



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

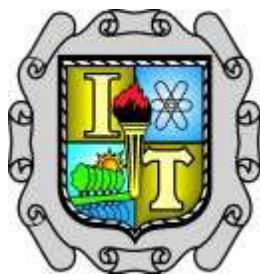


TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Saltillo

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SALTILLO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN EN EL
PROCESO DE SOLDADURA ROBOTIZADA GMAW MEDIANTE
TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING”**

TESIS

QUE PRESENTA:

MTSI ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

DIRIGIDA POR:

Dra. Pamela Chiñas Sánchez
Director

Dr. Ismael López Juárez
Codirector

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

AGOSTO 2024



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Saltillo

Saltillo, Coahuila, 13/septiembre/2024
OFICIO No. DEPI/168/2023

C. ERIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial nombrado para dar seguimiento a su trabajo de tesis, titulado "Análisis y predicción de la geometría del cordón en el proceso de soldadura robotizada GMAW mediante técnicas de SOFT COMPUTING", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación que su trabajo satisface los elementos técnicos y científicos necesarios. Así mismo, se cuenta en esta División con las evidencias de que Usted cumple con los requisitos académicos necesarios para la presentación de este trabajo. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la Impresión Definitiva de su trabajo de tesis.

Deseándole el éxito en el logro de sus metas y sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

DR. JORGE ALBERTO RAMOS OLIVEIRA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
ccp. Departamento de Servicios Escolares



Blvd. Venustiano Carranza No. 2400, Col. Tecnológico, C.P. 25280,
Saltillo, Coahuila. Tel: 844 288-94-60 saltillo.tecnm.mx

RAC 01-05-11
Rev.19



Saltillo, Coahuila, 04/Junio/2024

Asunto: Carta de cesión de derechos

DR. JORGE ALBERTO RAMOS OLIVEIRA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.

Por medio de la presente, quienes suscriben, DRA. PAMELA CHIÑAS SÁNCHEZ, DR. ISMAEL LÓPEZ JUÁREZ y MTSI. ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ, nos permitimos informarle que declaramos nuestra conformidad para ceder los derechos del documento de tesis, titulado **ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN EN EL PROCESO DE SOLDADURA ROBOTIZADA GMAW MEDIANTE TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING**, el cual certificamos es trabajo original, al Tecnológico Nacional de México.

Lo anterior con el fin de que sea dispuesto de manera pública por el Tecnológico Nacional de México, para su libre consulta y, de ser el caso, su contenido sea citado y referenciado por terceros.

Estando de acuerdo y conformes en lo establecido en la cesión de derechos, firmamos el documento para constancia y efectos legales necesarios.

Cedentes	
 Estudiante MTSI. ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ	 Directora de tesis DRA. PAMELA CHIÑAS SÁNCHEZ
 Codirector de tesis DR. ISMAEL LÓPEZ JUÁREZ	



Saltillo, Coahuila, 04/Junio/2024

DR. JORGE ALBERTO RAMOS OLIVEIRA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.

Los que suscribimos, integrantes del Comité Tutorial nombrados para dar seguimiento y examinar el manuscrito de la tesis titulada:

**"ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL CORDÓN EN EL PROCESO DE SOLDADURA
ROBOTIZADA GMAW MEDIANTE TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING"**

Que presenta el candidato al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:
"ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ"

Reunidos para tal efecto, y después de intercambiar opiniones, manifestamos nuestra aceptación a dicho trabajo en virtud de que satisface los requerimientos técnicos, científicos y de redacción que requiere el nivel del grado a obtener, ya que se han realizado las correcciones que cada uno en particular consideró pertinentes.

Por tal motivo este Comité autoriza la presentación e impresión del manuscrito de tesis en mención.

ATENTAMENTE
"EL COMITÉ TUTORIAL DE TESIS"

DRA. PAMELA CHIÑAS SÁNCHEZ
DIRECTOR DE TESIS

DR. ISMAEL LÓPEZ JUÁREZ
CODIRECTOR DE TESIS

DRA. ROCÍO MARICELA
OCHOA PALACIOS
SINODAL

DR. HÉCTOR EFRAÍN RUIZ Y
RUIZ
SINODAL

DRA. ALEJANDRA HERNÁNDEZ
RODRÍGUEZ
SINODAL



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, **Josefina Hernández González** y **Oscar Eduardo Cavazos Cadena**, por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de este camino. Su confianza en mí ha sido una fuente de motivación que me ha impulsado a alcanzar mis metas.

A mis hermanos, **Oscar Eduardo de Jesús Cavazos Hernández** y **Carlos Arturo Cavazos Hernández**, por ser mi apoyo inquebrantable y por los momentos de alegría que siempre me han ayudado a mantener el equilibrio en este viaje.

A mi querido tío **Rolando Cavazos Cadena**, quien fue mi inspiración y a quien amé profundamente. Su partida antes de verme titulado ha dejado un vacío en mi corazón; lo extraño todos los días. Su memoria me acompaña en cada paso, recordándome la importancia de perseguir mis sueños con dedicación.

A mi directora de tesis, **Dra. Pamela Chiñas Sánchez**, y a mi codirector, **Dr. Ismael López Juárez**, por su invaluable guía, paciencia y conocimientos compartidos. Su dedicación y apoyo han sido fundamentales para la realización de esta investigación.

A mis revisores, **Dra. Rocío Ochoa Palacios**, **Dr. Efraín Ruiz y Ruiz** y **Dra. Alejandra Hernández Rodríguez**, por sus observaciones y sugerencias, que han enriquecido este proyecto y me han permitido mejorar como investigador.

A todos mis compañeros de maestría y doctorado, en especial a **Gerardo Hernández González**, por su apoyo en la parte tecnológica y por compartir sus

puntos de vista, los cuales me han sido de gran ayuda en la realización de este trabajo.

Finalmente, agradezco al Instituto Tecnológico de Saltillo, COMIMSA, CINVESTAV y CONAHCYT por brindarme las herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo mi formación académica. Su apoyo ha sido crucial en el desarrollo de mi carrera.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

Índice

Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	xiii
Abreviaturas.....	xvii
Resumen	1
Abstract	3
Hipótesis	5
Objetivo general y objetivos específicos	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
1. INTRODUCCIÓN	8
2. ESTADO DEL ARTE	10
3. MARCO TEÓRICO.....	43
3.1 Inicio de la soldadura.....	43
3.2 Proceso de soldadura GMAW	45
3.3 Clasificación de los procesos de soldadura	46
3.4 Aluminio y sus aleaciones.....	48
3.4.1 Aleación 5052-H32.....	51
3.4.2 Efecto de los elementos aleantes	53
3.5 Técnicas de soft computing	55
3.5.1 Redes neuronales artificiales	55
3.5.2 Lógica difusa	66
3.6 Técnicas estadísticas.....	74
3.6.1 Medidas de tendencia central	75
3.6.2 Prueba de normalidad	76
3.6.3 Medidas de dependencia	76
3.6.4 Análisis de regresión	81
3.7 Transferencia de calor	85
4. METODOLOGÍA.....	91

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	97
5.1 Proceso de soldadura GMAW semiautomatizado	97
5.1.1 Diseño de experimentos.....	97
5.1.2 Medidas de tendencia central	98
5.1.3 Prueba de normalidad	99
5.1.4 Medidas de dependencia y la recta ajustada de regresión lineal simple	100
5.1.5 Modelo de regresión lineal simple	106
5.1.6 Modelo de regresión lineal múltiple	112
5.1.7 Modelo de red neuronal artificial	114
5.1.8 Modelo Difuso	120
5.2 Proceso de soldadura GMAW robotizado.....	141
5.2.1 Diseño de experimentos.....	141
5.2.2 Medidas de tendencia central	144
5.2.3 Prueba de normalidad	145
5.2.4 Medidas de dependencia y la recta ajustada de regresión lineal simple	147
5.2.5 Modelo de regresión lineal simple	168
5.2.6 Modelo de regresión lineal múltiple	176
5.2.7 Modelo Triple Difuso	178
5.3 Pruebas metalográficas	193
5.3.1 Seccionamiento de las soldaduras.....	193
5.3.2 Montaje en resina.....	195
5.3.3 Desbaste y pulido.....	196
5.3.4 Ataque químico	200
5.3.5 Análisis macroestructural	206
5.4 Complejidad en el proceso de soldadura GMAW robotizado.....	225
6. CONCLUSIÓN	227
Bibliografía	231
Anexo A.....	238

Propiedades de conjuntos clásicos o nítidos	238
Anexo B.....	240
Infraestructura.....	240
Anexo C	242
Reglas difusas del sistema difuso del proceso	242
Anexo D	244
Reglas difusas del sistema difuso de calidad	244
Anexo E.....	246
Reglas difusas del sistema difuso de ajuste	246
Anexo F.....	250
Código del diseño del sistema de control difuso para aproximar la geometría del cordón de soldadura y la calidad	250
Anexo G	255
Parámetros establecidos en el proceso GMAW robotizado.....	255
Anexo H	260
Productividad	260

Índice de Figuras

Figura 3. 1 Representación de la soldadura de resistencia por puntos [32].	44
Figura 3. 2 Robot soldador disponible en la celda de manufactura en COMIMSA.48	
Figura 3. 3 Representación de una neurona biológica [43] [47].	56
Figura 3. 4 Función de activación escalón, a) normal y b) simétrico [43] [48].	57
Figura 3. 5 Función de activación lineal [43] [48].	58
Figura 3. 6 Función de activación tangente hiperbólica [43] [48].....	58
Figura 3. 7 Función de activación sigmoideal [43] [48].....	59
Figura 3. 8 Función de activación gaussiana [43] [48].	59
Figura 3. 9 Red clásica del perceptrón [43] [47] [48].	61
Figura 3. 10 Arquitectura de la red multicapa [48].....	62
Figura 3. 11 Ejemplo de la arquitectura de red multicapa con propagación del error hacia atrás [48].....	63
Figura 3. 12 Operador unión [43] [47].	68
Figura 3. 13 Operador intersección [43] [47].	69
Figura 3. 14 Operador complemento [43] [47].....	69
Figura 3. 15 Descripción de la función de membresía trapezoidal o PI [47].....	71
Figura 3. 16 Función saturación a la derecha [43] [47].	71
Figura 3. 17 Función saturación a la izquierda [43] [47].....	72
Figura 3. 18 Función triangular [43] [47].....	73
Figura 3. 19 Función Singleton [43] [47].....	73
Figura 3. 20 Relación de las medidas de tendencia central.	75
Figura 3. 21 Representación ilustrativa de diferentes gráficas de dispersión en donde: a) relación positiva, b) relación negativa y c) relación nula.	78
Figura 4. 1 Metodología.....	91
Figura 4. 2 Metodología para la medición de la geometría de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 unido por el proceso GMAW robotizado.	96

Figura 5. 1 Soldaduras por el proceso GMAW semiautomatizado en donde a) soldadura 5, b) soldadura 7 y c) soldadura 8.	98
Figura 5. 2 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Corriente.....	101
Figura 5. 3 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad.....	102
Figura 5. 4 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Corriente vs Velocidad.....	102
Figura 5. 5 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Penetración.	103
Figura 5. 6 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Corriente vs Penetración.	104
Figura 5. 7 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad vs Penetración.	105
Figura 5. 8 Soldadura 5 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 3 mm y concavidad de la raíz de 0 mm.	107
Figura 5. 9 Soldadura 7 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 4.5 mm y concavidad de la raíz de 0 mm.	107
Figura 5. 10 Soldadura 8 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 6 mm y concavidad de la raíz de 1.98 mm.	107
Figura 5. 11 Arquitectura de la red neuronal perceptrón multicapa exploratoria para predecir la penetración.	115
Figura 5. 12 Diseño del sistema triple difuso para evaluar la calidad pertinente del proceso GMAW semiautomatizado.	120
Figura 5. 13 Componentes que conforman al sistema de control difuso.	121
Figura 5. 14 Conjunto de antecedentes de voltaje, corriente y velocidad.	122
Figura 5. 15 Conjunto de consecuentes de concavidad de corona, concavidad de raíz y penetración.....	122
Figura 5. 16 Nuevos conjunto de antecedentes de concavidad de corona, concavidad de raíz y penetración.....	127
Figura 5. 17 Conjunto de consecuentes de calidad.....	128

Figura 5. 18 Ejemplos de algunas experimentaciones preliminares.....	144
Figura 5. 19 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad de hilo.	147
Figura 5. 20 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad de robot.	148
Figura 5. 21 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Stick out.	149
Figura 5. 22 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Abertura de raíz.....	149
Figura 5. 23 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Velocidad de robot.	150
Figura 5. 24 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Stick out.	151
Figura 5. 25 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Abertura de raíz.	151
Figura 5. 26 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Stick out.	152
Figura 5. 27 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Abertura de raíz.	153
Figura 5. 28 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Stick out.	153
Figura 5. 29 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Concavidad corona.	154
Figura 5. 30 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Concavidad de la raíz.....	155
Figura 5. 31 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Penetración.	156
Figura 5. 32 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Concavidad de la corona.	157
Figura 5. 33 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Concavidad de la raíz.	158

Figura 5. 34 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Penetración.....	159
Figura 5. 35 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Concavidad de la corona.	159
Figura 5. 36 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Concavidad de la raíz.	160
Figura 5. 37 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Penetración.....	161
Figura 5. 38 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Concavidad de la corona.....	162
Figura 5. 39 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Concavidad de la raíz.....	162
Figura 5. 40 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Penetración.	163
Figura 5. 41 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Concavidad de la corona.	164
Figura 5. 42 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Concavidad de la raíz.	165
Figura 5. 43 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Penetración.....	166
Figura 5. 44 Sistema triple difuso desarrollado para el proceso GMAW semiautomatizado.	179
Figura 5. 45 Conjunto difuso de antecedente del voltaje.....	180
Figura 5. 46 Conjunto difuso de antecedente de la velocidad de alimentación de hilo	180
Figura 5. 47 Conjunto difuso de antecedente de la velocidad de avance del robot	181
Figura 5. 48 Conjunto difuso de antecedente del stick out.....	181
Figura 5. 49 Conjunto difuso de antecedente de la abertura de raíz.....	182

Figura 5. 50 Sistema triple difuso para la aproximación de la geometría del cordón de soldadura y su calidad en aleación de aluminio 5052-H32 para el proceso GMAW robotizado.....	183
Figura 5. 51 Soldadura 1 empleando 24 volts, 350 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 1.5 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	186
Figura 5. 52 Soldadura 21 empleando 30 volts, 250 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	187
Figura 5. 53 Soldadura 30 empleando 24 volts, 250 velocidad de hilo, 0.6 velocidad de robot, 1.5 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	187
Figura 5. 54 Soldadura 1 empleando 33 volts, 359 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 1.5 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	188
Figura 5. 55 Soldadura 21 empleando 39 volts, 258 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	188
Figura 5. 56 Soldadura 30 empleando 33 volts, 258 velocidad de hilo, 0.6 velocidad de robot, 1.5 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	189
Figura 5. 57 Soldadura 16 empleando 30 volts, 250 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 5 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	191
Figura 5. 58 Soldadura 33 empleando 30 volts, 350 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 5 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	191
Figura 5. 59 Soldadura 16 empleando 39 volts, 258 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 3 abertura de raíz del diseño de experimentos actualizado. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	192

