cambió el caudal de gas, inclusive la señal sigue igual después de la mitad del cupón, debido a que el caudal de gas continuaba alto. La señal acústica en esta primera parte permaneció homogénea, aunque los diferentes pulsos se observan con una amplitud mayor a la obtenida en la señal de la zona de referencia.

En la segunda mitad del cordón, tanto la corriente como el voltaje cambiaron; aumentó la amplitud y la forma de la señal es diferente; la cual cambia con la forma del cordón. Igual que con las señales de corriente y voltaje, la señal acústica presentó irregularidad en la segunda mitad del cordón, mostrando una variación similar en las zonas de cambio de la altura del cordón y mostrando pulsos con una amplitud mayor.

La Figura 6. 24 corresponde al cupón de soldadura en el cual se cambió la distancia tubo de contacto pieza (DTCP), de alta (25 mm) a baja (10 mm). En las Figura 6. 24 a) y b), se puede observar que la primera mitad del cordón es más delgado y no presentó penetración completa, mientras que en la segunda mitad el cordón es más ancho y presenta penetración completa (los detalles de la inspección visual de las soldaduras se

muestran en las Tabla 6. 5 a 6.11). La señal de voltaje permanece constante durante el cordón de soldadura, debido a que la perturbación solamente consistió en cambiar la DTCP y la fuente de soldadura es de voltaje constante. Sin embargo, esta perturbación afectó fuertemente la corriente, en la cual es evidente el cambio pues, la corriente pasó de un nivel más bajo (respecto a la señal de referencia) en la primera parte de la soldadura a un nivel más alto en la segunda parte. Esto es debido a la disminución de la longitud del electrodo "Stick Out", la cual genera una resistencia menor y en consecuencia la corriente debe aumentar para balancear la tasa de fusión de metal de aporte con la velocidad de alimentación de este. A pesar del cambio en los niveles de corriente, la señal mostró regularidad en el tiempo, es decir su forma no varió. La señal de presión acústica mostró cambios en la amplitud respecto a la señal de referencia, en la primera parte del cordón la amplitud es mayor y en la segunda parte del cordón es menor que la soldadura de referencia. La forma de la señal es más regular en la segunda parte del cordón respecto a la primera parte e inclusive a la señal de referencia (parte central de la Figura 6. 22 e).

En las Tabla 6. 5 a 6.11 se presentan los registros de la inspección visual realizado a las soldaduras; también se incluye el macroataque de la sección transversal y el registro de las pruebas de doblez y de ruptura.

Tabla 6. 5. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas en la soldadura de referencia.

Soldadura de Referencia				
Prueba	Forma del cordón	Macroataque Sección transv.	Dobleza de raíz	Ruptura
				
Observaciones	Cordón uniforme en toda su longitud. no presenta salpicadura y la penetración es adecuada.	Ancho: 7.5 mm Refuerzo raíz: 2.5 mm Refuerzo cara: 1 mm	No presenta discontinuidades en la superficie doblada. A pesar de no pulirse el refuerzo de raíz de la soldadura.	Superficie libre de discontinuidades, las partes mas brillantes corresponden a la fractura final, aparentemente frágil.

Como se puede observar en la Tabla 6. 5 la soldadura no presentó discontinuidades considerables como defectos, la prueba de dobleza de raíz y la sección transversal no muestra discontinuidades y el cordón tiene un perfil de soldadura que cumple con los requerimientos del código AWS D1.1. La prueba de ruptura muestra una superficie sana, sin presencia de discontinuidades

En la Tabla 6. 6 se resumen los resultados de la inspección visual y el macroataque de la sección transversal del cordón, las pruebas de dobleza y de ruptura no fue necesario realizarlas, debido a que ya se había detectado el defecto ocasionado por la perturbación. En la Tabla 6. 7 se presentan los resultados de la inspección visual correspondiente a la soldadura con abertura de raíz alta, en este caso la soldadura presentó discontinuidades consideradas como defectos en la inspección visual.

Tabla 6. 6. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de abertura de raíz baja.

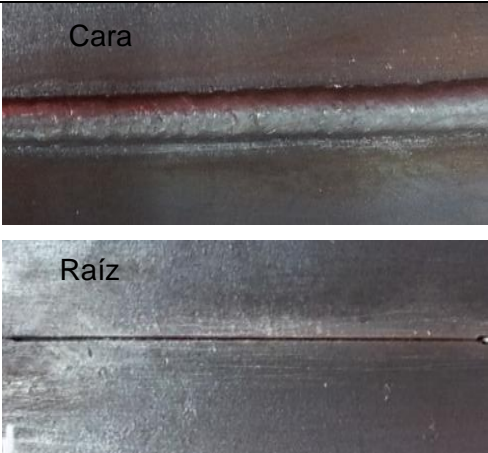
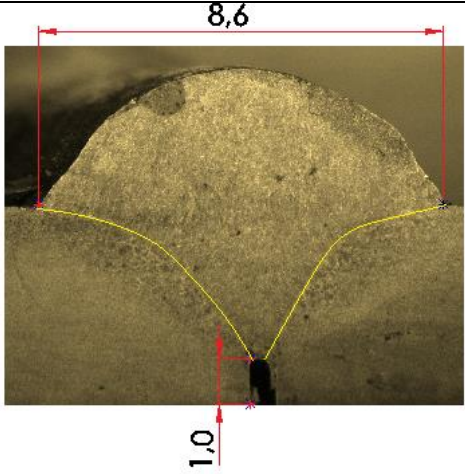
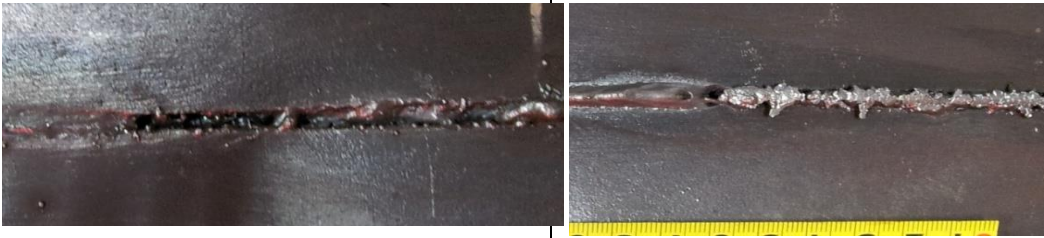
		Abertura de raíz de 1mm	
Prueba	Inspección Visual		Macroataque Sección transv.
			
Obsevaciones	<p>En la cara de la soldadura se puede observar un cordón uniforme en su longitud, sin salpicadura.</p>		<p>Ancho: 8.5 mm Refuerzo cara: 3.5 mm Refuerzo raíz: FALTA DE PENETRACIÓN</p>

Tabla 6. 7. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de abertura de raíz alta.

		Abertura de raíz de 3.5 mm	
Prueba	Inspección Visual		
	Cara	Raíz	
			
Obsevaciones	<p>El cordón de soldadura no es uniforme y presenta falta de llenado en la cara.</p>		<p>En la raíz de la soldadura se puede observar un cordón irregular, con sobrepenetración, además no hay fusión uniforme entre el metal soldado y los bordes de la junta.</p>

La Tabla 6. 8 corresponde a la soldadura con caudal de gas bajo, en este caso se realizó inspección visual, macroataque y ruptura, para mostrar los defectos al interior del metal soldado. La Tabla 6. 9 corresponde a la soldadura con caudal de gas alto, la cual no presentó discontinuidades que se pudieran considerar como defectos.

Tabla 6. 8. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de caudal de gas bajo.

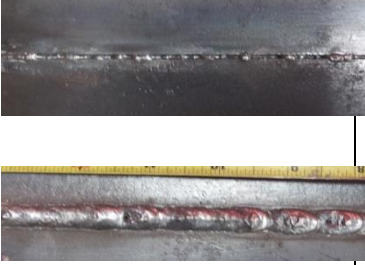
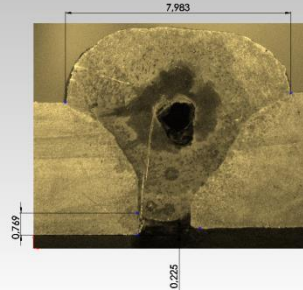



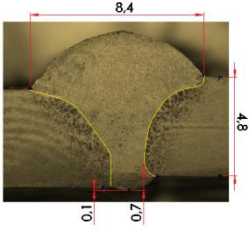

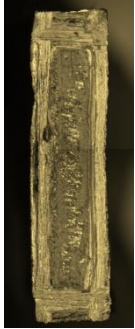
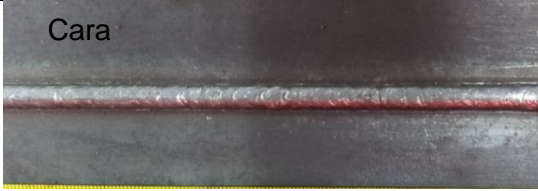

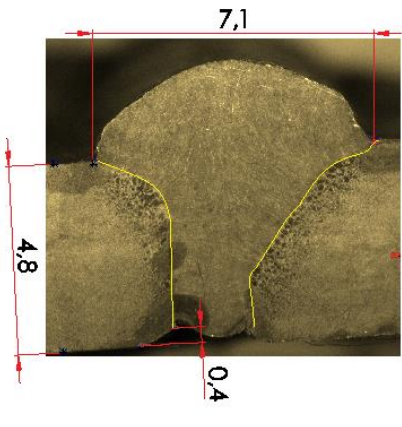
Caudal de gas de 3 L/min			
	Inspección Visual	Macroataque Sección transv.	Ruptura
Prueba			
Observaciones	<p>Cordón no uniforme en su longitud, presenta cambios en el ancho y el refuerzo. En la raíz se observa falta de penetración en la mayor parte del cordón, en algunos puntos se observa penetración completa. Presenta porosidad abierta en la superficie del cordón, agrupada en varios puntos del cordón.</p>	<p>Ancho: entre 7 y 8.5 mm Refuerzo cara: entre 1.5 y 4 mm Refuerzo raíz: 1 mm y presenta falta de penetración</p>	<p>Presencia de poros en la mayor parte de la superficie de la fractura.</p>

Tabla 6. 9. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de caudal de gas alto.