Figura 5. 60 Soldadura 33 empleando 39 volts, 359 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 3 abertura de raíz del diseño de experimentos actualizado. En donde a) vista superior y b) vista inferior.....	192
Figura 5. 61 Seccionamiento transversal de la soldadura 19 de aleación de aluminio 5052-H32 unido por el proceso GMAW robotizado.	193
Figura 5. 62 Ejemplo representativo del tramo del cordón de soldadura.	194
Figura 5. 63 Ejemplo representativo de una muestra de 2 cm de largo.	195
Figura 5. 64 Soldadura 12 y soldadura 12 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.....	197
Figura 5. 65 Soldadura 17 y soldadura 17 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.....	198
Figura 5. 66 Soldadura 21 y soldadura 21 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.....	198
Figura 5. 67 Soldadura 22 y soldadura 22 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.....	199
Figura 5. 68 Soldadura 27 y soldadura 27 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.....	199
Figura 5. 69 Soldadura 12 y soldadura 12 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	202
Figura 5. 70 Soldadura 17 y soldadura 17 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	202
Figura 5. 71 Soldadura 21 y soldadura 21 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	203
Figura 5. 72 Soldadura 22 y soldadura 22 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	203
Figura 5. 73 Soldadura 27 y soldadura 27 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	204
Figura 5. 74 Soldadura 4 y soldadura 4 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	204
Figura 5. 75 Soldadura 14 y soldadura 14 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	205

Figura 5. 76 Soldadura 26 y soldadura 26 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	205
Figura 5. 77 Soldadura 33 y soldadura 33 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.	206
Figura 5. 78 Geometría del cordón de soldadura número 21, cuyos valores son a) 1.23 mm de concavidad de la corona y 5.81 mm de penetración y b) 3.70 mm de ancho del cordón de soldadura.	207
Figura 5. 79 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 21, cuyos valores son a) 1.15 mm de concavidad de la corona y 5.92 mm de penetración y b) 3.99 mm de ancho del cordón de soldadura.	207
Figura 5. 80 Geometría del cordón de soldadura número 27, cuyos valores son a) 0.77 mm de concavidad de la corona, 5.79 mm de penetración y 1.18 mm de concavidad de la raíz y b) 7 mm de ancho del cordón de soldadura.....	208
Figura 5. 81 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 27, cuyos valores son a) 1.37 mm de concavidad de la corona, 5.80 mm de penetración y 0.53 mm de concavidad de la raíz y b) 6.88 mm de ancho del cordón de soldadura. .	209
Figura 5. 82 Geometría del cordón de soldadura número 17, cuyos valores son a) 1.37 mm de concavidad de la corona y 3.87 mm de penetración y b) 11.62 mm de ancho del cordón de soldadura.	210
Figura 5. 83 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 17, cuyos valores son a) 1.65 mm de concavidad de la corona y 4.20 mm de penetración y b) 11.01 mm de ancho del cordón de soldadura.	210
Figura 5. 84 Geometría del cordón de soldadura número 22, cuyos valores son a) 0.66 mm de concavidad de la corona y 5.79 mm de penetración y b) 12.58 mm de ancho del cordón de soldadura.	211
Figura 5. 85 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 22, cuyos valores son a) 1.31 mm de concavidad de la corona y 3.75 mm de penetración y b) 11.39 mm de ancho del cordón de soldadura.	212
Figura 5. 86 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 14 y b) réplica de la soldadura 14.....	213

Figura 5. 87 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 26 y b) réplica de la soldadura 26.....	214
Figura 5. 88 Geometría del cordón de soldadura número 12, cuyos valores son a) 0.46 mm de concavidad de la corona, 5.78 mm de penetración y 0.52 mm de concavidad de la raíz y b) 10 mm de ancho del cordón de soldadura.....	217
Figura 5. 89 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 12, cuyos valores son a) 5.10 mm de penetración y 0.82 mm de concavidad de la raíz y b) 9.25 mm de ancho del cordón de soldadura.	218
Figura 5. 90 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 33 y b) réplica de la soldadura 33.....	219
Figura 5. 91 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 4 y b) réplica de la soldadura 4.....	220
Figura 5. 92 Puntas de contacto en donde el microalambre fundido se solidifico internamente.	225
Figura 5. 93 Microalambre enredado internamente.....	226

Anexo G 1 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 13, 15, 20 y 25	255
Anexo G 2 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 8, 10, 22 y 33	256
Anexo G 3 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 9, 16, 21 y 24	256
Anexo G 4 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 14, 23, 28 y 32	257
Anexo G 5 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 4, 11, 18 y 35	257

Anexo G 6 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 1, 3, 17 y 34	258
Anexo G 7 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 6, 12, 19 y 26	258
Anexo G 8 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 5, 27, 29 y 36	259
Anexo G 9 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 2, 7, 30 y 31	259

Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Sistema de designación y nomenclatura para aleaciones de aluminio forjadas de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos [40].....	50
Tabla 3. 2 Sistema de designación y nomenclatura para aleaciones de aluminio para fundición de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos [40].	50
Tabla 3. 3 Rangos de dureza del endurecimiento por deformación (H) [41].	53
Tabla 3. 4 Composición química de la aleación de aluminio 5052-H32.	53
Tabla 3. 5 Ventajas y desventajas de las redes neuronales artificiales [43].....	66
Tabla 5. 1 Diseño de experimentos 2^3 para el proceso GMAW semiautomatizado.	97
Tabla 5. 2 Relación de las medidas de tendencia central de las variables del proceso GMAW semiautomatizado.....	99
Tabla 5. 3 Prueba de normalidad Anderson-Darling para el proceso GMAW semiautomatizado	99
Tabla 5. 4 Medidas de dependencia de las variables del proceso GMAW semiautomatizado.	105
Tabla 5. 5 Datos de entrada y salidas del proceso GMAW semiautomatizado. ..	108
Tabla 5. 6 Ecuaciones de regresión lineal simple del proceso GMAW semiautomatizado.	108
Tabla 5. 7 Salida aproximada de la concavidad de la corona y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.	110
Tabla 5. 8 Salida aproximada de la concavidad de la raíz y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.....	111
Tabla 5. 9 Salida aproximada de la penetración y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.....	112
Tabla 5. 10 Ecuaciones de regresión lineal múltiple para el proceso GMAW semiautomatizado.	113
Tabla 5. 11 Salida aproximada de la Concavidad de la corona, Concavidad de la raíz y penetración junto con el error calculado de las ecuaciones de RLM correspondientes.....	114

Tabla 5. 12 Aproximación en porcentaje de la penetración con diferentes números de neuronas ocultas y sus funciones de activación correspondientes.	117
Tabla 5. 13 Análisis del tiempo, error calculado, épocas e iteraciones de los tres mejores conjuntos de funciones de activación de la red neuronal multiperceptron diseñada.....	118
Tabla 5. 14 Resultado de la aproximación/clasificación de la penetración con la red neuronal artificial multiperceptron lineal-sigmoidal.....	119
Tabla 5. 15 Resultados de las dos variantes del sistema triple difuso que aproxima la geometría del cordón de soldadura.	133
Tabla 5. 16 Evaluación de los dos sistemas de control difuso que aproximan la calidad.....	134
Tabla 5. 17 Calculo del error y el tiempo que tarda en compilar las dos variantes del sistema triple difuso desarrollados.	135
Tabla 5. 18 Datos de entrada del sistema difuso de ajuste para calcular los valores de ajuste.....	136
Tabla 5. 19 Valores de ajuste calculados en la primera iteración y los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad.	137
Tabla 5. 20 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la segunda iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la primera iteración.....	137
Tabla 5. 21 Valores de ajuste calculados en la segunda iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.	138
Tabla 5. 22 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la tercera iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la segunda iteración.	138
Tabla 5. 23 Valores de ajuste calculados en la tercera iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.	139
Tabla 5. 24 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la cuarta iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la tercera iteración.....	139

Tabla 5. 25 Valores de ajuste calculados en la cuarta iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.	140
Tabla 5. 26 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la quinta iteración, con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la cuarta iteración.	140
Tabla 5. 27 Disminución del error tras cada iteración.	141
Tabla 5. 28 Primer diseño de experimentos 2^5 para el proceso GMAW robotizado.	142
Tabla 5. 29 Composición química de los micro alambres que son compatibles para unir placas de aleación de aluminio 5052.	144
Tabla 5. 30 Relación de las medidas de tendencia central de las variables del proceso GMAW robotizado.	145
Tabla 5. 31 Prueba de normalidad Anderson-Darling para el proceso GMAW robotizado del primer diseño de experimentos.	146
Tabla 5. 32 Medidas de dependencia de las variables del proceso GMAW robotizado.	167
Tabla 5. 33 Ecuaciones de regresión lineal simple.	169
Tabla 5. 34 Cálculos de la concavidad de la corona con las ecuaciones de regresión lineal simple.	170
Tabla 5. 35 Error de la concavidad de la corona con las ecuaciones de regresión lineal simple.	171
Tabla 5. 36 Cálculos de la concavidad de la raíz con las ecuaciones de regresión lineal simple.	172
Tabla 5. 37 Error de la concavidad de la raíz con las ecuaciones de regresión lineal simple.	173
Tabla 5. 38 Cálculos de la penetración con las ecuaciones de regresión lineal simple.	174
Tabla 5. 39 Error de la penetración con las ecuaciones de regresión lineal simple.	175
Tabla 5. 40 Ecuaciones de regresión lineal múltiple.	176

Tabla 5. 41 Cálculos de la corona, la raíz, penetración y errores con las ecuaciones RLM.....	177
Tabla 5. 42 Diseño de experimentos 2^5 modificado por el sistema triple difuso del proceso GMAW robotizados.....	184
Tabla 5. 43 Mediciones de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 con el programa ImageJ.	221
Tabla 5. 44 Concavidad de la corona. Salida real, salida calculada y error calculado.	223
Tabla 5. 45 Concavidad de la raíz. Salida real, salida calculada y error calculado.	223
Tabla 5. 46 Penetración. Salida real, salida calculada y error calculado.....	224
Tabla 5. 47 Calidad. Salida real, salida calculada y error calculado.....	224

Abreviaturas

AWS	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura)
GMAW	Gas Metal Arc Welding (Soldadura por arco de metal y gas)
SAW	Sumerged Arc Welding (Soldadura por arco sumergido)
EBW	Electron Beam Welding (Soldadura por haz de electrones)
FCAW	Flux Core Arc Welding (Soldadura por arco con núcleo revestido)
TIG	Tungsten Inert Gas (Gas inerte tungsteno)
MIG	Metal Inert Gas (Gas inerte de metal)
END	Ensayos No Destructivos
ED	Ensayos Destructivos
ZAC	Zona Afectada por el Calor
HI	Heat Input (Calor de entrada)
ANOVA	Analysys Of Variance (Análisis de varianza)
MSR	Metodología de Superficie de Respuesta
MSE	Mean Square Error (Error cuadrático medio)
ANN	Artificial Neural Network (Red neuroal artificial)
RBF	Radial Base Function (Función base radial)
AG	Algoritmo Genético
ART	Teoría de Resonancia Adaptativa
FA	Fuzzy ARTMAP (ARTMAP difusa)
GA	Gaussian ARTMAP (ARTMAP gaussiana)
CCMP	Concavidad en la corona muy poco
CCP	Concavidad en la corona poco
CCS	Concavidad en la corona suficiente
CCD	Concavidad en la corona demasiado
CRMP	Concavidad en la raíz muy poco
CRP	Concavidad en la raíz poco
CRS	Concavidad en la raíz suficiente
CRD	Concavidad en la raíz demasiado

PMP	Penetración muy poco
PP	Penetración poco
PS	Penetración suficiente
PD	Penetración demasiado
CN	Calidad nula
CMP	Calidad muy poca
CA	Calidad adecuada
CE	Calidad excelente
C	Corona
R	Raíz
P	Penetración
RLS	Regresión lineal simple
RLM	Regresión lineal múltiple

Resumen

En este trabajo de investigación se realizaron soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32, las cuales son considerablemente aplicables en el sector industrial vehicular para la elaboración de componentes automotrices debido que son materiales más ligeros y tienen una mayor resistencia a la corrosión.

Las soldaduras de aleaciones de aluminio fueron unidas por el procedimiento GMAW (Gas Metal Arc Welding, por sus siglas en inglés). Actualmente, existe la problemática sobre las discontinuidades que se presentan en la soldadura como grietas y porosidades. Sin embargo, las discontinuidades más influyentes en la geometría de los cordones de soldadura son la falta de penetración, falta de fusión y alta convexidad. Las grietas y falta de penetración son defectos que no son permisibles en las soldaduras, debido que disminuyen su calidad microestructural, mecánica o geométrica.

En esta investigación se calculó las medidas de tendencia central, la prueba de normalidad y un estudio de regresión para corroborar la normalidad de los parámetros de entrada en el proceso GMAW semiautomatizado y robotizado. Debido que los datos de entrada no presentaron un comportamiento normal, se pudo confirmar que emplear técnicas estadísticas para generar una ecuación capaz de predecir o aproximar las salidas de interés no es lo más recomendable. De esta manera, se justifica el uso de métodos más sofisticados que trabaja con la variabilidad inherente y los supuestos de normalidad en los datos de entrada del proceso de soldadura GMAW como redes neuronales y lógica difusa.

Además, se desarrollaron varios códigos de programación de una red neuronal artificial exploratorio y de un sistema triple difuso. Las programaciones fueron realizadas en el software R2020b de MATLAB. Se dedujo que, emplear redes

neuronales artificiales con pocos patrones causan que el modelo matemático sea sobreajustado. Debido a esto, se generó un modelo triple difuso para la aproximación/predicción de las salidas de interés, modelado de los parámetros de soldadura y la predicción de calidad del cordón de soldadura de aleación de aluminio 5052-H32.

Se realizó una metodología para obtener las macrografías y se utilizó el programa ImageJ para medir las geometrías de los cordones de soldaduras. Finalmente, se seleccionó los mejores parámetros del proceso GMAW robotizado para realizar cordones de soldadura con geometría aceptable con base en el código estructural del aluminio AWS D1.2.

Debido a todo lo anterior, se puede afirmar que emplear parámetros de entrada inapropiados durante la elaboración de los cordones de soldadura generan cordones inaceptables. Además, el método más adecuado que puede utilizar los parámetros de entrada (sin re TRABAJAR los datos) de los procesos de soldadura semiautomatizado y robotizado es lógica difusa.

Abstract

In this research work, 5052-H32 aluminum alloy welds were made, which are considerably applicable in the industrial vehicle sector for the production of automotive components due to the fact that they are lighter materials and have greater resistance to corrosion.

Aluminum alloy welds were joined by the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process. Currently, there is the problem of discontinuities that occur in the weld, such as cracks and porosities. However, the most influential discontinuities in the geometry of weld beads are lack of penetration, lack of fusion and high convexity. Cracks and lack of penetration are defects that are not permissible in welds, because they diminish their microstructural, mechanical or geometrical quality.

In this research, the measures of central tendency, the normality test and a regression study were calculated to corroborate the normality of the input parameters in the semi-automated and robotized GMAW process. Since the input data did not show normal behavior, it was confirmed that using statistical techniques to generate an equation capable of predicting or approximating the outputs of interest is not the most advisable. Thus, the use of more sophisticated methods that work with the inherent variability and normality assumptions in the input data of the GMAW welding process, such as neural networks and fuzzy logic, is justified.

In addition, several programming codes of an exploratory artificial neural network and a fuzzy triple system were developed. The programming was performed in MATLAB software R2020b. It was deduced that, employing artificial neural networks with few patterns cause the mathematical model to be overfitted. Because of this, a triple fuzzy model was generated for the approximation/prediction of the outputs of

interest, modeling of welding parameters and weld bead quality prediction of aluminum alloy 5052-H32.

A methodology was developed to obtain the macrographs and the ImageJ program was used to measure the weld bead geometries. Finally, the best parameters of the robotic GMAW process were selected to make weld beads with acceptable geometry based on the AWS D1.2 aluminum structural code.

Due to all the above, it can be stated that employing inappropriate input parameters during weld bead processing generates unacceptable beads. Furthermore, the most suitable method that can utilize the input parameters (without reworking the data) of semi-automated and robotic welding processes is fuzzy logic.

Hipótesis

Mediante un modelo basado en técnicas de soft computing se realizará el análisis e inferencia del voltaje, velocidad de hilo, velocidad de avance, stick out y abertura de raíz, además de las características geométricas del cordón de soldadura tales como concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración en aleaciones de aluminio 5052-H32 unido con metal de aporte ER5183 con un proceso de soldadura robotizada GMAW con gas de protección Argón. Con base en estas características geométricas también se realizará un análisis de su calidad respecto a los parámetros del proceso de acuerdo al código AWS D1.2.

Las técnicas de softcomputing como lógica difusa y redes neuronales artificiales aproximan mejor la geometría de los cordones de soldadura y la calidad que las técnicas estadísticas como regresión lineal simple o regresión lineal múltiple.

Las variables del proceso de soldadura GMAW robotizado como el voltaje, la velocidad de alimentación del hilo, la velocidad de avance del robot, el stick out y la abertura de raíz tienen un efecto en la geometría del cordón de soldadura y su calidad en aleaciones de aluminio 5052-H32.

Objetivo general y objetivos específicos

Objetivo general

Analizar y predecir el efecto de los parámetros de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de avance, stick out y abertura de raíz de un proceso de soldadura GMAW robotizado con respecto a la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad de los cordones de soldadura generados en aleaciones de aluminio 5052 unido con metal de aporte ER5183 con gas de protección Argón. Este análisis y predicción se realiza mediante un sistema triple difuso.

Objetivos específicos

1. Realizar un estudio con base al estado del arte donde se determinó que la técnica de lógica difusa es pertinente para el análisis del proceso de soldadura robotizada GMAW.
2. Mediante la técnica de sistemas difusos, inferir la relevancia de los parámetros voltaje, velocidad de hilo, velocidad de avance, stick out y abertura de raíz, junto con sus valores adecuados con la finalidad de generar geometrías de cordones de soldadura en el proceso GMAW robotizado con calidad pertinente en aleaciones de aluminio 5052-H32 unido con metal de aporte ER5183 con gas de protección Argón. La calidad se basa en las indicaciones del código estructural del aluminio D1.2.
3. Determinar la normalidad de las variables del proceso de soldadura GMAW robotizado mediante la prueba de normalidad Anderson-Darling.
4. Generar la comparativa de las técnicas de sistemas difusos, análisis de regresión simple y regresión múltiple para aproximar/predecir la geometría de los cordones de soldadura y su calidad.

5. Determinar las características multivariadas de los parámetros mediante el cálculo de la correlación estadística.
6. Mediante el ensayo de líquidos penetrantes, validar la calidad de las uniones soldadas en aleaciones de aluminio 5052-H32 unido con metal de aporte ER5183 con gas de protección Argón por el proceso GMAW robotizado utilizando el robot KUKA KR16.
7. Analizar la geometría de los cordones de soldadura mediante la preparación de muestras, montadas en frío en resina acrílica con acabado espejo y a un nivel macro.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio, unidos por el proceso GMAW robotizado, presentan discontinuidades en la geometría del cordón de soldadura como falta de penetración o alta convexidad, generando rechazos y por ende una pérdida económica. Dichas discontinuidades se presentan en la geometría del cordón de soldadura debido a la utilización de parámetros inadecuados del proceso GMAW semiautomatizado y GMAW robotizado. Los parámetros utilizados en el proceso GMAW semiautomatizado son voltaje, corriente y velocidad de avance. Los parámetros de entrada utilizados en el proceso GMAW robotizado son voltaje, velocidad de alimentación del hilo, velocidad de avance del robot, stick out y abertura de raíz.

La soldadura es un proceso complejo y con un comportamiento no lineal. Estas consideraciones dificultan la detección y la medición de los parámetros de entrada del proceso de soldadura durante la elaboración de la unión. Debido a esto, es fácil obtener mediciones de los parámetros de entrada con incertidumbres o inexactas. Cabe mencionar que, no existe una base de datos de parámetros de entrada o una ecuación matemática que pueda predecir o garantizar un cordón de soldadura con calidad en aleaciones de aluminio 5052-H32.

Debido a lo anterior, en esta investigación se optó por elaborar un diseño de experimentos con los parámetros de voltaje, velocidad de alimentación de hilo, velocidad de avance del robot, stick out y abertura de raíz en el proceso GMAW robotizado. El robot utilizado fue un modelo KUKA KR16 junto con una máquina de soldar marca LINCOLN y un gas de protección Ar de ultra alta pureza.

Se definió un diseño de soldadura a tope B-L1 en una aleación de aluminio 5052-H32 unido con metal de aporte ER5183, de acuerdo a las especificaciones del código estructural del aluminio AWS D1.2. Se analizaron e incorporaron los parámetros

(voltaje, velocidad de alimentación de hilo, velocidad de avance del robot, stick out y abertura de raíz) del proceso de soldadura GMAW robotizado como información para el entrenamiento y validación de las técnicas de soft computing, en donde se empleó redes neuronales artificiales y sistema triple difuso. Esto es debido a que las técnicas de soft computing pueden analizar información incompleta, información con incertidumbres y/o información inexacta. Además de tener la capacidad de manejar procesos complejos y no lineales como el proceso de soldadura GMAW robotizado y con ello obtener geometrías de cordones de soldadura con calidad pertinente.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace una reseña de varios autores que estudiaron la geometría del cordón de soldadura en materiales como aceros inoxidable y aleaciones de aluminio. Además, un análisis de las variables del proceso de velocidad de soldadura, voltaje y corriente que se utilizan varios investigadores para generar un calor de entrada y obtener una geometría del cordón de soldadura. La finalidad del análisis es observar los efectos que producen las variables utilizadas con respecto a la geometría del cordón de soldadura, utilizando técnicas estadísticas y validando la experimentación realizada.

Payares et al. 1997, establecieron el efecto de los parámetros del proceso GMAW en aleaciones de aluminio 6063. Los parámetros utilizados fueron corriente, voltaje y velocidad de soldadura. Observaron que el incremento del voltaje es proporcional al aumento de la anchura del cordón. El incremento de la velocidad de la soldadura es inversamente proporcional a la altura con la anchura del cordón y el incremento de la corriente es proporcional a la altura del cordón de soldadura; donde la variable más influyente fue la corriente [1].

Murray et al. 1999, inspeccionaron los perfiles de soldadura por GMAW en un acero inoxidable. Murray et al. 1999, mencionan que la transferencia de masa y la transferencia de calor influyen en la profundidad de la penetración. Un aumento de la transferencia de masa es atribuido a modificaciones de corriente, voltaje, velocidad de la soldadura, tamaño del electrodo, longitud del arco, rango de deposición del metal de aporte y modo de transferencia de masa. Presentaron un modelo sobre la profundidad de la penetración en el proceso GMAW. Basaron su modelo en la suposición de que la transferencia de calor, la masa del charco de soldadura y la

profundidad de penetración pueden estar correlacionadas por una relación adimensional [2].

Esta correlación los llevó a una expresión analítica para la profundidad de la penetración, las cuales involucran constantes empíricas que están relacionadas con la eficiencia del calor y la transferencia de masa del charco de soldadura. La precisión del modelo utilizado se examinó comparando la profundidad de penetración teórica y la profundidad medida. Utilizaron la regresión lineal para obtener una relación matemática simple y adecuada que facilitara la predicción de la profundidad de la penetración. Observaron que el modelo matemático presentaba un coeficiente de correlación ajustada (R^2) alto y un error estándar de regresión (E) bajo, confirmando que la transferencia de masa afecta a la profundidad de la penetración [2].

Dey et al. 2010, concuerdan que las técnicas de soldadura poseen varios parámetros que necesitan ser controlados durante la unión. Distintos investigadores han probado diferentes técnicas estadísticas, regresiones lineales y redes neuronales artificiales para relacionar los parámetros de entrada para predecir la anchura y la penetración de la soldadura [3].

Dey et al. aplicaron un algoritmo genético con una función de penalización de aproximación para determinar los parámetros requeridos con la finalidad de obtener un área de soldadura mínima, pero con una penetración máxima en un proceso EBW (Electron Beam Welding) en placas de aleación de aluminio 1100. Utilizaron una red neuronal con arquitectura 3-7-6 para predecir seis salidas. Los valores de los pesos fueron inicializados aleatoriamente entre rangos de 0.0 y 0.1 con un bias de 0.000095. Las variables de entrada fueron voltaje (V), corriente (I) y velocidad de soldadura (S). En la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida utilizaron funciones de transferencia lineal, sigmoideal y sigmoideal respectivamente aplicando un algoritmo backpropagation para entrenar la red neuronal. Posteriormente, el algoritmo de

entrenamiento fue reemplazado con un algoritmo genético para realizar una comparativa entre ambos resultados [3].

Observaron que al utilizar el algoritmo backpropagation es más probable que el error sea un mínimo local. El error mínimo local afecta la predicción de salidas de interés. Al utilizar algoritmos genéticos disminuye la probabilidad de que el error sea un mínimo local. Dicho lo anterior, Dey et al. encontraron que al utilizar redes neuronales con algoritmos genéticos presenta una mejor predicción en los perfiles de de soldadura que las redes neuronales con algoritmo backpropagation [3].

Dorta et al. 2011, observaron que la geometría del cordón (ancho, altura y penetración) en un acero inoxidable dúplex 2205 unido por el proceso SAW (Sumerged Arc Welding, por sus siglas en inglés) es directamente proporcional al HI (Heat Input, por sus siglas en inglés). Es decir que, al incrementar el HI la geometría del cordón de soldadura aumentará y viceversa. Además, observaron que la variable operacional responsable de la variación de la geometría del cordón es la corriente. La técnica estadística que se empleó fue la regresión lineal múltiple para estimar los parámetros de entrada en la unión de un acero inoxidable dúplex 2205 con el proceso de soldadura SAW. Las dimensiones de la geometría del cordón estarán en función de la corriente, el voltaje y la velocidad del proceso SAW. La técnica de regresión lineal múltiple generó una ecuación que expresa una relación entre las variables dependientes e independientes [4].

Rajkumar et al. 2012, realizaron una experimentación de 20 soldaduras en un acero inoxidable dúplex 2205, con la finalidad de utilizar la información obtenida en una red neuronal artificial y predecir la geometría del cordón de soldadura. La red neuronal artificial empleada en esta investigación fue una multicapa feedforward con algoritmo backpropagation. La arquitectura de la red neuronal utilizada fue de 3-5-3. Los datos de entrada utilizados en la red neuronal artificial fueron velocidad de soldadura, corriente y voltaje los cuales son los parámetros significativos en el proceso

FCAW (Flux Core Arc Welding, por sus siglas en inglés). Los parámetros de salida fueron la anchura, el refuerzo y el área total [5].

Las placas de acero inoxidable 2205 con dimensiones de $150 \times 50 \times 6 \text{ mm}$ con una abertura de raíz de 2 mm fueron soldadas por ambos lados con un electrodo de acero inoxidable dúplex de 1.2 mm . Como se mencionó anteriormente, se realizaron 20 soldaduras de las cuales 16 patrones fueron utilizados para el entrenamiento de la red con el algoritmo backpropagation. Los cuatro patrones restantes fueron utilizados como datos de prueba para la validación de la predicción de los datos de salida. El porcentaje de error fue calculado entre los valores calculados de la experimentación y los valores de la predicción de la red. El porcentaje de error obtenido con este tipo de red neuronal artificial fue entre $\pm 2.37 \%$. Por lo cual, el modelo obtenido por la red neuronal posee una alta precisión para predecir la geometría del cordón de soldadura con un 97.63% [5].

Aghakhani et al. 2012, investigaron la predicción de la dilución en cordones de soldadura en un acero ST37 por el proceso GMAW, utilizando la técnica de lógica difusa. El proceso GMAW es una de las soldaduras más utilizadas en la manufactura y reparación, por lo que es necesario conocer los valores apropiados del proceso para obtener predicciones confiables en sus propiedades mecánicas y en el rendimiento de la unión soldada [6].

Durante el desarrollo de esta investigación, se utilizó un diseño compuesto de cinco niveles y cinco factores con la finalidad de recopilar la información de soldadura. La dilución de la soldadura se modeló en función de la alimentación del electrodo, voltaje, distancia de la boquilla a la placa, velocidad de soldadura y rango de flujo de gas. La soldadura es considerada como un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas, por lo tanto, la calidad de la unión soldada es directamente proporcional a las variables de entrada durante la operación de la soldadura [6] [7].

Se empleó en el diseño de experimentos un gas de protección de Argón 80 % y CO₂ 20 % para generar 32 experimentos en placas de acero con un tamaño de 200 mm x 100 mm x 6 mm. El error de predicción de la dilución con lógica difusa fue menor a 1 %. Los resultados muestran que la dilución aumentará con el incremento de la alimentación del electrodo y el voltaje. La dilución disminuirá al incrementar la distancia de la boquilla a la placa y la velocidad del proceso de soldadura, debida que el calor de entrada disminuirá. Dicho lo anterior, se concluyó que el método de lógica difusa es una técnica precisa y eficiente en la predicción de la dilución de la soldadura [6].

La combinación de técnicas de soft computing resulta útil en situaciones de selección de parámetros y predicción de salidas en sistemas o procesos que no se tiene una descripción matemática completa. Las técnicas de soft computing son ampliamente dependientes de la experiencia de un experto en el tema, como por ejemplo en la predicción de las geometrías del cordón de soldadura.

Una prueba de la combinación de las técnicas de soft computing, en situaciones de incertidumbres para el investigador es la expuesta en el trabajo de Carpenter et al. 1991. Se implementó una nueva arquitectura de red neuronal con aprendizaje autónomo, con capacidad de clasificar vectores arbitrariamente ordenados en categorías de reconocimientos basados en el éxito predictivo [8].

Esta red nombrada ARTMAP cuenta con la capacidad de realizar reconocimientos a altas velocidades en tiempo real, con el objetivo de discernir si dos clases de hongos son comestibles o venenosos en una gama amplia de hongos. Para que el sistema de reconocimiento sea considerado eficiente, debe ser capaz de emplear “el aprendizaje de muchos a uno” (many-to-one learning) y “el aprendizaje de uno a muchos” (one-to-many learning). Estos aprendizajes se refieren a la capacidad de aprender diferentes clases de descripciones, para clasificar en una sola categoría (en el caso del may-to-one-learning) o que tenga la capacidad de aprender de una sola

categoría en generar demasiadas predicciones en base a sus características (en el caso de one-to-many learning) [8].

Las arquitecturas ARTMAP's se basan en la teoría de resonancia adaptativa (ART), la cual consiste en analizar como las redes cerebrales pueden aprender de forma autónoma, en tiempo real sobre un entorno que cambia de manera constante y rápida. Debido a lo anterior se han desarrollado una serie de módulos, con arquitecturas neuronales, nombrados ART's las cuales tienen altas capacidades de aprendizaje. Este tipo de arquitecturas se les conoce como ART predictivas ya que pueden aprender a predecir una salida del vector "b" de m -dimensiones de una entrada del vector "a" de n -dimensiones [8].

ARTMAP's tienen una semejanza con el algoritmo de Backpropagation debido que poseen sistemas de aprendizaje supervisado. Esto quiere decir que existe una asociación de los vectores de entradas "a" y "b" en cada entrenamiento y el rendimiento del sistema será determinado por la comparación de "b" con la respuesta correcta. Es decir, el sistema realiza una prueba y predice correctamente las respuestas de un conjunto de entradas novedosas de "a", el sistema tiene la propiedad de generalización el cual es una característica esencial en este tipo de sistema [8].