Caudal de gas de 25 L/min					
	Inspección Visual		Macroataque Sección transv.	Doblez de raíz	Ruptura
	Cara	Raíz			
Prueba					
Obsevaciones	Cordón uniforme en su longitud y penetración adecuada.		Ancho: 7.5 mm Refuerzo cara: 2 mm Refuerzo raíz: 1 mm	No muestra discontinuidades en la superficie doblada.	Superficie libre de discontinuidades, las partes mas brillantes corresponden a la fractura final, aparentemente frágil.


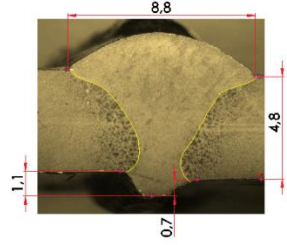


En la Tabla 6. 10 se resumen los resultados de la inspección visual y las pruebas destructivas de la soldadura con DTCP alta, debido a que se presentó falta de penetración, solo se realizó el macroataque de la sección transversal.

Tabla 6. 10. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación de DTCP alta.

DTCP de 25mm		
Prueba	<p>Inspección Visual</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Cara</p>  </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>Raíz</p>  </div> </div>	<p>Macroataque Sección transversal</p> 
	<p>Obsevaciones</p> <p>Cordón uniforme en su longitud. Presenta falta de penetración a lo largo del cordón.</p>	<p>Ancho: 6.5 mm Refuerzo cara: 3 mm Refuerzo raíz: Falta de penetración.</p>

La Tabla 6. 11 presenta los resultados de la soldadura con DTCP baja, esta condición de soldadura es aceptable visualmente y las pruebas destructivas no mostraron discontinuidades.

Tabla 6. 11. Inspección visual y resultados de pruebas destructivas para soldadura con perturbación DTCP baja.

DTCP de 10 mm					
	Inspección Visual		Macroataque Sección transv.	Doblez de raíz	Ruptura
	Cara	Raíz			
Prueba					
Obsevesiones	<p>Cordón uniforme en su longitud. La raíz de la soldadura presentó la mayor penetración, aunque no es considerada como un defecto.</p>		<p>Ancho: 7.5 mm Refuerzo cara: 2 mm Refuerzo raíz: 2.5 mm</p>	<p>No muestra discontinuidades en la superficie doblada.</p>	<p>La ruptura se dio en la ZAT, Lo que indica una mayor resistencia del metal soldado</p>

6.3.2. Análisis de las señales eléctricas

A continuación se presenta el análisis de las señales eléctricas para cada una de las condiciones de soldadura evaluadas. A partir de las señales de voltaje y corriente se graficaron la potencia del arco (producto $I \cdot V$), la resistencia del arco (cociente I/V) y la frecuencia instantánea de cortocircuito, durante el cordón de soldadura. Adicionalmente, se graficaron el periodo promedio de cortocircuito y la desviación estándar del periodo de cortocircuito para cada una de las regiones de los cordones de soldadura donde se indujeron las perturbaciones.

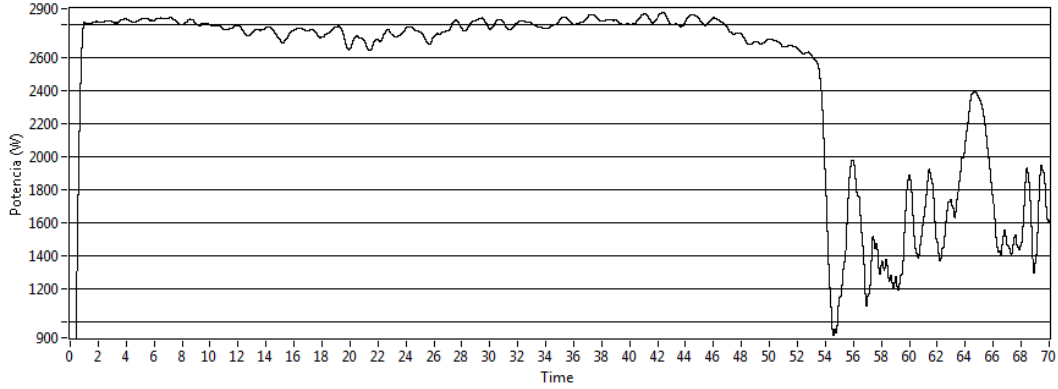
6.3.2.1. Soldadura con cambio en la abertura de raíz

Las Figura 6. 25 a y b muestran la potencia y la resistencia del arco, calculadas a partir de la corriente y el voltaje del arco registrados durante la soldadura del cupón con cambios en la abertura de raíz. La Figura 6. 25 c) corresponde a la frecuencia instantánea de cortocircuito. Para realizar las gráficas se calculó la potencia, la resistencia y la frecuencia instantánea, luego se aplicó una media móvil con una ventana de análisis de 0.5 segundos de tamaño, con lo cual se suavizó la señal.

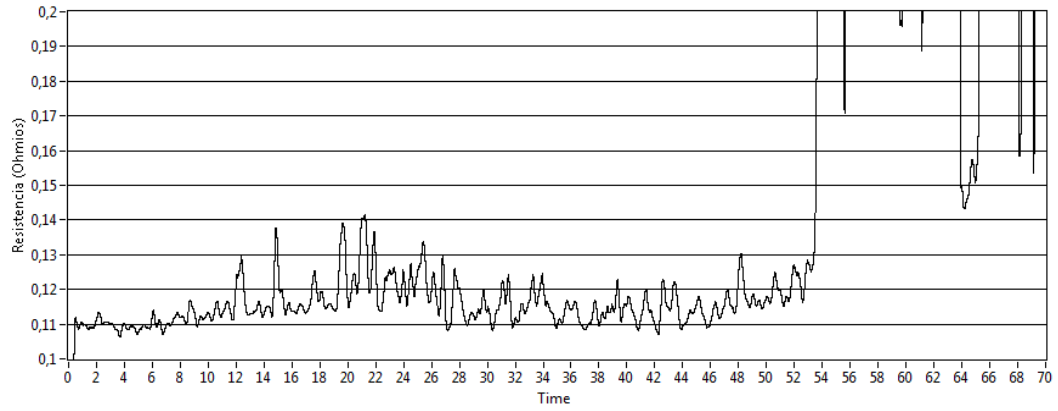
La primera parte del cordón (hasta $t=22$ segundos) corresponde a la abertura de raíz baja, la cual generó una falta de penetración. En esta parte de la soldadura, la potencia y la resistencia permanecen alrededor de un valor constante, 1800 W y 0,115 Ohmios, aunque la resistencia muestra una mayor variación. La frecuencia por su parte varía entre 100 Hz y 85 Hz. La parte central de las soldaduras (entre 22s y 44s) corresponde a la soldadura con abertura de raíz normal (2mm), la cual corresponde a la soldadura de referencia. En esta región la potencia y la resistencia permanecen constantes alrededor de los 1800W y 0,115 Ohmios, la resistencia muestra la menor variación respecto a las demás partes de la soldadura. La frecuencia por su parte permanece estable alrededor de los 97 Hz. La última parte de la soldadura (entre 44s y 70s aproximadamente) se realizó con una abertura de raíz alta (3.5mm), La señal de corriente muestra una drástica reducción hasta valores de 900W, debido a que en esta parte del cordón ocurrió una interrupción de arco y la corriente llegó a valores alrededor de los 25 A, por su parte la resistencia del arco mostró un aumento considerable, a valores por encima de 0.2 Ohmios, debido a que el voltaje alcanzaba por momentos los niveles de arco abierto de la máquina y la corriente se redujo a los valores descritos anteriormente.

Figura 6. 25. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en la abertura de raíz.