Dicho lo anterior, el sistema ARTMAP está diseñado para maximizar la generalización y minimizar el error predictivo en condiciones de aprendizaje rápido, tiempo real y respuesta a un ordenamiento arbitrario de patrones de entrada. Las predicciones resultantes de la utilización del ARTMAP darán como resultado una mayor precisión, mayor eficiencia y mayor flexibilidad en comparación con otros algoritmos de aprendizajes. Los resultados fueron obtenidos al aplicar algoritmos alternativos como STAGGER y HILARRY como un medio comparativo del sistema ARTMAP. Observaron que al utilizar algoritmos alternativos se puede alcanzar rendimientos de hasta 95 % de precisión al usar 1,000 datos de entrada en su

entrenamiento, mientras que el sistema ARTMAP logró un mayor porcentaje de 99 % con la misma cantidad de datos de entrada usados en los algoritmos anteriores [8].

En el trabajo desarrollado por Carpenter et al. 1992, presentaron un nuevo sistema ARTMAP con la capacidad de aprender a clasificar vectores analógicos y binarios denominado Fuzzy ARTMAP. En específico, Fuzzy ARTMAP es una nueva arquitectura de red neuronal con un aprendizaje supervisado incremental sobre el reconocimiento de categorías y de mapas multidimensionales, respondiendo a secuencias arbitrarias de vectores de entradas analógicas o binarias [9].

La arquitectura Fuzzy ARTMAP es una generalización de la unión de lógica difusa y redes neuronales de la teoría de resonancia adaptativa (ART, por sus siglas en inglés). La generalización se basa en el reemplazo de los módulos ART con los módulos Fuzzy Art. Los módulos ART solo pueden aprender categorías estables en respuesta a vectores de entrada binarios. Los módulos Fuzzy ART pueden aprender las mismas categorías estables, pero en respuesta a vectores de entradas analógicos o binarios, demostrando cómo los cálculos de la teoría de conjuntos difusos se pueden incorporar de forma natural en los sistemas ART [9].

La arquitectura Fuzzy ARTMAP emplea una nueva regla de aprendizaje "Minimax". La regla de aprendizaje Minimax tiene como función minimizar el error predictivo y maximizar la generalización permitiendo al sistema ARTMAP aprender de manera rápida, eficiente y precisa. Esto se obtiene mediante un procedimiento de seguimiento de coincidencias que aumenta el parámetro de vigilancia " ρ " del ART. El parámetro de vigilancia tendrá una porción mínima para corregir el error predictivo, obteniendo un sistema con aprendizaje automático que cumpla con los criterios de precisión en base a un número mínimo de categorías de reconocimiento o de "unidades ocultas" [9].

Al entrenar el sistema un cierto número de veces, utilizando diferentes ordenamientos arbitrarios de conjuntos de entrada, dará como resultado una predicción aceptable. Es decir que a mayor conjunto de entrenamiento mayor predicción obtendrá. Un ejemplo de la técnica Fuzzy ARTMAP es la identificación de patrones de puntos que se encuentran dentro y fuera de un círculo a través de los aprendizajes on-line learning y off-line learning. Se demostró que con un aprendizaje incremental (on-line learning) aumenta la precisión de identificación de puntos de un 88.6 % hasta 98 % a medida que el conjunto de entrenamiento aumente. Es decir que el tamaño de puntos elegidos aleatoriamente se incrementará de 100 a 100,000 puntos. Con el aprendizaje off-line learning, el sistema necesitaba de 2 a 13 épocas para aprender todos los conjuntos de entrenamiento con una precisión del 100 %, donde una época se define como un ciclo de entrenamiento de un conjunto completo de entradas. La precisión del conjunto de prueba aumentó de un 89 % hasta 99.5 % a medida que el tamaño del conjunto de entrenamiento aumentó de 100 a 100,000 puntos [9].

Williamson 1996, presentó una nueva arquitectura de red neuronal para el aprendizaje supervisado incremental de mapas multidimensionales analógico, llamada Gaussian ARTMAP (GA). El aprendizaje mencionado crea y actualiza una representación interna de un mapeo sin ningún conocimiento a priori del dominio del problema. El entrenamiento consiste en un par de vectores de entrada/salida el cual se refinará para mejorar la predicción al proporcionar otros datos de prueba [10].

Gaussian ARTMAP está constituida de un clasificador gaussiano y de una red neuronal que se basa en la teoría de resonancia adaptativa (ART). La red ART tiene como finalidad agrupar gradualmente las entradas en categorías a través de dos funciones: selección y coincidencia. La cantidad de categorías depende del parámetro de vigilancia " ρ ", el cual determina la extensión de características que pueden ser codificadas por la misma categoría. La función de selección es la encargada de seleccionar la categoría que es más probable que pertenezca una entrada y la función

de coincidencia determina si la categoría elegida es lo suficientemente similar al vector de entrada para satisfacer el parámetro de vigilancia " ρ " [10].

Si la categoría seleccionada satisface la función de coincidencia, se dice que el sistema "resuena" y la categoría "aprende". Si la categoría seleccionada no satisface la función de coincidencia entonces la categoría se restablece y se elige otra categoría. Si ninguna categoría existente satisface el criterio de coincidencia, entonces se opta por una nueva categoría. Por lo tanto, ART produce de forma incremental el número de categorías necesarias para representar grupos de muestras de entrada, con la inclusión de categorías inversamente relacionadas con " ρ " [10].

Gaussian ARTMAP mantiene las mismas propiedades que Fuzzy ARTMAP, pero con la singularidad de que produce una representación más eficiente y más resistente a las proliferaciones de datos con ruido, insuficientes, inconsistentes, que no estén correlacionados y que se encuentren distribuidos. Además, este nuevo tipo de ARTMAP tiene como novedad la utilización de la distribución Gaussiana, con una media y una varianza estándar en cada categoría ART mejorando así la sensibilidad al ruido [10].

Se utilizó el mismo problema sobre la identificación de puntos que se encuentran dentro y fuera de un círculo dentro de un cuadrado. Se realizó una comparativa del FA con respecto del GA en base al número de categorías creadas y del rango de error obtenido. Se llevaron a cabo pruebas que consistían en 10,000 muestras esparcidas uniformemente en el cuadrado. Observaron que la red Gaussian ARTMAP supera a la red Fuzzy ARTMAP, debido que GA presenta una baja tasa de error ($\sim 1.8\%$) con pocas categorías ($\sim < 100$) mientras que FA presenta una baja tasa de error ($\sim 2\%$) pero con más categorías (~ 380). Por lo que se demostró que el entrenamiento de grandes conjuntos de datos en GA presentará una mejor generalización y una mejor resistencia al ruido que FA [10].

O. Martin et al, 2006, propusieron una RNA debido que las redes neuronales artificiales son conocidas como herramientas capaces de representar sistemas no lineales o de gran complejidad en el área de la metalurgia y en los procesos de soldadura. El objetivo de proponer una RNA fue para predecir la calidad de 225 puntos de soldadura en chapas de acero de 1 mm de espesor y con dimensiones de 100 mm x 300 mm, unidos por el proceso RSW (Resistance Spot Welding, por sus siglas en inglés). Los datos de entrada que emplearon para poder entrenar la RNA fueron intensidad de corriente, tipo de electrodo y tiempo de soldadura [11].

Los investigadores desarrollaron una arquitectura compuesta por 4 capas (M-S1-S2-S3), de tipo retropropagación multicapa por el Neural Network Toolbox de MATLAB®. En donde M es igual a 3 debido al número de datos de entrada, S1 y S2 es igual a la primera y segunda capa oculta (respectivamente) con el mismo número de neuronas y S3 tendrá una sola salida con valor de “1” si es válido o “0” si no es válido la calidad de la soldadura. Para determinar la salida de la calidad de la soldadura, los investigadores realizaron pruebas de tensión en probetas en cruz. La prueba de tensión en probetas en cruz servirá para evaluar la calidad en las soldaduras por puntos. La soldadura será válida si la carga máxima que soporta es igual o mayor a 5 kN. La soldadura no será válida si la carga máxima que soporta es menor a 5 kN. Realizaron distintas pruebas para definir la cantidad de neuronas en las capas ocultas y observaron que la arquitectura 3-6-6-1, presenta un error mínimo en la validación de 3.125×10^{-2} utilizando la función sigmoideal (tansig) para las capas ocultas y la función lineal para la capa de salida (purelin). Para la etapa de entrenamiento de la red utilizaron 193 puntos y para etapa de validación 32 puntos de soldadura, dando como resultado una predicción correcta de 31/32 puntos de soldadura obteniendo un 96.8 % de acierto [11].

La importancia de este artículo reside en la selección de las entradas de la RNA, ya que originalmente los parámetros considerados para la elaboración de la arquitectura eran intensidad de corriente, tiempo de soldadura, fuerza entre electrodos,

caudal de agua de refrigeración y tipo de electrodo. La selección de las entradas es de suma importancia ya que deben ser lo suficientemente representativas del proceso de soldadura, pero sin llegar a aumentar innecesariamente la arquitectura de la RNA y por consiguiente la complejidad del modelo neuronal. Debido a lo anterior, los autores toman la fuerza del electrodo y el caudal de agua de refrigeración como constantes y consideran como variables de entradas la intensidad de corriente, tipo de electrodo y tiempo de soldadura.

Abdullah et al, 2010, propusieron una red neuronal artificial con algoritmo backpropagation para predecir la altura, el ancho y la penetración en cordones de soldadura unidos por un proceso de soldadura manual por arco eléctrico. Las variables de entrada utilizadas para entrenar la red MLP (Multilayer Perceptron, por sus siglas en inglés) fueron diámetro del electrodo, corriente, voltaje, velocidad de desplazamiento, velocidad de alimentación del electrodo y extensión del electrodo. Los autores mencionan que, para encontrar la mejor arquitectura de la red neuronal artificial dependerá de la cantidad de capas ocultas y la cantidad de neuronas en las capas ocultas [12].

Por lo que, la arquitectura de la red neuronal artificial adecuada para predecir la altura, ancho y penetración fue encontrada por el método de ensayo y error. Los investigadores, después de varias pruebas, encontraron que la mejor arquitectura que mejor predice las salidas mencionadas anteriormente, a pesar de que en algunos casos el error resultó bastante alto, es 5 – 9 – 3 – 6 – 3 [12] [13].

Como conclusión de este artículo, se tiene que las características de la soldadura como la altura, el ancho y la penetración son de gran importancia para la integridad estructural. Dichas características son obtenidas por factores que influyen en la soldadura como el diámetro del electrodo, corriente, voltaje, velocidad de desplazamiento, velocidad de alimentación del electrodo y extensión del electrodo. Es importante considerar todos los parámetros para estudiar sus características. Cabe

señalar que, modelar un proceso matemático con todos los parámetros mencionados anteriormente resulta demasiado complejo y requiere de mucho tiempo. Debido a lo anterior, los investigadores optaron por utilizar una red neuronal artificial multi perceptrón con aprendizaje supervisado y con algoritmo Backpropagation. Utilizaron varios parámetros de entrada en la etapa de entrenamiento y encontraron una arquitectura adecuada (según los investigadores) para predecir las tres salidas de interés, pero con un error bastante alto. Cabe señalar que, al seleccionar los parámetros de entrada más significativos en el proceso de soldadura manual por arco eléctrico, la generalización de la arquitectura MLP cambiaría y el error disminuiría para una mejor predicción de las salidas de interés.

Ramos et al. 2013 realizaron un diseño factorial 3^3 con una réplica para la experimentación, dando un total de 54 experimentos para observar los efectos e interacciones de las variables utilizadas en el proceso GMAW robotizado con respecto a la geometría del cordón de soldadura en un acero 1018. Las variables utilizadas del proceso fueron velocidad de alimentación del electrodo (6.35 – 7.62 – 8.89 m/min), voltaje (23 – 25 – 27 V) y velocidad de soldadura (0.007 – 0.009 – 0.011 m/s) [14].

Utilizaron una red neuronal RBF (Función Base Radial, por sus siglas en español) con el propósito de predecir la geometría del cordón de soldadura utilizando los datos del diseño factorial para el entrenamiento de la red neuronal. El uso de la red neuronal RBF requiere de la selección adecuada de la posición de los centroides y del cálculo de las distancias entre los puntos "x" conocidos y los centroides de la función gaussiana. En consecuencia, se optó por utilizar diferentes métodos para calcular la posición de los centroides y las distancias entre los puntos x conocidos y los centroides [14].

Para calcular la posición de los centroides se utilizó la función k-means clustering (función disponible en matlab) y algoritmos genéticos. Para el cálculo de las distancias entre los puntos x y los centroides se utilizó la distancia euclidiana, la distancia Mahalanobis y la distancia Mahalanobis normalizada. La conclusión que

llegaron los investigadores fueron que la distancia Mahalanobis, utilizando un algoritmo genético, mostró en el modelo resultante un 79.14 % de predicción al área del cordón de soldadura [14].

Otro investigador que utilizan técnicas de soft computing para predecir salidas de interés en procesos de soldadura es Wu et al. 2001. Wu et al. 2001 desarrollaron un sistema de lógica difusa para el monitoreo del proceso GMAW automatizado y la evaluación de la calidad en las uniones soldadas. El sistema difuso desarrollado tiene la capacidad de reconocer las perturbaciones comunes durante la soldadura GMAW automatizada, utilizando las variables del proceso como voltaje, corriente y duración del cortocircuito [15].

Para ello, se utilizó un sistema de monitoreo de soldadura en tiempo real para clasificar soldaduras en dos grupos: defectuosos y no defectuosos. Para llevar a cabo el desarrollo del sistema de lógica difusa emplearon un método estadístico para procesar los datos capturados, con la finalidad de obtener las distribuciones de densidad de probabilidad (PDD, Probability Density Distributions por sus siglas en inglés) y las distribuciones de frecuencia de clase (CFD, Class Frequency Distributions) [15].

El sistema generará automáticamente reglas difusas y funciones de membresía de variables lingüísticas con la base de datos procesados por el PDD y el CFD. En esta investigación se utilizó la función triangular con grado de pertenencia entre 0 y 1. La experimentación se realizó en un acero con 1 mm de espesor unido a traslape en el proceso GMAW automatizado, un gas de protección de 18 % CO₂ y 82 % Ar, una velocidad de alimentación del electrodo de 4 m/min, una velocidad de la soldadura de 76 cm/min, una corriente media de 130 A y un voltaje establecido en la fuente de poder de 18 V [15].

Durante la experimentación se realizaron 48 soldaduras de las cuales se realizaron bajo ocho condiciones de las cuales una condición normal sin ninguna alteración y siete condiciones con alteraciones intencionales. Estas alteraciones fueron el incremento de la velocidad de alimentación del electrodo, disminución de la velocidad de alimentación del electrodo, incrementando del diámetro de la boquilla de gas, unión sobre dos láminas de acero, unión sobre una junta de traslape con un espacio entre las láminas superior e inferior, superficies del metal base con algo de aceite y unión sobre una junta de traslape con la lámina superior con un corte en el medio. Para la etapa de entrenamiento se utilizaron 24 soldaduras y para la etapa de validación se utilizaron 24 soldaduras. El sistema de lógica difusa desarrollado fue capaz de reconocer y clasificar 22 casos, por lo que la tasa de reconocimiento del sistema difuso desarrollado fue del 92 % [15].

La relevancia de este artículo radica en el tipo de técnica de soft computing que se utilizó para evaluar la calidad de las uniones soldadas con tres variables representativas en el proceso GMAW automatizado. Sin embargo, la técnica de soft computing empleada solo es aplicable en el tipo de acero y con las alteraciones descritas en la investigación para la clasificación de las soldaduras.