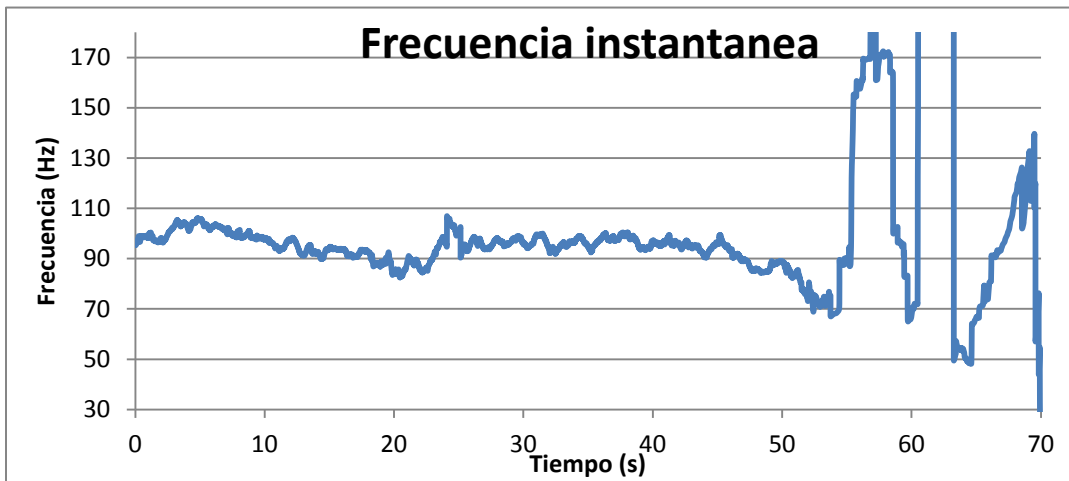
a)



b)



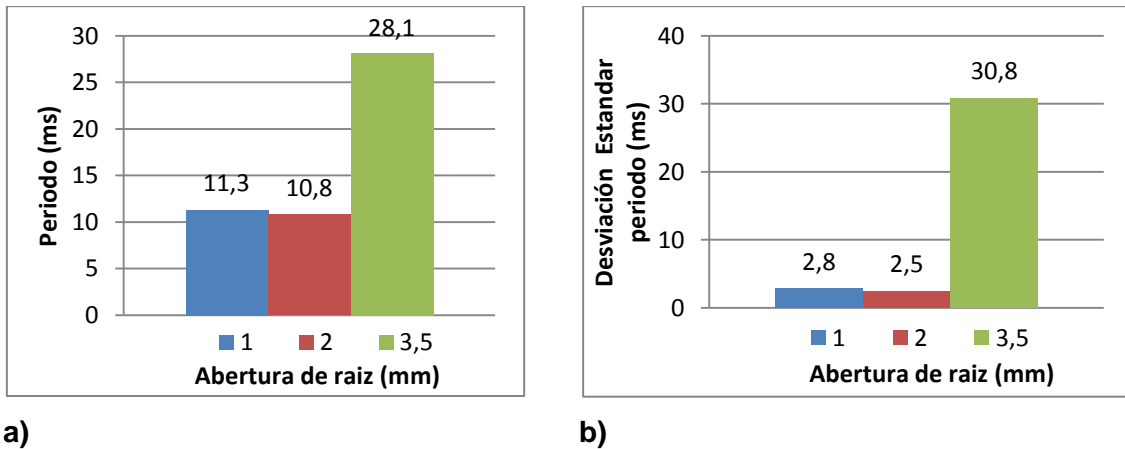
c)



En esta región la frecuencia mostró un cambio significativo, en algún momento alcanzó valores por encima de 170 Hz y por debajo de 50 Hz, Esto se debe a que se presentaron cortocircuitos de muy corta duración donde no hay transferencia de metal y se dan justo después de una interrupción del arco y de la solidificación del charco de soldadura.

La Figura 6. 26 muestra el promedio del periodo de cortocircuito y la desviación estándar del periodo de cortocircuito para cada una de las secciones del cordón de soldadura con cambios en la abertura de raíz. Se puede observar que la condición que muestra la mayor estabilidad corresponde a la condición normal de referencia pues presenta el menor periodo de cortocircuito y la menor desviación estándar. La parte del cordón de soldadura con abertura de raíz de 1 mm muestra un leve aumento del periodo y de la desviación estándar, debido a que en esta parte del cordón el refuerzo es mayor, lo cual ocasiona un cambio en la extensión del electrodo y puede ser la causa de esta ligera desviación respecto a la condición de referencia para estos índices de estabilidad. La condición de soldadura con abertura de raíz de 3.5mm corresponde a la más inestable, lo cual ya se evidenciaba desde la forma misma de la señal.

Figura 6. 26. Graficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambios en la abertura de raíz.



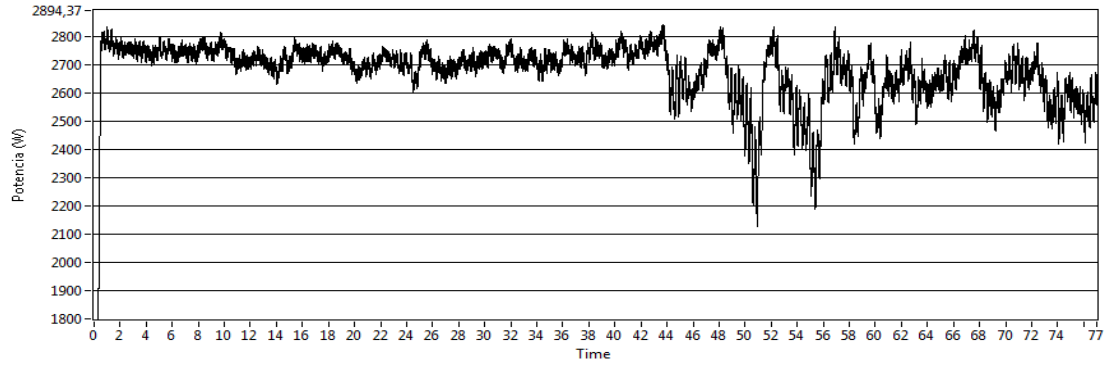
6.3.2.2. Soldadura con cambio en el caudal de gas de protección

Las Figura 6. 27 a, b y c, corresponden a las gráficas de potencia, resistencia y frecuencia instantánea para la soldadura con cambios en el caudal de gas de protección. En la primera parte de la gráfica, (hasta $t=36$ segundos aproximadamente) el caudal de gas se mantuvo alto (en 25 litros/min), las señales de potencia y resistencia permanecieron constantes, con poca variación y con valores similares a los de la soldadura de referencia, es decir en 2800 W y 0,115 Ohmios. Por su parte la frecuencia de cortocircuito permanece bastante constante, alrededor de los 100 Hz. Estos resultados muestran que el aumento del caudal de gas de protección no generó una perturbación durante el proceso, lo cual se debe a que incluso con el flujo de gas más alto que se pudo establecer no se indujo un flujo turbulento del gas de protección en la región del arco de soldadura.

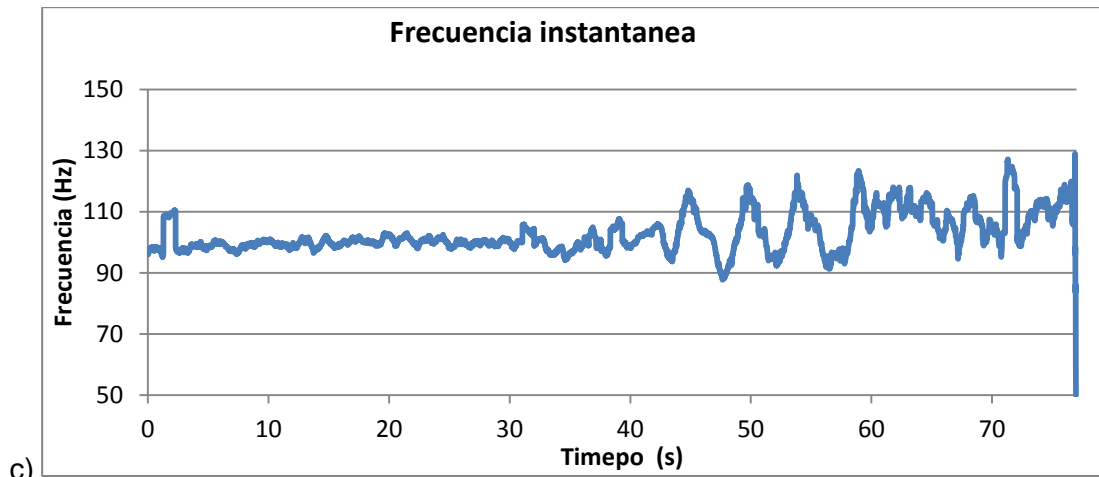
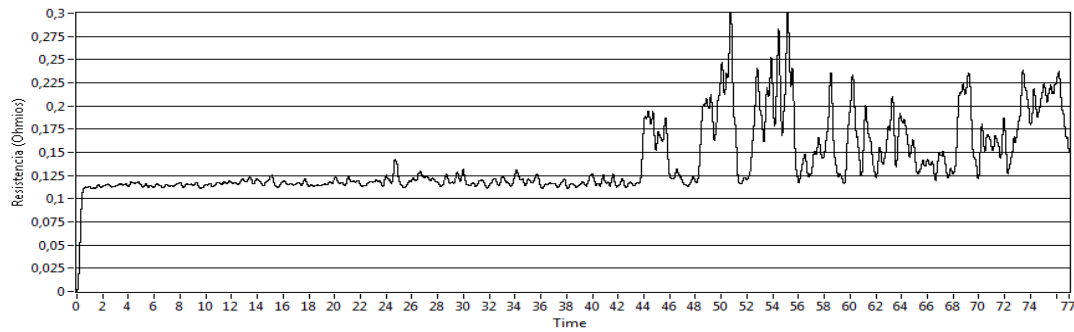
En la segunda parte de las gráficas (a partir de $t=40$ segundos aproximadamente) se redujo el caudal de gas a 3 litros/min, con esta reducción del caudal de gas la potencia, la resistencia y la frecuencia de cortocircuito comienzan a variar significativamente, dicha variación coincide con lo ocurrido en las señales de corriente, voltaje y presión acústica; también corresponde con la ondulación del cordón de soldadura registrada en la inspección visual. Debido al cambio en la composición de la atmósfera protectora, puesto que el gas de protección que rodea al arco y al charco de soldadura es una mezcla de gas atmosférico y el gas de protección. La variación en estos parámetros se puede deber a dos fenómenos simultáneos, por un lado se espera una variación en la estabilidad del modo de transferencia y por otro lado, el comportamiento del charco de soldadura se ve afectado debido al cambio en la tensión superficial generado por una atmosfera protectora diferente; lo cual coincide con la forma ondulada del cordón de soldadura.