Kim et al. 2005 realizaron una investigación sobre un sistema inteligente con la finalidad de predecir la geometría del cordón de soldadura en el proceso GMAW. El material utilizado en la experimentación fueron placas de acero dulce AS 1204. La composición química del material es C 0.25 %, S 0.40 % y P 0.04 %. Los parámetros de soldadura aplicados en este estudio fueron corriente (180, 260, 360 *Amps*), velocidad de soldadura (250, 330 y 410 *mm/min*) y voltaje (20, 25 y 30 *Volts*). Las salidas que se midieron de la geometría del cordón de soldadura fueron ancho, altura (refuerzo), penetración, área de penetración, área de refuerzo, longitud del límite de penetración del cordón y longitud del límite del refuerzo del cordón [16].

El proceso GMAW fue de manera manual, por lo que la calidad de la soldadura estará controlada totalmente por la capacidad del soldador, ya que puede monitorear directamente el flujo del charco de soldadura para ejecutar los ajustes inmediatos y necesarios en los parámetros de soldadura para obtener un cordón aceptable. De esta manera surge la necesidad de desarrollar y emplear modelos matemáticos capaces de predecir los parámetros de soldadura en procesos por arco, con respecto a la pieza de trabajo y a la geometría del cordón de soldadura. El propósito de desarrollar modelos matemáticos es evitar la “suposición” de incrementar o de disminuir parámetros de soldadura para obtener una buena calidad [16].

Los investigadores emplearon un diseño experimental factorial para desarrollar dos modelos empíricos con la técnica de regresión múltiple los cuales fueron la ecuación lineal y la ecuación curvilínea. Estos modelos tienen como finalidad definir el efecto principal de cada factor como también sus interacciones entre ellos. Además, desarrollaron un modelo de red neuronal utilizando corriente, voltaje y velocidad de soldadura como variables de entrada debido que son consideradas como los principales parámetros que influyen en la geometría del cordón en el proceso GMAW. Sin embargo, es conocido que las técnicas de regresión no pueden describir adecuadamente los procesos de soldadura por arco ya que estos procesos tienen una gran complejidad, por tal motivo se desarrolló un modelo de red neuronal [16].

Utilizaron un modelo de red neuronal multicapa con algoritmo BP, con función sigmoideal y con un algoritmo LMS generalizada, cuya labor es reemplazar los pesos y ganancias en base al error cuadrático medio. Este tipo de red utiliza el aprendizaje supervisado, el cual está constituido por la etapa de entrenamiento y validación. En la etapa de entrenamiento de la red se tomaron 21 ejemplos y para la validación se tomaron seis ejemplos. La estructura de la red que da la mejor aproximación a las salidas deseadas fue de $3 \times 7 \times 11$. El factor de aprendizaje fue del 0.6 y el momentum fue de 0.9. El entrenamiento alcanzó hasta 200,000 mil iteraciones con un error de 0.001. Los parámetros utilizados para la comparación de las salidas deseadas en esta

investigación fueron la corriente (195 *Amper*), el voltaje (29 *V*) y la velocidad de soldadura (350 *mm/min*) [16].

Aunque el modelo obtenido por la red neuronal artificial tiene la capacidad de predecir la geometría del cordón de soldadura en el proceso GMAW de forma manual, la fiabilidad de la predicción dependerá de la habilidad/capacidad del soldador en monitorear el charco de soldadura y tal habilidad es algo que no se puede controlar en todas las ocasiones.

Manikya y Srinivasa, 2008 desarrollaron un modelo de red neuronal backpropagation para la predicción de la geometría del cordón de soldadura en un proceso GMAW-P. La selección adecuada de los parámetros que involucran al cordón de soldadura es complicada, por lo que la naturaleza del proceso en sí es demasiado compleja y además sus variables están correlacionadas entre sí afectando la geometría del cordón [17].

Debido a lo anterior, Manikya y Srinivasa utilizaron las redes neuronales artificiales debido que son métodos que pueden trabajar con información con incertidumbres (ruido) y cuyo proceso tiene un comportamiento no normal. Emplearon la red neuronal multicapa backpropagation con aprendizaje supervisado, el cual es un método iterativo, para determinar los parámetros de soldadura por arco. Las funciones de activación que se emplean en este tipo de redes (sigmoideal o tangente hiperbólica) son de comportamiento no lineal y tales funciones hacen que la red neuronal simule la no linealidad en los procesos por arco [17].

Durante el aprendizaje se empleó la regla de retroalimentación hacia atrás con el entrenamiento del gradiente descendiente para actualizar los pesos y bias. La salida de la red se comparará con la salida deseada y los pesos se ajustarán para minimizar el error. El error se propagará hacia atrás a través de la red, modificando los pesos basados en el algoritmo backpropagation [17].

Las variables del proceso GMAW-P utilizados para el modelo de red neuronal fueron velocidad de alimentación del electrodo (3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 y 8 *m/min*), corriente (440, 480, 520 *Amps*), velocidad de la soldadura (15, 20, 25), espesor de la placa (6, 8, 10 *mm*) y frecuencia (50, 101, 152 *Hz*). Las variables utilizadas son los responsables de dar tamaño y forma a la geometría del cordón de soldadura. Todos los demás parámetros, excepto los que fueron considerados en la experimentación, se supondrán que permanecen constantes. Las variables de la geometría del cordón de soldadura (salidas) que el modelo predecirá serán la convexidad y la penetración [17].

Manikya y Srinivasa realizaron 54 soldaduras para poder desarrollar el modelo de red neuronal. Se utilizaron 48 soldaduras en la etapa de entrenamiento y 6 soldaduras en la etapa de prueba. La arquitectura de la red neuronal está formada por una capa de entrada, dos capas ocultas y una capa de salida. La capa de entrada tendrá cinco neuronas debido a los cinco parámetros de entrada del proceso GMAW-P. La capa de salida tendrá dos neuronas, los cuales son representados por la convexidad y la penetración. Los datos de entrada y salida fueron normalizados en el rango [0,1] y se utilizó una función de activación sigmoideal para ambas capas, ya que las salidas varían entre cero y uno [17].

En la capa oculta realizaron diferentes pruebas con una y dos capas ocultas. Observaron que una red con dos capas ocultas, con cinco y cuatro neuronas respectivamente, mostró un mejor rendimiento en comparación con otras arquitecturas. En la etapa de entrenamiento la red neuronal alcanzó 150,000 *iteraciones* con un error del 0,0006 por lo que el modelo backpropagation puede emplearse para predecir la profundidad de la penetración y la convexidad del cordón de soldadura con un mínimo de error y con buena precisión [17].

Tales resultados podrán predecir la penetración y la convexidad en el cordón de soldadura en base a los parámetros utilizados durante la etapa de entrenamiento y la

etapa de validación de la red. Sin embargo, la red desarrollada únicamente puede predecir la geometría y la convexidad del cordón, pero no puede predecir la calidad en base a esos resultados obtenidos por los datos de entrada en la etapa de entrenamiento.

R. Sikora et al., 2009, tienen como objetivo desarrollar un algoritmo de reconocimiento automático de defectos (ADR por sus siglas en inglés) utilizando lógica difusa para la clasificación automática de defectos. El algoritmo se basa en la descripción de la forma del defecto mediante veintiún características. Esas características fueron calculadas para todos los defectos que se pueden visualizar en radiogramas. La clasificación se realizó de acuerdo con las respectivas normas de la soldadura [18].

Los investigadores comentan que los procesos físicos y químicos que ocurren durante la fusión de los materiales son muy complejos y no se comprenden en su totalidad. Debido a lo anterior, las uniones presentan defectos o discontinuidades cuyo efecto sería el de reducir la resistencia de la unión.

Las dificultades mencionadas anteriormente, por los investigadores, pueden ser solventadas principalmente por la experiencia del ser humano durante la elaboración de la soldadura. Actualmente, existen varios métodos o pruebas no destructivas para evaluar la soldadura. La mayoría de los casos, el área de la soldadura a analizar no es homogénea por lo que es recomendable utilizar la radiografía. La radiografía es una prueba popular para la inspección en la soldadura. La radiografía proporciona resultados claros, confiables y su interpretación son más sencillas que otros métodos.

Sin embargo, uno de los mayores problemas al emplear esta técnica y asegurar la calidad requerida de cualquier producto, es la necesidad de analizar una gran cantidad de radiogramas. Por mencionar un ejemplo sobre la técnica de radiografía, el

número de radiogramas a analizar en la industria de la construcción naval puede alcanzar incluso a miles de radiogramas.

De acuerdo con los investigadores, aún se están desarrollando sistemas computarizados avanzados para el análisis de los radiogramas. Debido a lo anterior los radiogramas fueron analizados por operadores expertos, por lo que la toma de decisión resultará confiable. Los sistemas de decisión más populares empleados para el reconocimiento automático de defectos utilizan algoritmos de inteligencia artificial como lógica difusa y redes neuronales [18].

El objetivo de los investigadores fue clasificar las grietas en cuatro grupos principales, para ello utilizaron el sistema Mamdani en la Fuzzy Logic. La selección de fuzzy logic es debido a que el proceso de entrenamiento es más sencillo, predecible y puede ser ajustado manualmente para minimizar los errores en comparación con redes neuronales. El proceso de ajuste en sistemas simples de la lógica difusa consta de tres pasos básicos: 1) determinar los parámetros de las funciones de pertenencia (MF) como el tipo y la forma (función de Gauss en la mayoría de los casos), 2) determinar la salida MF y 3) construir un conjunto de reglas difusas. Sin embargo, en el caso de problemas o procesos más complicados que involucren la identificación o aproximación, los parámetros correctos solo pueden obtenerse mediante procesos automáticos. El número de funciones de pertenencia está determinado por la complejidad del proceso y de la elección del programador o experto en la soldadura [18].

Como conclusión, el sistema de lógica difusa es una herramienta aceptable en el reconocimiento automático de defectos en las soldaduras, a pesar de que la naturaleza y la complejidad de la soldadura ocurren fenómenos físicos y químicos durante la fusión que no podemos controlar. Debido a lo anterior, los datos que se obtienen para el entrenamiento de la FL pueden contener ruidos o incertidumbres. Una de las ventajas de utilizar las técnicas de soft computing es que pueden emplear datos

con incertidumbre, correlacionados entre sí o que el mismo proceso tenga un comportamiento lineal o no lineal logrando clasificar, reconocer, aproximar, simular y predecir los datos de salida. A pesar de clasificar los defectos (grietas, porosidades, faltas de fusión y escoria) con un error máximo de 4.4 %, el sistema difuso empleado no presenta valores cuantitativos sobre la calidad de las soldaduras.

Ghetiya y Patel 2014 estudiaron la predicción de la resistencia a la tensión en una aleación de aluminio AA8014 en un proceso de unión por fricción utilizando redes neuronales artificiales. Se utilizaron placas de aleaciones de aluminio AA8014 con una composición química de 1.123 % *Fe*, 0.153 % *Cu*, 0.033 % *Ti*, 0.125 % *Mg*, 0.177 % *Mn*, 0.416 % *Si*, 0.304 % *Zn* y 97.6 % *Al*, con una resistencia a la tensión de 152 MPa y con dimensiones de 300 mm de ancho x 150 mm de largo x 4 mm de espesor [19].

El diseño de unión que seleccionaron para la experimentación fue a tope sin preparación de bisel a una sola pasada. Mencionan que en la literatura los factores predominantes en el proceso por fricción que tienen una gran influencia en la resistencia a la tensión son el diámetro del hombro de la herramienta, la velocidad rotacional, la velocidad de soldadura y la fuerza axial [20] [21]. Realizaron un total de 25 experimentos de los cuales se obtuvieron tres especímenes de tensión por cada uno de ellos, posteriormente realizaron las probetas de tensión siguiendo el estándar ASTM E8M-04 [19].

Ghetiya y Patel mencionan que las redes neuronales artificiales se han convertido en herramientas útiles para la predicción de la soldadura. Esto es debido a las características de las redes neuronales como el aprendizaje, generalización, computación rápida y facilidad de implementación. En esta investigación utilizaron una red neuronal perceptrón multicapa con algoritmo BP para predecir la resistencia a la tensión. La red neuronal fue desarrollada en el programa de MATLAB. De los 25 experimentos realizados se utilizó el 70 % en la etapa de entrenamiento y el 15 % en

la etapa de validación. Los investigadores optaron por trabajar con valores normalizados entre 0.1 y 0.9 debido a la facilidad de trabajar con valores más pequeños, pero tal recomendación es decisión de los programadores [19].

El algoritmo BP propaga el vector de entrada a través de la red para proporcionar una salida, este algoritmo encontrará un error el cual se propagará hacia atrás a través de la red para determinar el cambio de los pesos durante el entrenamiento. La arquitectura encontrada constará de una sola capa oculta y la función que se encargará del entrenamiento será el algoritmo del gradiente descendiente con momentum [19].

Durante el entrenamiento se incrementó la cantidad de neuronas en la capa oculta entre 5 y 10 neuronas con el objetivo de encontrar una salida con la mayor precisión a la salida deseada. La primera capa corresponde a los parámetros de entrada del diámetro del hombro de la herramienta, velocidad de la soldadura, fuerza axial y velocidad de rotación de la herramienta. La capa de salida (con función de activación sigmoideal) corresponde a la resistencia a la tensión [19].

La arquitectura que proporciona la mejor predicción a la resistencia a la tensión fue la 4 – 8 – 1 con 3 % de error. Utilizaron un factor de aprendizaje de 0.01 y un momentum de 0.9. El error obtenido indica que la predicción de la red brinda resultados muy cercanos a los valores deseados en la experimentación. Se puede inferir que el diseño de la red neuronal en esta investigación puede ser usado para predecir la resistencia a la tensión en soldaduras de placas de aleaciones de aluminio AA8014 en el proceso FSW [19].

La importancia de este artículo radica en que las arquitecturas de las redes neuronales artificiales pueden modificarse por el programador. Además, no existen registros sobre una regla que determine el número capas ocultas o neuronas que se deban utilizar. Dicho lo anterior, el número de neuronas en la capa oculta puede ser

modificado para obtener resultados cercanos a los valores deseados. El modelo obtenido por la red neuronal artificial, con algoritmo de entrenamiento gradiente descendiente, puede llegar a disminuir el error a valores pequeños agregando el momentum. Por lo que, la adición del momentum en redes neuronales puede disminuir los errores para obtener predicciones más cercanas a los deseados. Sin embargo, este tipo de red para un material y proceso de soldadura específicos no puede ser utilizado para predecir la calidad de las geometrías de las soldaduras ya que solo puede predecir la resistencia a la tensión.

Sreeharan B.N. et al, 2017, realizaron un estudio en placas de aleaciones de aluminio AA6351 con dimensiones de las placas de $100 \times 25.4 \times 10 \text{ mm}$, preparación de visel de 45° y con una abertura de raíz de 4 mm . Las placas de aleación de aluminio AA6351 fueron unidas por el proceso GMAW, con la finalidad de examinar y determinar los parámetros óptimos con respecto a la dilución. Se empleó redes neuronales artificiales en el software MATLAB para determinar los parámetros óptimos. Los parámetros óptimos fueron seleccionados de acuerdo al porcentaje máximo de dilución obtenida en las soldaduras. Se utilizó un diseño de experimentos Taguchi L9 para realizar las soldaduras. Los datos de entrada utilizados durante la experimentación fueron corriente ($120 - 130 - 140 \text{ A}$), tasa de flujo de gas de protección ($10 - 13 - 16 \text{ l/min}$) y tasa de alimentación del electrodo ($5 - 5.5 - 6 \text{ m/min}$). Las salidas o respuestas que involucran a los datos de entrada mencionados anteriormente fueron ancho, altura, penetración y dilución de la soldadura [22].