Figura 6. 27. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en el caudal de gas.

a)



b)

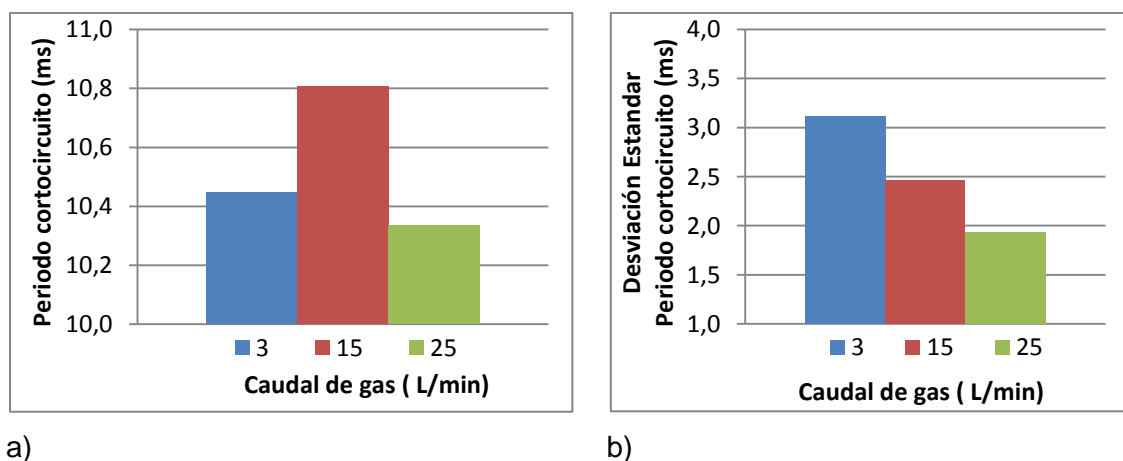


c)

En la Figura 6. 28 se grafica el periodo de cortocircuito y la desviación estándar del periodo para las condiciones de caudal de gas bajo, normal y alto. El periodo de cortocircuito no varía significativamente para las tres condiciones evaluadas, el periodo más bajo, 10.3 ms, corresponde al caudal de gas alto mientras que el periodo más alto, 10.8 ms, corresponde al caudal de gas normal. El periodo de cortocircuito promedio para la condición de gas bajo, está en 10.5 ms, inclusive es inferior la condición normal. Como se mostró en la Tabla 6. 8, esta parte del cordón de soldadura presentó porosidad y las señales eléctricas mostraron una fuerte variación. Sin embargo, el promedio del periodo de cortocircuito es pequeño, lo cual se debe a que aunque hubo aumentos y disminuciones significativas, el promedio no se afectó. Por esta razón, dicho parámetro por si solo no ayuda a revelar la perturbación del proceso y el consecuente defecto generado en la soldadura.

Por otro lado, la Figura 6. 28 b) muestra la desviación estándar del periodo de cortocircuito, se puede observar que para el caudal de 3 litros por minuto, la desviación estándar es la más alta entre las condiciones evaluadas. Este resultado demuestra que el proceso fue más inestable para esta condición. Con un caudal de gas de protección alto (25l/min) la desviación estándar es menor que para el caudal de referencia (15 l/min).

Figura 6. 28. Gráficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambio en el caudal de gas.



El caudal de gas alto, mostró la condición más estable, puesto que el periodo de cortocircuito y la desviación estándar del periodo son los valores más bajos; además,

igual que el cordón de soldadura de referencia, esta parte del cordón no mostró discontinuidades que pudieran ser considerados como defectos.

6.3.2.3. Soldadura con cambio en la Distancia Tubo de Contacto Pieza

En la Figura 6. 29 a, b y c, se muestran la potencia, la resistencia y la frecuencia de cortocircuito para la soldadura en la cual se cambió la distancia tubo de contacto pieza (DTCP). La primera parte de las gráficas (hasta $t = 29$ segundos aproximadamente) corresponden a la DTCP alta, se puede ver que para esta condición la potencia del arco disminuye respecto a la condición de referencia, a un valor alrededor de 2400W, la resistencia del arco aumenta respecto a la condición de referencia y se mantuvo constante alrededor de 0,14 Ohmios.

La segunda parte de la Figura 6. 29 (a partir de $t = 36$ segundos) corresponde a la DTCP baja, se puede observar que la potencia aumenta y la resistencia disminuye, esto es debido únicamente al cambio en la corriente del arco, la cual pasó de un nivel bajo a un nivel alto, en respuesta a la menor resistencia del electrodo ocasionada por una menor DTCP. Por su parte la frecuencia permaneció estable en ambas condiciones de soldadura, entre 93 Hz y 103Hz. Lo que quiere decir, que este parámetro no reacciona significativamente con el cambio en la DTCP.

En la Figura 6. 30, se grafican el periodo de cortocircuito y la desviación estándar del periodo de cortocircuito, se puede observar que no hay cambio significativo en el periodo lo cual coincide con la Figura 6. 29 c. La Figura 6. 30 b corresponde a la gráfica de la desviación estándar del periodo, la DTCP de 25 mm mostro la mayor desviación estándar, la cual coincide con la falta de penetración en esta parte del cupón de soldadura. Para las DTCP normal y baja, la desviación coincide con unas condiciones más estables y con soldaduras libres de defectos.

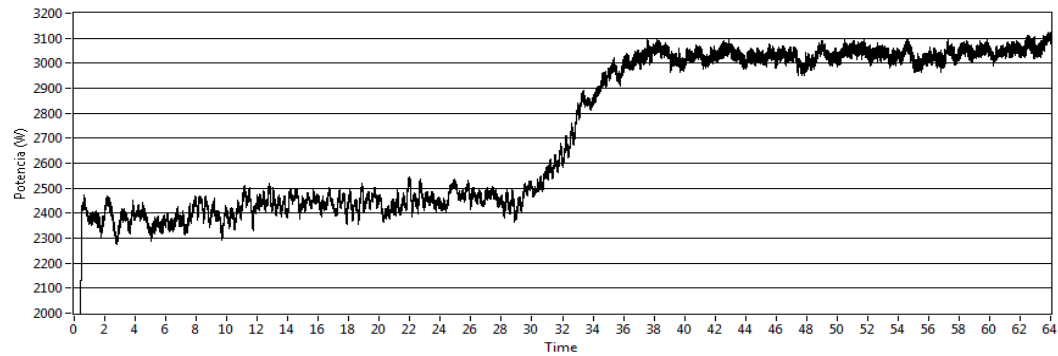
En la Tabla 6. 12 se presenta el resumen de los parámetros usados en el análisis de las señales eléctricas y los defectos encontrados en las soldaduras. Se puede observar que el periodo de cortocircuito no se alteró de acuerdo a lo que se había establecido, es decir, los periodos de cortocircuito más bajos corresponden a las condiciones más

estables. Para el caudal de gas bajo, se obtuvieron periodos de cortocircuito pequeños, incluso menores al de la soldadura de referencia; y la soldadura resultó defectuosa. Esto es debido al cálculo como tal del promedio de cortocircuito, en la Figura 6. 23 se puede observar el cambio en la frecuencia de cortocircuito, donde se aplicó la perturbación de caudal de gas bajo, la frecuencia varía desde 75Hz hasta 125 Hz, pero en promedio se mantiene alrededor de los 100 Hz (periodo de 10ms). En cambio, la desviación estándar del periodo es el parámetro que mejor define la estabilidad del proceso, debido a que en las soldaduras con defectos estuvo por encima de 2.6 ms.

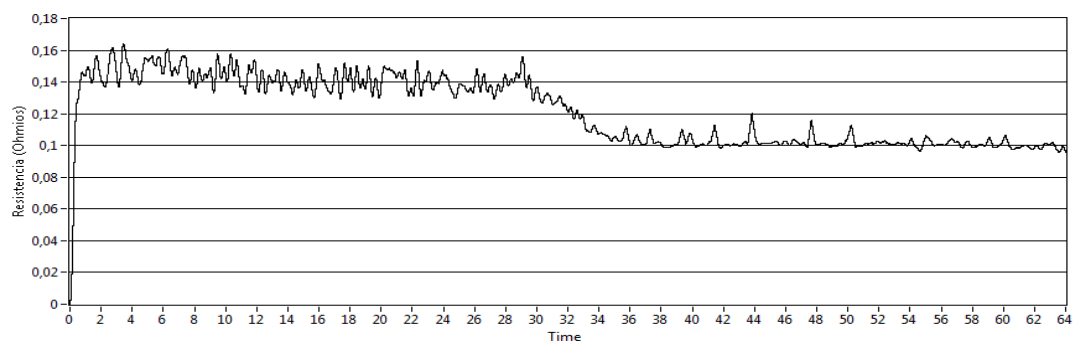
Por otro lado la potencia y la resistencia del arco, son parámetros que varían directamente con la variación de la corriente y el voltaje, en este sentido, estos parámetros son bastante sensibles a las perturbaciones del proceso. Para este caso, se puede observar que en las soldaduras con defectos, la potencia tiende a ser más baja que en las soldaduras libres de defectos; la resistencia por su parte, tiende a niveles más altos, puesto que es el inverso de la corriente. En consecuencia, debido a la sensibilidad frente a las perturbaciones del proceso, estos parámetros servirían para monitorear la calidad de la soldadura una vez establecidos los parámetros de referencia y caracterizada la señal de potencia y resistencia.

Figura 6. 29. Gráficas de a) Potencia del arco, b) Resistencia del arco y c) Frecuencia instantánea de cortocircuito para soldadura con cambio en DTCP.

a)



b)



c)

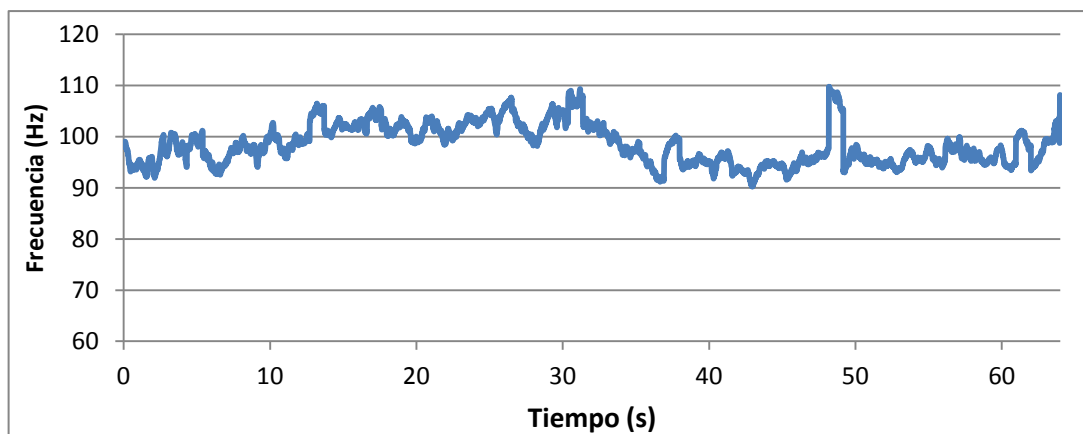


Figura 6. 30. Gráficas de a) Periodo de cortocircuito y b) Desviación estándar del periodo de cortocircuito en la soldadura con cambio en la DTCP.

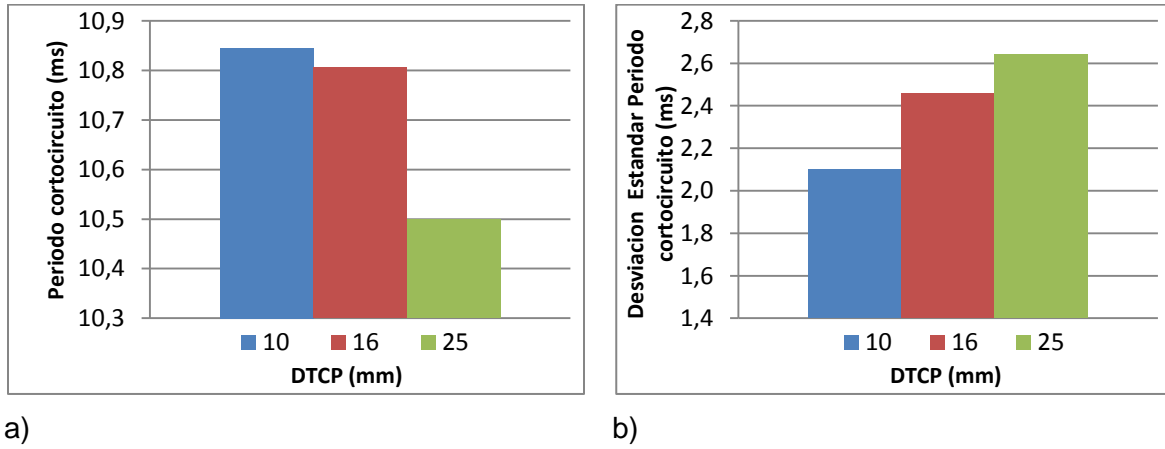


Tabla 6. 12. . Resumen de los parámetros de las señales eléctricas y los defectos de soldadura.

		Defecto ó condición de la soldadura							
		Soldadura libre de defectos			Falta de penetración			Porosidad	Interrupción del arco/Sobre-penetración
Perturbación		PR*	Q= 25 L/min	DTCP= 10mm	R = 1mm	Q = 3l/min	DTCP= 25mm	Q= 3l/min	R=3.5mm
Parámetro de estabilidad	Periodo de CC (ms)	10,8	10,3	10,8	11,3	10,4	10,5	10,4	28,1
	Desviación Estándar Periodo CC (ms)	2,5	1,9	2,1	2,8	3,1	2,6	3,1	30,8
	Potencia del arco (W)	2817	2723	3032	2767	2627	2423	2627	1622
	Resistencia del arco (Oh)	0,1144	0,1176	0,1017	0,1181	0,1655	0,1432	0,1655	>1

*PR: Parámetros de referencia.

6.3.3. Análisis de las señales acústicas

Inicialmente se analizó la forma de la señal en cada una de las zonas de la soldadura donde se presentó la perturbación, este análisis fue complementado con el cálculo del valor RMS (Root Mean Square) y la curtosis de la señal. La curtosis es usada para describir la dispersión de la amplitud y es un parámetro adimensional que se relaciona con la forma de la señal. En el dominio de la frecuencia se calculó, mediante la transformada rápida de Fourier, la densidad espectral de potencia (PSD) de la señal acústica obtenida en cada una de las zonas con perturbación y de la soldadura de referencia.

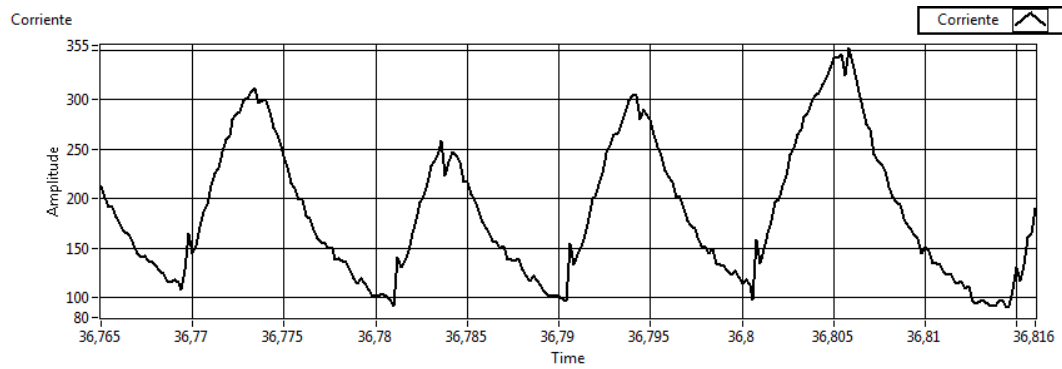
6.3.3.1. Análisis en el dominio del tiempo

En la Figura 6. 30, se presentan las señales de corriente, voltaje y presión acústica en una escala de tiempo menor a la usada en la Figura 6. 22 En esta figura se puede observar que los pulsos de sonido se encuentran sincronizados con el cortocircuito y están retrasados respecto a las señales de corriente y voltaje, debido a la distancia desde el arco hasta el micrófono (80 cm).

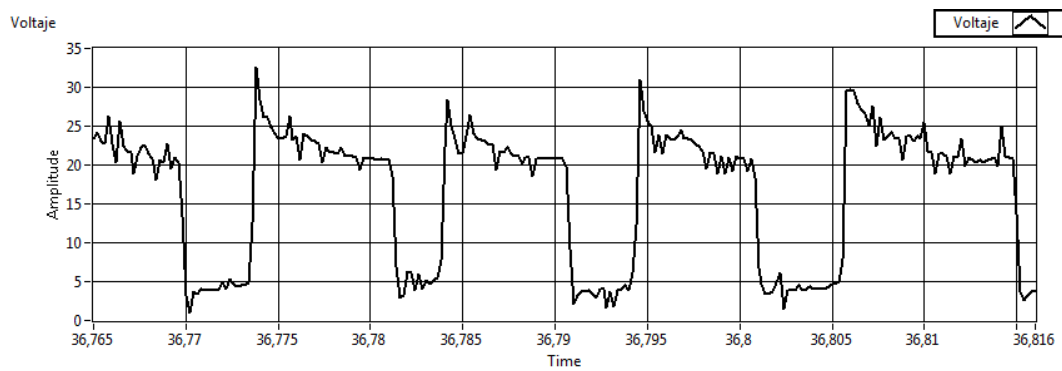
La Figura 6. 32 corresponde a las gráficas de los parámetros de forma de la señal de presión acústica para la soldadura de referencia (apertura de raíz de 2 mm, caudal de gas de 15 litros/min y una DTCP de 16 mm) y para las diferentes perturbaciones utilizadas. Los parámetros fueron calculados en las secciones de la señal donde se aplicó la perturbación.