De acuerdo a los investigadores, el principal problema que presenta cualquier proceso de soldadura (en específico el proceso GMAW) es en la selección de combinaciones adecuadas de parámetros para obtener geometrías de soldaduras con calidad pertinente. Debido a esto, la calidad de las soldaduras está altamente relacionada con las dimensiones de la geometría del cordón de soldadura. Los niveles de los parámetros seleccionados en el diseño de experimentos fueron denotados como -1 , 0 y 1 para representar los valores mínimos, intermedios y máximos de la

experimentación. La experimentación se llevó a cabo de manera aleatoria variando uno de los factores mientras que el resto se mantenía constante y así sucesivamente [22].

El valor óptimo fue determinado basándose en el porcentaje de dilución calculado en las 9 soldaduras. Por lo que, el porcentaje de mayor dilución calculado fue en la soldadura número 8 con 87.32 %. Debido al porcentaje alto de dilución que presentó la soldadura número 8 fue elegido como el valor óptimo. Para entrenar la red neuronal artificial se utilizó el software de MATLAB 10 para predecir la geometría del cordón de soldadura. Emplearon el algoritmo Backpropagation y Levenberg-Marquardt debido que pueden reducir el MSE a un valor significativamente pequeño para una mejor precisión en la predicción. Durante la etapa de entrenamiento fueron utilizados los datos recopilados en la experimentación, calculando el error de cada soldadura con una arquitectura de 3 – 1 – 3. Emplearon la función de transferencia tansig tanto en la capa oculta y capa de salida. Los valores óptimos de los parámetros de entrada con respecto a los valores de salida por ANN fueron corriente de 140 A, tasa de flujo de gas de protección de 13.84 *l/min* y tasa de alimentación del electrodo de 5.44 *m/min* [22].

Como conclusión de este artículo, se tiene que los procesos de soldadura generalmente utilizan el método de prueba y error, basado en la experiencia del soldador para encontrar la mejor combinación de parámetros que generen una geometría del cordón de soldadura. Las soldaduras realizadas por la experiencia del soldador dan como resultado un cierto grado de inexactitud, pérdida de tiempo, material y costo. Tal resultado es debido a la inexactitud de la combinación de parámetros empleados para unir materiales metálicos. Por tal motivo se recomienda utilizar técnicas o métodos de predicción como modelos de regresión o modelos de redes neuronales artificiales [23]. Sin embargo, la red neuronal utilizada en esta investigación tuvo como propósito conocer los parámetros de entrada óptimos a través de la dilución y relacionarlo con la geometría del cordón de soldadura. Por lo que, este

tipo de red en esta investigación no puede determinar cuantitativamente la calidad de la geometría del cordón.

Srinivasa et al, 2017, realizaron un estudio para poder encontrar los parámetros óptimos de soldadura en el proceso GMAW semiautomatizado. Emplearon técnicas de soft computing en tuberías SS 316L tomando únicamente como parámetros de entrada la velocidad de soldadura y la velocidad de alimentación del alambre. Los parámetros seleccionados servirán para determinar la resistencia a la tensión y la penetración de los cordones de soldadura. De acuerdo con los investigadores, se seleccionó las redes neuronales debido a su capacidad de aprendizaje, su generalización, su cálculo rápido y su facilidad de implementación en el campo de la ingeniería. Haciendo hincapié, el entrenamiento de redes neuronales artificiales requieren de grandes conjuntos de información para realizar el entrenamiento y poder predecir las salidas de interés [24].

Los investigadores están de acuerdo en que el método de soldadura requiere de realizar un método de ensayo y error. Por lo que, se desarrolló una red neuronal artificial con una arquitectura 70-15-15 con un algoritmo de entrenamiento Backpropagation, en donde 48 combinaciones se utilizaron para la etapa de entrenamiento, 11 para la etapa de validación y 11 para la etapa de prueba [24].

Se desarrollaron dos modelos matemáticos, a través de las redes neuronales, para obtener la profundidad de la penetración y la resistencia a la tensión de la unión. Se calculó el MSE de los modelos matemáticos y encontraron los valores de R^2 de 0,95664 y 0,90948 respectivamente. Estos resultados comprueban la fiabilidad de la red neuronal. Por lo tanto, la red neuronal artificial para predecir los parámetros de entrada y calcular las salidas deseadas tiene una precisión de aproximadamente 90 por ciento [24].

Como conclusión de esta investigación, se puede apreciar que la red neuronal artificial es una técnica que simula la complejidad lineal o no lineal de los procesos de

soldadura. Por lo tanto, la red neuronal resulta ser una opción adaptable a la complejidad y realidad de los procesos de soldadura. Cabe mencionar que los resultados únicamente se centran en la profundidad de la penetración y en la resistencia a la tensión. Además, no se hace mención de la dependencia de los resultados con la calidad de los cordones de soldadura con el proceso GMAW semiautomatizado, ni bajo que código acreditan la profundidad de la penetración y la resistencia a la tensión.

Singh et al, 2019, realizaron un modelado de las características de cordones de soldadura en placas de acero inoxidable unidos por el proceso GMAW. El modelado se llevó a cabo mediante una red neuronal artificial (ANN), puesto que se ha demostrado que es una herramienta eficiente cuando existe una problemática de predicción en las áreas de ingeniería, medicina y finanzas (por mencionar algunas). De acuerdo al investigador, se seleccionó las ANN debido a sus ventajas tales como computación extrema, memoria potente y aprendizaje rápido [25].

Los parámetros de soldadura como velocidad de alimentación del alambre (WFR), voltaje (V), velocidad de soldadura (S) y distancia entre la boquilla y la placa (NTD) fueron considerados como los parámetros más influyentes en el proceso GMAW. Los parámetros de entrada servirán para analizar las salidas del cordón de soldadura como penetración (P), ancho (W) y refuerzo (R). Singh menciona que la calidad de la soldadura depende de las salidas del cordón de soldadura. Los rangos de los parámetros de soldadura fueron conocidos mediante pruebas experimentales, seguidas de una inspección visual del cordón de soldadura [25].

Singh realizó varios ensayos con diferentes números de neuronas para observar y estudiar el rendimiento de la red. El entrenamiento de la red comenzó a partir de 5 a 15 neuronas con función de transferencia tansig, con el objetivo de minimizar el porcentaje de error para todas las respuestas. Observaron que, con la arquitectura 4-8-1, con función de transferencia tansig y con entrenamiento Levenberg-Marquardt, el

promedio del porcentaje de error para la penetración, ancho y refuerzo fue de 4.17 %, 3.85 % y 5.8 % respectivamente. Tales resultados son considerados óptimos por parte de Singh et al [25].

Como conclusión de este artículo podemos inferir que, las redes neuronales artificiales son herramientas ideales para la predicción de salidas de interés, como es el caso de los procesos de soldadura. Los resultados que se presentan en esta investigación son considerados como valores óptimos, pero para placas de acero inoxidable en un proceso GMAW. Se desconoce si el proceso GMAW es semiautomatizado o robotizado. Como punto adicional, el alcance de esta investigación está limitado únicamente para predecir las salidas mencionadas anteriormente sin considerar la calidad de las soldaduras.

Choudhury et al, 2020, desarrollaron un estudio comparativo entre la metodología de superficie de respuesta (RSM) y una red neuronal artificial (ANN). El estudio comparativo fue para predecir el área de 30 cordones de soldadura en aleaciones de níquel (Inconel 825) por el proceso EBW. Los investigadores mencionan la importancia del área del cordón de soldadura, debido que el área es la medida responsable de la resistencia a la tensión [26].

En la investigación se menciona lo esencial que es el tipo de unión que se usará junto con la preparación del material base, todo esto para lograr una soldadura con buena calidad. Mencionado lo anterior, el tipo de unión fue a tope sin preparación de bisel y con preparación del material para eliminar la capa de óxido por medio de papel lija y acetona. En el trabajo se indica que las salidas del proceso de soldadura EBW son influenciadas por uno o más datos de entrada, por lo que se consideró la velocidad de soldadura (S), voltaje de aceleración (V), corriente del haz (I) y oscilación del haz (O) como los datos de entrada que influyen en el área del cordón de soldadura. Los rangos de trabajo, de los diferentes factores de entrada de la soldadura, se obtuvieron

por medio de unas series de ensayos preliminares de cordones de soldadura sobre la placa [26].

De acuerdo con los resultados de la RSM y la ANN, indican que ambos modelos son altamente precisos para la predicción del área del cordón de soldadura en Inconel 825, con un 95.58 % y 98 % respectivamente. Sin embargo, la ANN con una estructura de 4-11-1, con función sigmoideal logsig en la capa oculta y una función lineal positiva poslin en la capa de salida mostró un modelo con mayor precisión en la predicción del área del cordón de soldadura [26].

Como conclusión de este artículo se puede inferir que, los modelos obtenidos por la RSM y la ANN tienen la capacidad de predecir como mínimo un 95 % el área del cordón de soldadura en un proceso EBW. Este porcentaje demuestra que las técnicas de RSM y ANN se han convertido en metodologías populares, ya que se utilizan demasiado en el área industrial para el modelado de procesos simples o complejos y con un comportamiento lineal o no lineal. Dicho todo lo anterior, en esta investigación únicamente se desarrollaron dos modelos capaces de predecir el área del cordón de soldadura, ignorando un análisis de la calidad a través de las geometrías obtenidas.

Vijila et al, 2021, desarrollaron un sistema basado en reglas difusas para la predicción de la geometría del cordón de soldadura. El sistema difuso tiene como objetivo realizar un estudio comparativo entre los valores reales y los predichos con la técnica de lógica difusa. Los investigadores observaron que los factores que afectan en los resultados de la soldadura son la metalurgia, el proceso de soldadura, el diseño de la unión, entre otros [27].

En la elaboración de esta investigación, se utilizó el sistema difuso con inferencia de tipo Mamdani para la predicción de los parámetros de la geometría del cordón de soldadura. Los parámetros de entrada para el modelo propuesto fueron

corriente (I), velocidad (S) y distancia entre la boquilla y la placa (N). Los parámetros de salida fueron la profundidad de la penetración (P), el ancho del cordón de soldadura (W) y el refuerzo (R) [27].

Los parámetros de entrada y de salida, del sistema difuso propuesto, se convertirán en las variables lingüísticas con funciones de pertenencia triangulares para transformar el conjunto nítido en conjunto difuso durante la fusificación. Los investigadores desarrollaron un total de 20 reglas difusas en la base de conocimientos para la aplicación de la inferencia difusa de tipo Mamdani. Finalmente se empleó el método de defusificación del centro de suma en la salida del conjunto difuso para obtener una predicción de valor nítido o real. El valor de la predicción de los parámetros de salida fue utilizado para calcular el valor del error, el cual es la diferenciación entre el valor real y el valor predicho con el sistema difuso [27].

De acuerdo con el estudio comparativo con la técnica de lógica difusa, entre los valores reales y los valores predichos, el valor máximo de error en la penetración fue de 0.6, el valor máximo de error en el refuerzo fue de 0.14 y el valor máximo de error en el ancho del cordón fue de 1.56. Esto nos lleva a la deducción que con la técnica de lógica difusa puede brindar predicciones cercanas a los valores reales. Sin embargo, los resultados de la predicción pueden mejorar aumentando el número de reglas difusas [27].

Como conclusión de este artículo, cabe mencionar que la técnica de lógica difusa es un método adaptable para procesos demasiados complejos como es el caso de la soldadura. Como es bien conocido, los estudios referentes a la soldadura conllevan al análisis de parámetros de entrada como la corriente y la velocidad de soldadura, por mencionar algunos. Sin embargo, tales estudios no relacionan la geometría del cordón de soldadura con la calidad en base a los códigos correspondientes del acero o aluminio.

En los avances anteriores, se hizo un análisis de varios investigadores que estudiaron el efecto de los parámetros de soldadura como velocidad, voltaje y corriente con respecto en la geometría del cordón de soldadura en materiales como los aceros inoxidables y aleaciones de aluminio. Tales estudios emplean técnicas estadísticas como la regresión lineal simple o la regresión lineal múltiple para generar modelos matemáticos capaces de calcular la profundidad de la penetración, anchura o la geometría del cordón de soldadura. Los modelos matemáticos desarrollados por los investigadores solo pueden ser aplicados bajo las mismas condiciones para su repetibilidad, suponiendo que los parámetros del proceso de soldadura se mantienen constantes durante el desarrollo del cordón de soldadura y suponiendo que los datos de entrada cumplen con los supuestos de normalidad.

Se ha comentado que los procesos de soldadura son demasiado complejos y que los datos de entrada están correlacionados entre sí, que no cumplen con los supuestos de normalidad y que los datos de entrada no se mantienen constantes durante la soldadura. Debido a esto, obtener mediciones precisas de los parámetros del proceso de soldadura resulta complicado. Dicho esto, se infirió que aplicar técnicas estadísticas para generar un modelo matemático capaz de calcular la salida deseada no resulta ser lo más adecuado.

Debido a lo anterior, varios investigadores han realizado un estudio relacionando los parámetros del proceso de soldadura con la geometría del cordón de soldadura. Tales estudios lograron predecir la anchura y la penetración de las uniones soldadas empleando técnicas más sofisticadas como lógica difusa y redes neuronales artificiales. De acuerdo a la literatura y a los investigadores que emplean estas técnicas, recomiendan su uso cuando no existe un modelo matemático capaz de describir un proceso por completo, los datos de entrada tienen incertidumbres, los datos de entrada están correlacionados entre sí o los datos de entrada cumplen o no con los supuestos de normalidad.

El estado del arte que se ha consultado anteriormente, emplea técnicas estadísticas y de soft computing para predecir alguna salida de interés en la soldadura. Cabe recalcar que, en el tema de la soldadura el calor de entrada está presente en los procesos de soldadura para generar cordones de soldadura. Por lo que el calor de entrada tiene una influencia o termodependencia con las propiedades físicas del metal base como por ejemplo la conductividad térmica y el calor específico. Dicho esto, se comentarán algunos trabajos que emplean un análisis térmico en los procesos de soldadura para conocer su relevancia.

Distintos investigadores han estudiado el efecto del calor de entrada o la distribución de temperaturas en placas de metal con un modelo de elemento finito. Tal es el caso de Ramos Morales et al, 2009, el cual desarrolló un modelo de elemento finito para reproducir una unión de dos placas de acero de bajo contenido de carbono y baja aleación. Las dimensiones de los materiales fueron 240 x 120 x 5 mm. El estudio tiene como objetivo analizar la influencia sobre la distribución de temperaturas en las placas de acero en un proceso de soldadura SMAW utilizando corriente, voltaje, velocidad de soldadura y energía lineal de soldadura como datos de entrada. Este análisis conlleva a un estudio preliminar de la ecuación diferencial del flujo de calor, en coordenadas cartesianas, cuyas posibles soluciones analíticas fueron proporcionadas por los supuestos de Rosenthal. Se menciona que el flujo de calor dependerá del espesor de la placa. Si el espesor de la placa es fino se emplea la ecuación de flujo de calor bidimensional. Si el espesor de la placa es grueso entonces se emplea la ecuación de flujo de calor tridimensional. Félix Ramos Morales también menciona que las ecuaciones de Rosenthal han sido empleadas en diversas investigaciones en el área de la soldadura. Tales investigaciones sirvieron para predecir la forma de la zona de fusión, la zona afectada por el calor y el ciclo térmico que afecta la microestructura en el metal base [28].

Mojica Bustos, 2014, empleó la técnica de ensayo no destructivo de termografía con una cámara THERMACAM PM 675. La termografía sirvió para determinar el flujo

de calor de entrada en un material base A-36 de tres diferentes espesores los cuales fueron 1/8, 3/16 y 1/4 de pulgada. El material base fue unido por el proceso SMAW. Para el análisis de las termografías empleo el software Table curve 2D. Este tipo de software puede incorporar ecuaciones distintas de las ecuaciones que el mismo software ya tiene integrado. Como resultados de esta investigación se comentó, que el estudio realizado permitió generar gráficas y formular ecuaciones que pueden predecir el comportamiento de temperatura en función de los espesores utilizados con la termografía [29].