Figura 6. 31. Señales de a) Corriente, b) Voltaje y c) Presión acústica, para las condiciones de la soldadura de referencia

a)



b)



c)

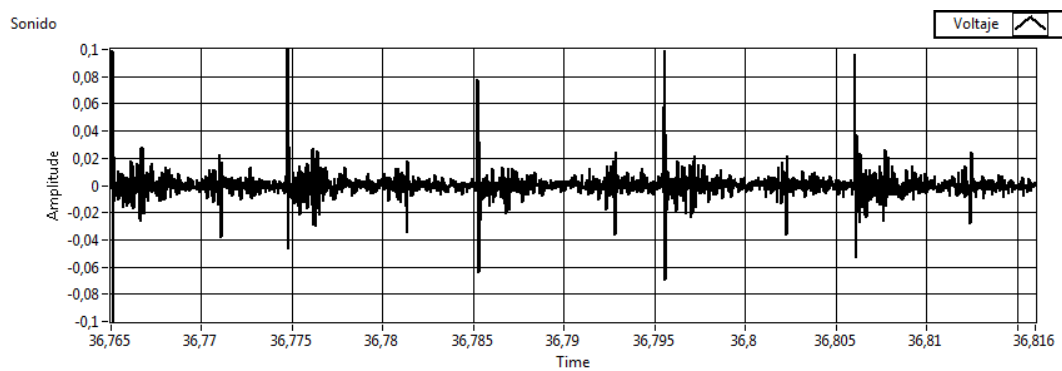
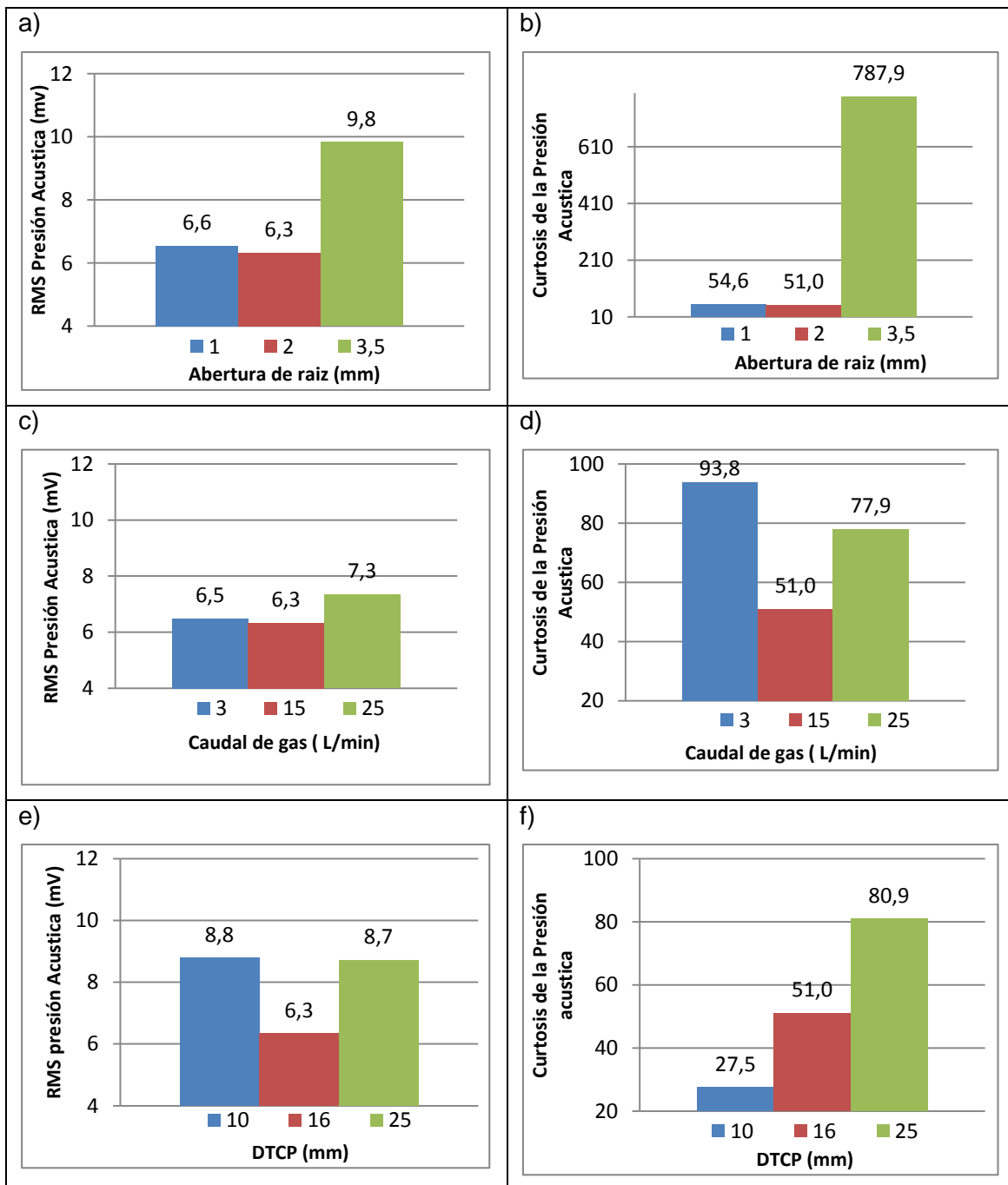


Figura 6. 32. Gráficas de los parámetros de forma de la señal de presión acústica con diferentes perturbaciones.



Para las diferentes perturbaciones aplicadas, tanto el valor RMS como la curtosis, mostraron valores mayores a los de la soldadura de referencia, excepto la curtosis para la DTCP de 10mm. En la Tabla 6. 13 se presenta un resumen de los parámetros de análisis de la señal acústica en el dominio del tiempo, los cuales varían con la forma de la

señal; estos son agrupados de acuerdo al tipo de perturbación aplicada y a la condición o defecto encontrado en la soldadura.

Tabla 6. 13. Resumen de los parámetros de la señal acústica y los defectos de soldadura.

		Defecto ó condición de la soldadura							
		Soldadura libre de defectos			Falta de penetración			Porosidad	Interrupción del arco/Sobrepenetración
Perturbación		PR*	Q= 25 L/min	DTCP= 10mm	R = 1mm	Q = 3l/min	DTCP= 25mm	Q= 3l/min	R=3.5mm
Parámetro de estabilidad	RMS (mV)	6,3	7,3	8,8	6,6	6,5	8,7	6,5	9,8
	Curtosis	51	78	28	55	94	81	94	788

*PR: Parámetros de referencia.

El valor RMS de la señal acústica, no presenta una clara tendencia respecto a la aparición de discontinuidades. Es decir, a pesar de que en la soldadura de referencia el valor RMS de la presión acústica es el menor de todas las condiciones evaluadas, no ocurre lo mismo en las demás soldaduras libres de defectos. Por el contrario, dicho parámetro es mayor respecto a las soldaduras defectuosas.

La curtosis de la presión acústica, resultó ser más baja para las soldaduras libres de defectos, aunque, en el caso del caudal de gas de 25 litros por minuto presentó un valor superior frente a la condición de abertura de raíz de 1mm, en la cual se observó una falta de penetración. En este sentido, la curtosis es un parámetro que muestra un cambio grande frente a perturbaciones del proceso y en consecuencia brinda una mayor posibilidad para la detección de discontinuidades por medio de las señales acústicas.

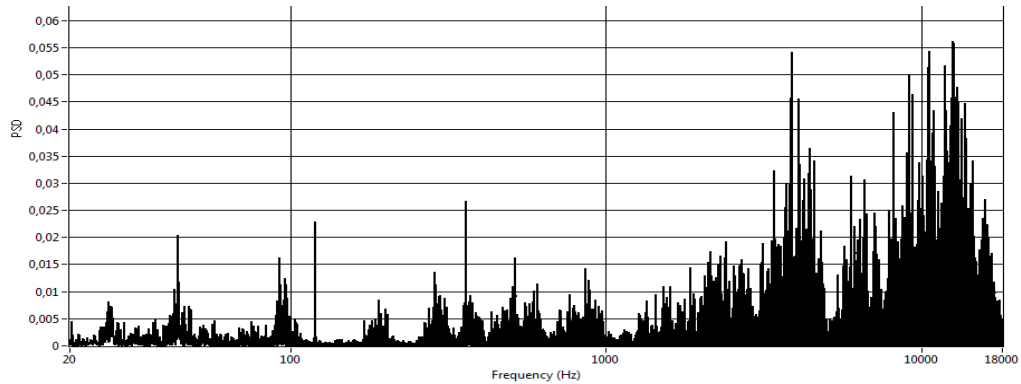
6.3.3.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

La señal de presión acústica fue analizada por medio de la transformada rápida de Fourier para cada condición de soldadura evaluada, con esto se graficó la densidad espectral de potencia "Power Spectral Density" (PSD) de la señal en función de la

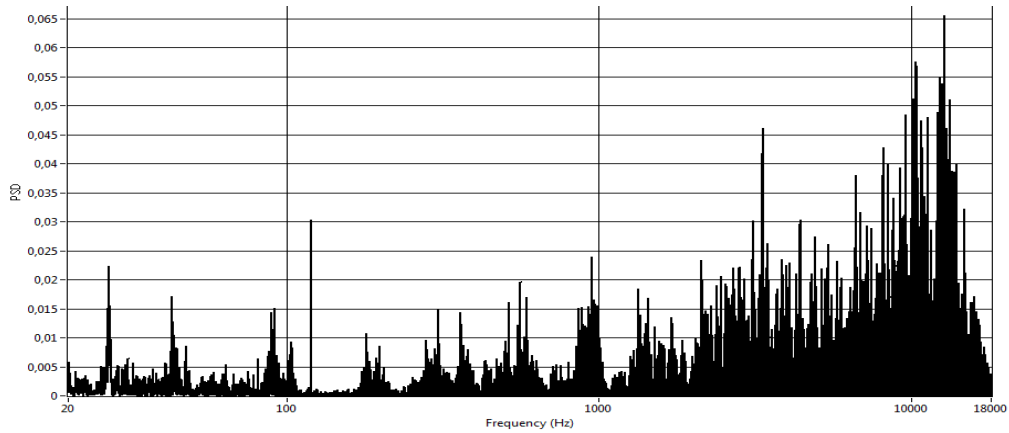
frecuencia. En la Figura 6. 33 se presentan las gráficas de PSD para la abertura de raíz baja, la condición de referencia y abertura de raíz grande.

Figura 6. 33. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) abertura de raíz baja, b) abertura de raíz normal y c) abertura de raíz alta.