L. Pacheco et al, 2015, desarrollo un modelo teórico experimental basado en las soluciones de la ecuación de Rosenthal. El modelo generado tiene como objetivo determinar el ciclo térmico en la zona afectada en materiales disímiles unidos por el proceso SMAW. Los materiales disímiles usados fueron aceros AISI 316L y AISI 430. Menciona que la adquisición de datos de los ciclos térmicos fue tomada en tiempo real con ayuda de termopares tipo K ubicados estratégicamente en la zona afectada por el calor. El objetivo de este estudio fue generar un modelo analítico para determinar los ciclos térmicos en las uniones soldadas, ya que comentan que los ciclos térmicos influyen en las propiedades finales de la unión. Los ciclos térmicos pueden ocasionar distorsiones, cambios geométricos, esfuerzos residuales y modificaciones en el tamaño del grano. De la misma manera en que Rosenthal presentó suposiciones para explicar las posibles soluciones a las dos variantes de la ecuación del flujo de calor para placas delgadas y placas gruesas, Jorge L. Pacheco presentó tres condiciones para poder aplicar su modelo propuesto. Tales condiciones darán posibles soluciones en su modelo para placas delgadas y placas gruesas. Los resultados que presenta el modelo propuesto son comparados con los resultados obtenidos de manera experimental, en donde los picos de temperaturas no superen el 5 % de error y las tasas de enfriamiento no superan el 3 % de error [30].

Pérez Mauricio, 2015, realizó una selección de información sobre herramientas computacionales y metodologías de simulación (software) empleado el proceso

GMAW en uniones disimiles. Los materiales disimiles fueron aceros avanzados de alta resistencia y aceros inoxidable. La información tiene como finalidad calcular y predecir las propiedades y los cambios microestructurales de las uniones disimiles, empleando la técnica de elemento finito para simular el proceso de soldadura. Martha Pérez Mauricio comentó que durante la soldadura se generan picos de temperatura los cuales tienen un efecto sobre la microestructura. Dicho esto, menciona la importancia de realizar un análisis de las ecuaciones de flujo de calor de Rosenthal, infiriendo que todas las suposiciones son cumplidas para conocer de manera aproximada las salidas de interés. También menciona que la soldadura, en específico en la zona afectada por el calor, la transferencia de calor que predomina es la conducción. Como conclusión en su trabajo de investigación, comenta tres programas que utilizan el elemento finito los cuales son SOLIDWORKS, ANSYS y SimuFact Welding los cuales aportan rendimiento, calidad y conocimientos para los problemas de diseños complejos a través de simulaciones, los cuales reducen costos y tiempo de validación con pruebas físicas [31].

En resumen, emplear el método de elemento finito en algún software como SOLIDWORKS, ANSYS, SimuFact Welding o Table curve 2D para poder simular, estudiar y predecir la influencia de la transferencia de calor en placas soldadas resulta ser beneficioso para reducir costos y tiempo de validación en pruebas reales. Sin embargo, para poder emplear e interpretar correctamente los resultados se necesita de una formación especializada y experiencia sobre la transferencia de calor. Además, los softwares que sirven para analizar la transferencia de calor con la técnica de elemento finito, emplean las ecuaciones de Rosenthal por lo que se llega a la suposición de que los supuestos de Rosenthal se cumplen en su totalidad a pesar de que en la realidad no es así. A pesar de que el método de elemento finito pueda predecir la transferencia de calor de las uniones soldadas, no se ha registrado o relacionado la predicción de la transferencia de calor de los cordones de soldadura con respecto a su calidad.

Por otra parte, el estado del arte que se ha consultado hasta el momento muestra modelos matemáticos que pueden predecir parte de la geometría del cordón de soldadura, la transferencia de calor, el espesor relativo, la resistencia de tensión o la dureza. Tales modelos emplean técnicas estadísticas como los métodos de regresión lineal simple, regresión lineal múltiple, elemento finito o técnicas más sofisticadas de soft computing como redes neuronales artificiales o lógica difusa. Estas técnicas son empleadas en procesos de soldadura como GMAW, EBW, SAW, FCAW y RSW en metales base como aleaciones de aluminio 6063, aleaciones de aluminio 1100, acero inoxidable, acero inoxidable dúplex 2205, chapas de acero y acero 1018. Por lo que, se puede concluir que en la actualidad no existe un modelo matemático para un proceso de soldadura GMAW semiautomatizado o robotizado, capaz de predecir la geometría del cordón de soldadura y relacionarla con su calidad en placas de aleación de aluminio 5052-H32.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Inicio de la soldadura

El método utilizado por el herrero para unir los metales fue la soldadura de forja. La soldadura por forja es una técnica que se basa en calentar dos piezas sin llegar al punto de fusión, juntar el metal uno encima del otro y martillarlos hasta unirlos [32] [33].

Actualmente la electricidad ha sustituido el método de forja para construir vehículos, aviones o recipientes. El método más común que emplea la electricidad es la soldadura eléctrica por arco el cual está basado en los principios descubiertos a finales del siglo XIX [32].

Elihu Thomson desarrolló máquinas de soldadura por puntos, soldadura por costura y soldadura por proyección. La soldadura por puntos se convirtió en el método principal más común que hoy en día utiliza la industria automotriz. La Figura 3. 1 muestra su principio en la que dos electrodos de cobre aplican una presión a las placas que están sobrepuestas y una corriente eléctrica lo suficientemente alta que funde y une el material. Los primeros robots para la soldadura por puntos de resistencia fueron entregados por Unimation a General Motors en 1964 [32].

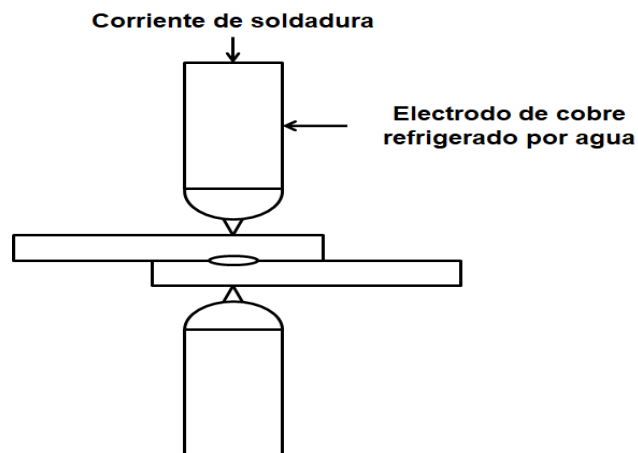


Figura 3. 1 Representación de la soldadura de resistencia por puntos [32].

Los ingenieros franceses Edmund Fouche y Charles Picard crearon el proceso de soldadura por gas con una antorcha y con una flama de oxiacetileno ($C_2H_2 + O_2$) a finales del siglo XIX. El uso del acetileno (C_2H_2) y del oxígeno (O_2) dio origen a una flama con una temperatura alta de aproximadamente $3,100^{\circ}C$. La antorcha se convirtió en la herramienta más importante para la soldadura y cortes en el acero en ese tiempo [32].

La soldadura por arco inicialmente utilizó electrodos de carbono y posteriormente fueron sustituidas por varillas de acero. Sin embargo, la soldadura no estaba protegida del medio ambiente por lo que surgieron dificultades con la calidad de la soldadura. Para dar solución a dichos problemas referente a la calidad en la soldadura, el sueco Oscar Kjellberg presentó un importante avance desarrollando y patentando el electrodo revestido. Debido a la contribución de Oscar Kjellberg, el electrodo revestido dio como resultado una soldadura con protección del medio ambiente [32].

En la década de 1930, se desarrollaron nuevos métodos de soldadura por arco debido que las soldaduras se realizaban de manera manual. El nuevo método de soldadura que se innovó fue la soldadura automatizada. La soldadura automatizada puede emplear una alimentación de electrodo continuo. El proceso más exitoso fue el

proceso SAW (Submerged Arc Welding, por sus siglas en inglés), donde el arco está "sumergido" en una capa de un fundente granulado [32].

Durante la Segunda Guerra Mundial, la industria aeronáutica requirió de un nuevo método para la unión en materiales de magnesio y aluminio. En 1940 iniciaron los experimentos de la soldadura con arco protegidos con gas inerte. En los Estados Unidos, utilizaron un electrodo de tungsteno no consumible con o sin material de relleno dando origen a la soldadura TIG (Tungsten Inert Gas, por sus siglas en inglés) [32].

Al igual que el proceso SAW, el proceso de soldadura MIG utiliza una alimentación continua de alambre de metal. El alambre de metal es conocido como electrodo, el cual estará protegido por un gas inerte como el helio o el argón [32].

Como se mencionó anteriormente, fue posible combinar y almacenar de manera segura el oxígeno y el acetileno para generar una flama capaz de realizar cortes o unir materiales. Al mismo tiempo, se generó una fuente de poder que permitió generar suficiente calor para la soldadura por resistencia y la soldadura por arco. El calor en estas soldaduras indujo la presencia de un charco fundido en las piezas de trabajo que al solidificar las uniera. Los métodos mencionados anteriormente fueron la pauta para dar inicio a una amplia gama de procesos de soldadura. En este trabajo solo se enfocará en el proceso de soldadura por arco GMAW [32].

3.2 Proceso de soldadura GMAW

El proceso de soldadura GMAW es un proceso de unión que puede ser semiautomatizado o robotizado. Este tipo de proceso emplea un arco eléctrico entre la pieza de trabajo y el electrodo. La energía producida genera un charco de soldadura, el cual está protegido por un gas inerte (comúnmente Argón) o una mezcla de gases

inertes Ar-He. El proceso GMAW alcanza diferentes modos de transferencia como cortocircuito, globular, spray y pulsado siendo este último el modo de transferencia más utilizado para la soldadura en aluminio. Dicho lo anterior, el proceso GMAW es el más utilizado debido a lo económico y práctico para unir todos los metales y aleaciones comerciales; cuya aplicación primaria fue orientada en la soldabilidad del aluminio. La unión de los materiales se logra por el calor de entrada (3.1) generada por los parámetros de voltaje, corriente y velocidad de avance.

$$HI = \eta \times \left(\frac{IXEX60}{vx1000} \right) \quad (3.1)$$

Donde HI es el calor de entrada (J/mm) I es la intensidad de corriente (*Amps*), E es el voltaje (V) y v es la velocidad de soldadura (mm/min) y la η que es la eficiencia del proceso [4] [34].

Las variables mencionadas anteriormente son necesarias para generar la energía capaz de fundir el electrodo y formar el cordón de soldadura en el proceso GMAW. La soldadura final tendrá una geometría la cual está constituida por tres distancias que incluyen el ancho, la altura y la penetración. Estas distancias afectan en las propiedades mecánicas y finalmente a la calidad de la unión soldada [32] [35] [36].

3.3 Clasificación de los procesos de soldadura

La clasificación de los procesos de soldadura se basa de acuerdo a la interferencia humana/máquina para realizar la soldadura, cuya clasificación son las siguientes [37]:

Proceso Manual. Es la operación que requiere de la manipulación de la antorcha, la pistola o el porta-electrodos para generar un cordón de soldadura, el cual es sostenido y manipulado por el operador soldador [37].

Proceso semiautomatizado. Es la operación que requiere de la manipulación manual de la antorcha o porta-electrodo, donde el operador soldador generará un cordón de soldadura utilizando un equipo que controla una o más variables del proceso [37].

Proceso robotizado. Es la operación que requiere de la programación de una ruta de seguimiento a lo largo de la elaboración de la soldadura, utilizando parámetros controlados sin intervención manual del operador soldador cuyo papel principal será el de observar y verificar que ocurra el seguimiento una vez iniciado el ciclo de trabajo [37].

Como se mencionó anteriormente, el proceso robotizado requiere de la programación para mantener una ruta de seguimiento y generar la soldadura. Debido a esto, el proceso robotizado tiene ventaja con respecto a los demás procesos debido que existe la repetibilidad. La repetibilidad aumentará la producción de cordones de soldadura sin necesidad de realizar paros constantemente [38].

Por mencionar un ejemplo, el proceso de soldadura robotizado GMAW está integrado a un robot KUKA KR16-2 (Figura 3. 2) en donde se mencionarán a continuación sus generalidades. El robot KUKA KR16-2 cuenta con 6 grados de libertad, una capacidad de soportar una carga nominal de 16 *kg* y posee una vida útil de alrededor de 10 a 15 años dependiendo de su uso constante. Este tipo de proceso de soldadura robotizado es utilizado para soldar aluminio y sus aleaciones.



Figura 3. 2 Robot soldador disponible en la celda de manufactura en COMIMSA.

3.4 Aluminio y sus aleaciones

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y además es el metal no ferroso con mayor consumo en el mundo. Esto es debido a las propiedades únicas que posee el material como ligereza y alta resistencia a la corrosión en ambientes corrosivo debido a la capa de óxido de aluminio que está presente (Al_2O_3) [39] [40] [41].

Las aleaciones de aluminio no están exentas de esta resistencia a la corrosión, ya que también se forma una capa protectora de óxido. Esa protección aparece sobre la superficie del aluminio después de ser expuesta a la atmósfera o al medio ambiente [39] [40] [41].

Las propiedades únicas del aluminio lo convierten en un material ideal para diversas aplicaciones como la fabricación de automóviles, camiones y en el enlatado para alimentos y bebidas, por mencionar algunos. El aluminio puro posee además una baja resistencia a la tensión, por lo que es inadecuado utilizar este material en aplicaciones que exigen tener una cierta resistencia a la tensión. Para mejorar esta

propiedad se adicionan otros elementos aleantes que aumentarán la resistencia a la tensión. Las propiedades de las aleaciones de aluminio dependen de su composición química, las cuales estas a su vez afectarán en su microestructura durante la solidificación, los tratamientos térmicos o en la deformación del material [39] [40].

El punto de fusión del óxido de aluminio (Al_2O_3) es de $2,072\text{ }^{\circ}C$, por lo que es importante eliminar la película de alúmina antes de realizar la soldadura con la finalidad de obtener soldaduras con calidad pertinente. La conductividad térmica del aluminio es rápida, por lo que el calor aportado necesita ser más intensa debido a la disipación rápida del calor en el aluminio. El aluminio cuenta con una estructura cristalina FCC (Face Centered Cubic, por sus siglas en inglés) la cual no cambia durante el calentamiento o el enfriamiento [36].

Como se mencionó anteriormente, la resistencia y otras propiedades de las aleaciones de aluminio dependen de los elementos aleantes que lo conforman. Por lo que, se desarrollaron distintas nomenclaturas para la identificación de las aleaciones de aluminio. Las nomenclaturas están divididas por fundición o por forja. El sistema de designación más aceptado es la Asociación de Aluminio en los Estados Unidos, aunque diferentes países han desarrollado su propia nomenclatura [40] [41].

Para las aleaciones por forja, se utiliza un sistema de cuatro dígitos para su clasificación con el elemento aleante mayoritario después del aluminio (como se observa en la Tabla 3. 1). En las aleaciones por fundición, se utiliza un sistema de cuatro dígitos en donde el último dígito indica la forma del producto. Si el último dígito es "0" indica que es un producto terminado y si el último dígito es "1" indica que es un lingote (como se observa en la Tabla 3. 2) [40].

Tabla 3. 1 Sistema de designación y nomenclatura para aleaciones de aluminio forjadas de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos [40].