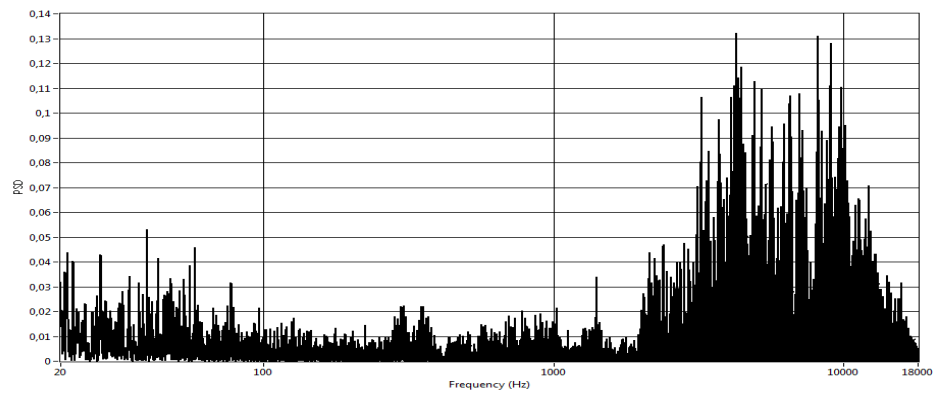
a)



b)



c)

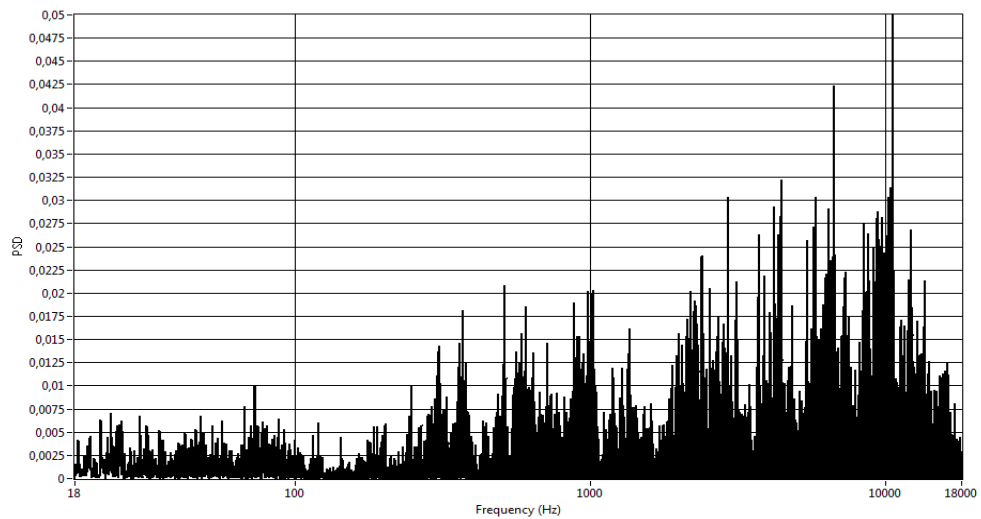


La Figura 6. 34 y la Figura 6. 35 corresponden al análisis de la PSD para los cambios en el caudal de gas y en la DTCP. En general, para todas las condiciones evaluadas se

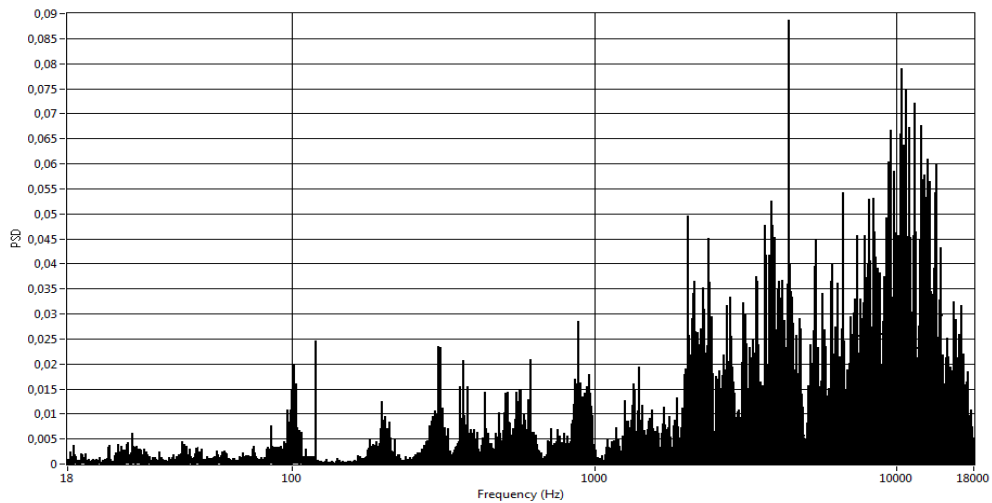
puede observar que los mayores picos de la densidad espectral de potencia, se encuentran distribuidos en una banda de frecuencias de 2000 Hz a 15000 Hz; y los más altos se concentran alrededor de los 10000Hz. En esta banda de frecuencias, se encuentra el ruido “turbulento” que se produce durante el periodo del arco; nombrado así por Horvat et al [13].

Figura 6. 34. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) caudal de gas bajo, b) caudal de gas alto.

a)



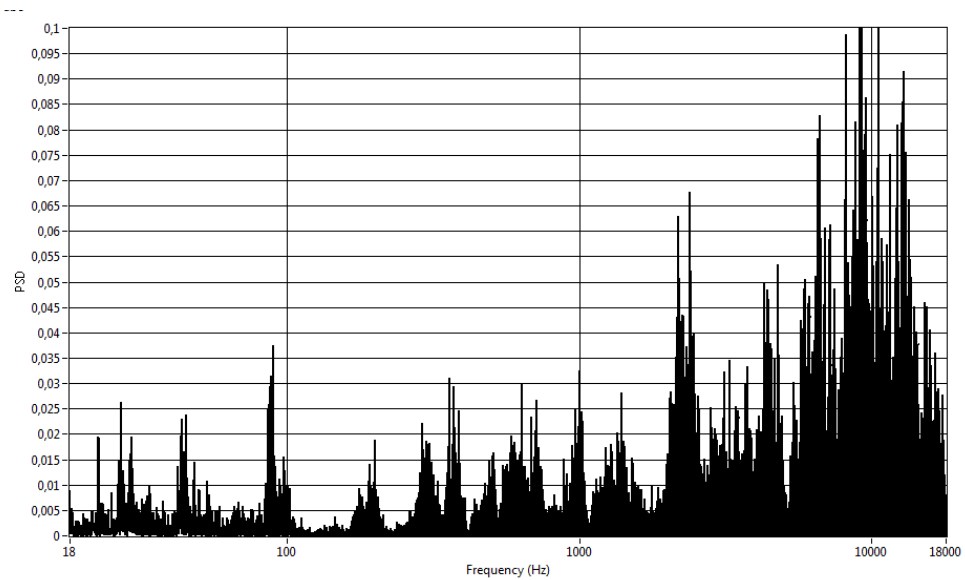
b)



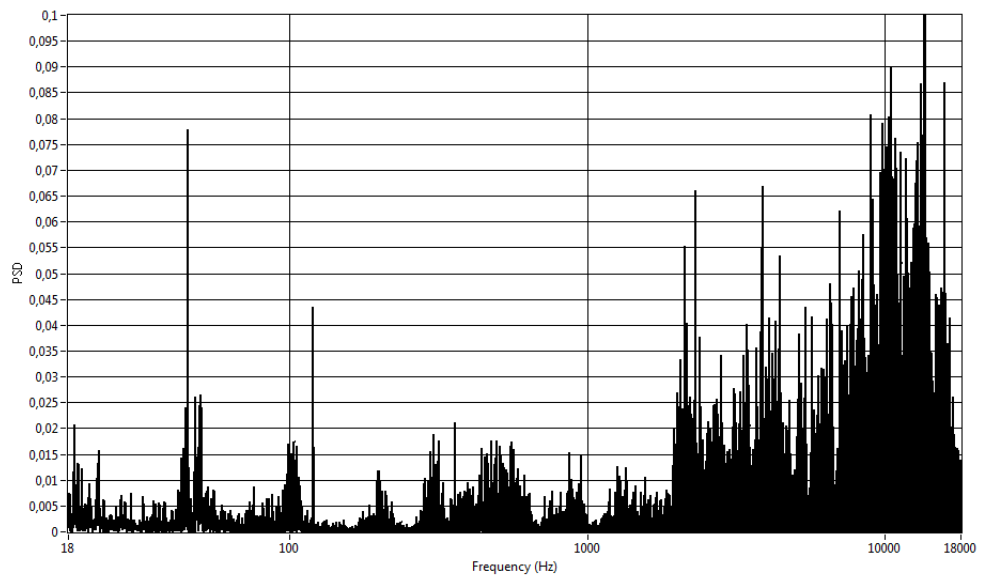
Las Figura 6. 33 a y b, la Figura 6. 34 b y las Figura 6. 35 b y c, muestran un pico característico de la transferencia de metal, cercano a los 100 Hz y con una amplitud alrededor de 0,015. Esto coincide con las frecuencias de cortocircuito calculadas a partir de las señales eléctricas para cada una de las condiciones evaluadas.

Figura 6. 35. Análisis de la densidad espectral de potencia de la señal acústica para a) DTCP baja, b) DTCP alta.

a)



b)



Sin embargo, no es posible evaluar la estabilidad del proceso debido a la presencia de otros picos cercanos a este; además, no se observa una tendencia para esta zona del espectro.

Cuando las condiciones del arco muestran una fuerte alteración, tal como la abertura de raíz grande, Figura 6. 34 a y el caudal de gas bajo, Figura 6. 35 c se presenta una distribución casi uniforme de picos con una altura similar para frecuencias entre 20 Hz y 100Hz, lo cual puede ser consecuencia de diferentes frecuencias de cortocircuito debidas a una transferencia poco uniforme.

7. Conclusiones

En general

- Se planteó una metodología para seleccionar y ajustar los parámetros de GMAW- Cortocircuito con base en la estabilidad del proceso, la cual se puede medir por medio de las señales eléctricas y acústicas del arco. Adicionalmente, las señales acústicas y eléctricas del proceso se mostraron ser útiles para implementar sistemas de monitoreo de posibles perturbaciones que puedan alterar el proceso y en consecuencia la calidad de las uniones soldadas.
- Se levantaron el mapa de modos de transferencia de metal por cortocircuito y el mapa de frecuencias de cortocircuito para el alambre ER 70S-6 de 1.2 mm de diámetro y una mezcla de gas de protección de 75% Argón/ 25% CO₂, lo cual constituye una herramienta de ingeniería que brinda una representación gráfica y permite identificar las zonas de mayor estabilidad del proceso de soldadura GMAW- Cortocircuito.
- La frecuencia máxima de cortocircuito para el alambre ER70S-6 de 1.2mm de diámetro y un gas de protección 75%Ar y 25% CO₂ fue de 109 Hz. Estos mismos parámetros de soldadura corresponden a una desviación estándar del periodo de cortocircuito mínima y a un cordón de soldadura libre de defectos, que aplicado en una junta a tope de ranura cuadrada cumple con los criterios de aceptación y rechazo del código AWS D1.1-2010.
- Con base en el mapa de frecuencias de cortocircuito para el alambre ER70S-6 de 1.2mm de diámetro y un gas de protección 75%Ar y 25% CO₂, se puede establecer una zona de operación del proceso con las frecuencias más altas (>90 Hz), que brindan la mejor estabilidad en un rango de 100 a 250 in/min y de 13 a 21 V; el cual permite a su vez un amplio rango de entradas de energía y en consecuencia de combinaciones de espesores y juntas que se podrían unir con este proceso.

Respecto de las señales eléctricas

- Para el modo de transferencia por cortocircuito las señales de corriente y voltaje caracterizan completamente el proceso, pues en este modo de transferencia la variación de la señal es suficiente, para ser identificado fácilmente el fenómeno sin necesidad de aplicar procesamientos adicionales como filtros, entre otros.

- Parámetros del modo de transferencia como el tiempo de cortocircuito, el tiempo de arco, el periodo de transferencia y la frecuencia de cortocircuito, son fácilmente calculados a partir del registro de la señal de voltaje y corriente; además, pueden ser considerados como criterios de estabilidad del proceso e indicadores de la calidad de las soldaduras gracias a la capacidad de estas señales de dar información en tiempo real sobre el arco eléctrico.
- A partir de las señales de corriente y voltaje del arco se propusieron como indicadores para monitorear la estabilidad y la calidad del proceso, el periodo de cortocircuito, la desviación estándar del periodo de cortocircuito, la potencia y la resistencia del arco. Se encontró que el periodo de cortocircuito por sí solo no siempre se altera con la perturbación del proceso. Sin embargo, la desviación estándar del periodo, la potencia y la resistencia del arco respondieron al cambio del proceso promovido por las perturbaciones utilizadas, lo que muestra que pueden ser usados como indicadores para monitorear la calidad de la soldadura.

Respecto a las señales acústicas

- La señal de presión acústica permite identificar el sonido del proceso característico de las condiciones particulares de operación. Lo cual se convierte en una herramienta para caracterizar las condiciones de una soldadura estable e identificar las alteraciones del proceso que puedan generar defectos en las soldaduras.
- En el dominio del tiempo el valor RMS de la presión acústica mostró poco cambio frente a las perturbaciones inducidas en la soldadura. Por su parte la curtosis de la señal mostró un mayor cambio, puesto que aumentó considerablemente en las soldaduras que presentaron defectos, respecto a las soldaduras libres de defectos.
- A partir del análisis en el dominio de la frecuencia de la señal acústica del proceso GMAW-Cortocircuito, con los parámetros utilizados, se encontró que el sonido producido presenta los mayores picos de la densidad espectral de potencia en un ancho de banda de 5 KHz a 15 KHz; y esta distribución de picos no varía significativamente con las perturbaciones utilizadas.
- La mayor información sobre la estabilidad del proceso que se puede identificar a partir del análisis en el dominio de la frecuencia de la señal

acústica, corresponde a los picos menores de la PSD que se encuentran en un rango de frecuencias similares a las frecuencias de transferencia de metal (hasta 150 Hz).

8.Recomendaciones para trabajos futuros

- Para aprovechar mejor las capacidades de la señal acústica, se recomienda usar un micrófono de alta sensibilidad, disponible en el mercado. Esto para buscar la aplicación en otros modos de transferencia como pulsado y aspersión.
- Aumentar la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos, para capturar señales de modos de transferencia como aspersión y pulsado.
- Implementar las señales acústicas y eléctricas en otros procesos como FCAW, en GMAW con alambres tubulares y en SAW.

9. Bibliografía

- [1] American Welding Society y R. L. O'Brien, *Welding handbook*, vol. 2. Miami, Fla.: American Welding Society, 1991.
- [2] K. Weman, G. Lindén, y M., and Mining Institute of Materials, *MIG welding guide*. Cambridge, England; Boca Raton, FL: Woodhead ; CRC Press, 2006.
- [3] J. F. Lancaster y International Institute of Welding, *The Physics of welding*. Oxford; New York: Pergamon, 1986.
- [4] D. Iordachescu y L. Quintino, «Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 202, n.º 1-3, pp. 391-397, jun. 2008.
- [5] A. Scotti, V. Ponomarev, y W. Lucas, «A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, n.º 6, pp. 1406-1413, jun. 2012.
- [6] Y.-S. Kim y T. Eagar, «Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding», *Weld. J.*, vol. 72, n.º 6, p. 269-s - 278-s, jun. 1993.
- [7] M. J. M. Hermans y G. Den Ouden, «Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding», *Weld. J.*, vol. 78, n.º 4, p. 137-s - 141-s, abr. 1999.
- [8] D. Hoyos, «Validación del sistema de adquisición de adquisición de datos implantado en el Laboratorio de Soldadura», Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2012.
- [9] I. Pires, L. Quintino, y R. M. Miranda, «Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate», *Mater. Des.*, vol. 28, n.º 5, pp. 1623-1631, 2007.
- [10] M. I. Arias, «Levantamiento del mapa de modos de transferencia de metal para el electrodo ER100S-2», Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2012.
- [11] F. A. Everest, *Master handbook of acoustics*. New York: TAB Books Inc : [distributor] McGraw-Hill Education - Europe, 2000.
- [12] D. Saini y S. Floyd, «An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-Line Quality Control», *Welding*, vol. 77, n.º 4, p. 172-s - 179-s, abr. 1998.
- [13] A. F. Manz, «Welding Arc Sounds», *Weld. J.*, vol. 60, pp. 23-26, may 1981.
- [14] J. Horvat, J. Prezelj, I. Polajnar, y M. Čudina, «Monitoring gas metal arc welding process by using audible sound signal», *Strojniski VestnikJournal Mech. Eng.*, vol. 57, n.º 3, pp. 267-278, 2011.
- [15] L. Grad, J. Grum, I. Polajnar, y J. Marko Slabe, «Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, n.º 5, pp. 555-561, abr. 2004.
- [16] K. Pal, S. Bhattacharya, y S. K. Pal, «Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n.º 10, pp. 1397-1410, jul. 2010.

-
- [17] M. Čudina, J. Prezelj, y I. Polajnar, «Use of audible sound for on-line monitoring of gas metal arc welding process», *Metalurgija*, vol. 47, n.º 2, pp. 81-85, 2008.
- [18] F. Erdmann-Jesnitzer, E. Feustel, y D. Rehfeldt, «Akustische Untersuchungen am Schweißlichtbogen», *Schw. und Schn*, vol. 19, pp. 95-100, 1967.
- [19] S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjö, y I. Claesson, «On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding», *Weld. J. Miami Fla*, vol. 78, n.º 2, p. 59S-73S, 1999.
- [20] T. P. Quinn, C. Smith, C. N. McCowan, E. Blachowiak, y R. B. Madigan, «Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding», *Weld. J. Miami Fla*, vol. 78, n.º 9, p. 322s-327s, 1999.
- [21] Y. X. Chu, S. J. Hu, W. K. Hou, P. C. Wang, y S. P. Marin, «Signature analysis for quality monitoring in short-circuit GMAW», *Weld. J. Miami Fla*, vol. 83, n.º 12, p. 336-S-343-S, 2004.
- [22] K. Luksa, «Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 175, n.º 1-3, pp. 285-290, jun. 2006.
- [23] S. Liu y T. A. Siewert, «Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Transfer», *Welding Journal*, vol. 2, p. 52s-58s, 1989.
- [24] C. D. Sorensen y T. W. Eagar, «Modeling of oscillations in partially penetrated weld pools», *J. Dyn. Syst. Meas. Control Trans. ASME*, vol. 112, n.º 3, pp. 469-474, 1990.
- [25] American Welding Society, Structural Welding Committee, American Welding Society, y American National Standards Institute, *Structural welding code--steel*. Miami, FL: American Welding Society, 2010.