Designación	Elemento aleante principal después del aluminio
1xxx	99 % puro
2xxx	Aleaciones de aluminio que contienen cobre.
3xxx	Aleaciones de aluminio que contienen manganeso.
4xxx	Aleaciones de aluminio que contienen silicio.
5xxx	Aleaciones de aluminio que contienen magnesio.
6xxx	Aleaciones de aluminio que contienen magnesio y silicio.
7xxx	Aleaciones de aluminio que contienen zinc.
8xxx	Aleaciones de aluminio que contienen estaño.
9xxx	Actualmente sin uso.

Tabla 3. 2 Sistema de designación y nomenclatura para aleaciones de aluminio para fundición de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos [40].

Designación	Elemento aleante principal después del aluminio
1xx.x	99 % puro
2xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen cobre.
3xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen manganeso.
4xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen silicio.
5xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen magnesio.
6xx.x	Actualmente sin uso.
7xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen zinc.
8xx.x	Aleaciones de aluminio que contienen estaño.
9xx.x	Actualmente sin uso.

3.4.1 Aleación 5052-H32

Como se mencionó anteriormente, la resistencia y otras propiedades de las aleaciones de aluminio forjadas o fundidas dependen de su composición química. Sin embargo, también se pueden obtener distintas variaciones mediante el revenido. El revenido se refiere a la modificación de las propiedades mecánicas de un metal por medio de un tratamiento mecánico o térmico. Como resultado, el material aumentará su resistencia o propiedades más allá del efecto de agregar elementos aleantes [41].

Algunas aleaciones de aluminio pueden ser tratables térmicamente o no tratables térmicamente. En ambos casos pueden reforzarse mediante un endurecimiento por deformación también conocido como trabajo en frío. Las aleaciones que no son tratables térmicamente únicamente pueden reforzarse mediante trabajo frío. Las aleaciones de aluminio forjadas que no son tratables térmicamente son la serie 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx. Mientras que la serie 2xxx, 6xxx y 7xxx han sido identificados como aleaciones de aluminio tratables térmicamente [41].

La denominación de la aleación y del temple están separadas por un guion como es el caso de la aleación de aluminio 5052-H32. La aleación de aluminio 5052-H32 tiene como aplicación la elaboración de cascos de barcos, alambre de soldadura y recipientes o contenedores de almacenamiento. La designación básica del temple está representada por letras y la subdivisión pueden llevar uno o más números después de la letra. A continuación, se mencionarán algunas designaciones y subdivisiones básicas de temple [41].

- F Tal como se fabricó. Se emplea a productos que no ocupa ningún control en específico sobre los requisitos térmicos o al endurecimiento por deformación, ni especifica las restricciones de las propiedades mecánicas que se requiere.

- O recocido. Son para aquellos productos forjados destinados para obtener la menor resistencia al temple y a productos fundidos para mejorar la ductilidad.
- T Tratados térmicamente. Se emplea en productos que pueden ser tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación, para aumentar su resistencia.
- H Endurecido por deformación. Son todos aquellos productos que pueden ser tratados por endurecimiento por deformación, ya sea con o sin tratamientos térmicos intermedios, para producir algún incremento o reducción en la resistencia del material. Generalmente, la letra " H " siempre va acompañada de dos o más números.
- H1 Endurecido por deformación únicamente. Aquellos productos que solo fueron endurecidos por deformación, para alcanzar la resistencia deseada sin aplicar algún tratamiento térmico complementario.
- H2 Endurecido por deformación y parcialmente recocido. Aquellos productos que alcanzaron una cantidad mayor de resistencia por endurecido por deformación, para después reducir la resistencia obtenida a un nivel deseado mediante recocido parcial.
- H3 Endurecido por deformación y estabilizado. Aquellos productos que fueron endurecidos por deformación y cuyas propiedades mecánicas fueron estabilizadas durante un tratamiento térmico a baja temperatura, con el objetivo de reducir la resistencia mecánica y aumentando su ductilidad.

El segundo dígito después de la designación H1, H2 y H3 representa el grado final de dureza por endurecimiento por deformación. Tal grado de dureza se maneja a través de rangos como se observa en la Tabla 3. 3 [41].

Tabla 3. 3 Rangos de dureza del endurecimiento por deformación (H) [41].

Rango	Descripción de la dureza
2	$\frac{1}{4}$ dureza
4	$\frac{1}{2}$ dureza
6	$\frac{3}{4}$ dureza
8	Completamente duro
9	Extra duro

3.4.2 Efecto de los elementos aleantes

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de un material son determinados por su composición de elementos. La composición química de la aleación de aluminio 5052-H32 está expuesta en la Tabla 3. 4. A continuación, se mencionarán algunos efectos principales de los elementos aleantes que conforman a la aleación [40] [42].

Tabla 3. 4 Composición química de la aleación de aluminio 5052-H32.

Aleación	Fe	Cr	Si	Mn	Mg	Cu	Zn	Otros	Al
5052-H32	0.40	0.15-0.35	0.25	0.10	2.2-2.8	0.10	0.10	0.05	Rem.

- El hierro (Fe) es la impureza más habitual que se encuentra en el aluminio y es destinado en las aleaciones de cobre, níquel y aluminio para incrementar la resistencia a temperaturas elevadas.

- El cromo (Cr) es uno de los complementos más comunes en inmensidades de aleaciones de las ramas de aluminio-magnesio-zinc, aluminio-magnesio-silicio y aluminio-magnesio en cantidades que no sobrepasan el 0.35 por ciento. El cromo es un endurecedor y se presenta como una impureza menor en el aluminio, otorgándole al material resistividad eléctrica. El cromo es utilizado para prevenir el crecimiento del grano en aleaciones de aluminio-magnesio, por lo que es conocido también como un supresor del crecimiento del grano.
- El silicio (Si) proporciona una excelente fluidez en la fundición y reduce la tendencia en el agrietamiento en las aleaciones de cobre, magnesio y aluminio entre los rangos de 0.5 a 4.0 por ciento.
- El manganeso (Mn) es una impureza común en el aluminio, cuyo efecto es la de aumentar la dureza, la de retardar el crecimiento del grano y no tiene ningún efecto desfavorable sobre la resistencia a la corrosión.
- El magnesio (Mg) es el elemento principal de la aleación de la serie 5xxx. Proporciona alta resistencia a la corrosión, buena ductilidad y soldabilidad. El contenido de magnesio en las aleaciones forjadas actuales no supera el 5.5 por ciento, pero valores mayores a 7 por ciento vuelven al material tratable térmicamente.
- El cobre (Cu) tiene como efecto aumentar la resistencia a altas temperaturas y su dureza, un porcentaje mayor al 15 por ciento formará el compuesto intermetálico fragilizador Al_2Cu .
- El zinc (Zn) tiene como efecto aumentar la resistencia y además es un supresor de la temperatura.

3.5 Técnicas de soft computing

Soft computing es una variante de la inteligencia artificial que incluye diversas técnicas. Las técnicas podrán dar soluciones a problemas que manejan información incompleta, información con incertidumbres o información inexacta. En esta investigación se optará por la manipulación de algunas técnicas de soft computing para la predicción de los parámetros de soldadura y generar una geometría de cordón de soldadura con calidad pertinente. La calidad pertinente será validada con la técnica seleccionada. Algunas de las herramientas que comprenden al soft computing son redes neuronales artificiales y lógica difusa de los cuales se explican a continuación [43].

3.5.1 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos desarrollados para emular al sistema nervioso del cerebro humano, cuya entidad de procesamiento es la neurona. La neurona artificial se asemeja al comportamiento de las neuronas biológicas, cuya característica principal es su capacidad de comunicación con otras neuronas [44]. La neurona biológica recibe señales a través de pulsos de las demás neuronas (conocido como sinapsis), por medio de sus dendritas y esa información es procesada por la masa de la célula (soma) a través del axón (quien transmite esa información). Las entradas de las neuronas son las señales que resultan de la sinapsis simplificada por un parámetro conocido como peso. Las señales pueden ser excitadoras (con peso positivo) o inhibitoras (con peso negativo). La ponderación de las señales tendrá efecto en la activación de la neurona. La neurona se activará cuando la suma es $\geq$ que el umbral, en caso contrario no se activará. A continuación, se mostrará en la Figura 3. 3 un ejemplo de una neurona biológica [43] [45] [46].

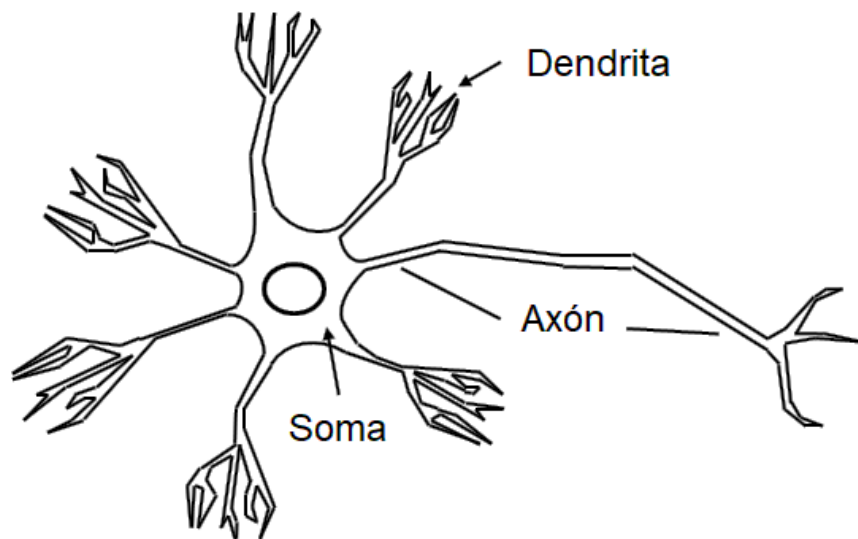


Figura 3. 3 Representación de una neurona biológica [43] [47].

Como se mencionó anteriormente, la neurona artificial tiene un comportamiento similar a una neurona biológica. Esto es debido a que la neurona artificial tiene la capacidad de comunicarse con otras neuronas. Las neuronas artificiales simples o sencillas fueron propuestas por McCulloch y Pitts en 1943, cuyo modelo binario contaba con un umbral en cada neurona y que al alcanzar un valor este se excitaría o se inhibiría [47]. Una red neuronal artificial posee ciertos elementos que lo caracteriza tales como una capa de entrada, capas ocultas, neuronas en las capas ocultas, neuronas de salida en la capa de salida, pesos sinápticos, funciones de activación, bias o sesgo y regla de aprendizaje [43] [45] [46].

En las capas ocultas de las redes neuronales es donde ocurre el procesamiento de la información. Este tiene como objetivo recibir las señales de entrada al igual que entradas externas como el bias o sesgo. La salida de las capas ocultas se propagará hacia las demás neuronas. La salida de las capas ocultas se conoce como la salida neta la cual puede ser calculada por (3.2) [43] [45] [46].

$$n = \sum_{i=1}^n w_{ki}^T x_i + b \quad (3.2)$$

Donde w_{ki}^T son los pesos sinápticos, x_i son las señales de entrada de la red neuronal y b es el bias o sesgo que puede o no estar incluido [43] [45] [46].

3.5.1.1 Funciones de activación

Las funciones de activación son las que deciden la salida total o neta de la neurona de salida, las cuales son seleccionadas por el programador. Las funciones de activación más utilizadas son presentadas a continuación.

- Función escalón normal y escalón simétrico. - Este tipo de función de activación clasificará las entradas en dos categorías diferentes. Este tipo de función de activación mantendrá la neurona activa cuando la suma de sus entradas sea mayor o igual al umbral de la neurona, en caso contrario se mantendrá inactiva como se evidencia en la Figura 3. 4 [43] [48].

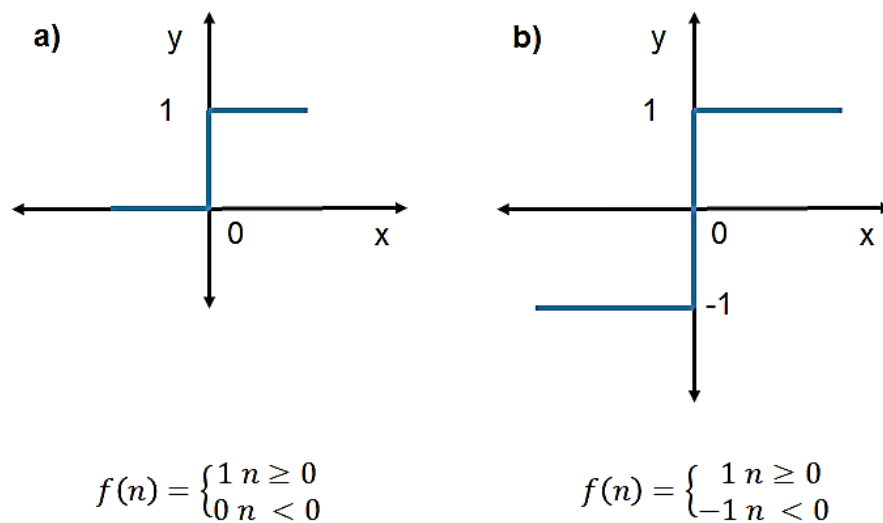
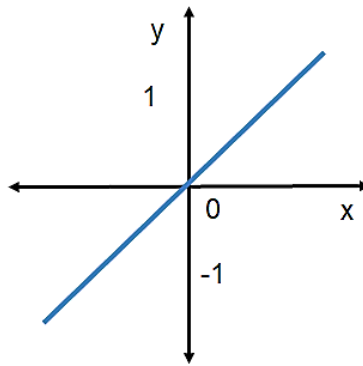


Figura 3. 4 Función de activación escalón, a) normal y b) simétrico [43] [48].

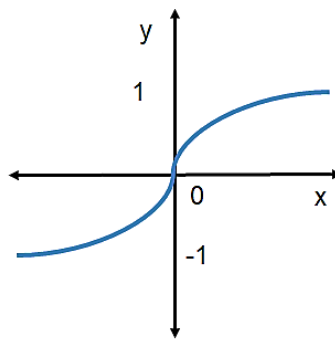
- Función de activación lineal. - La salida de este tipo de función de activación será igual a su entrada como se evidencia en la Figura 3. 5 [43] [48].



$$f(n) \{n = y$$

Figura 3. 5 Función de activación lineal [43] [48].

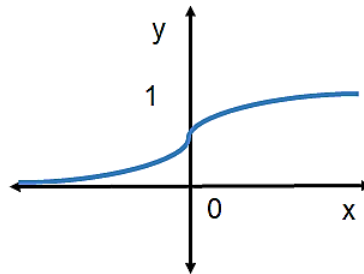
- Función de activación tangente hiperbólica. - Este tipo de función de activación es la más empleada en el entrenamiento supervisado, cuya función se evidencia en la Figura 3. 6 [43] [48].



$$f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$$

Figura 3. 6 Función de activación tangente hiperbólica [43] [48].

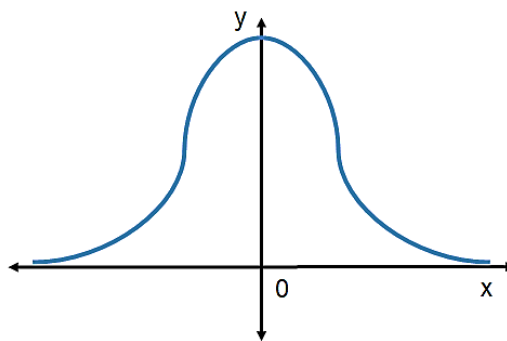
- Función de activación sigmoidal. - Este tipo de función de activación es comúnmente utilizado en redes multicapa que se entrenan usando el algoritmo de propagación hacia atrás como se evidencia en la Figura 3. 7 [43] [48].



$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$$

Figura 3. 7 Función de activación sigmoidal [43] [48].

- Función de activación gaussiana. - Este tipo de función de activación se utiliza generalmente en las capas ocultas de las RBF (Radial Base Function, por sus siglas en inglés) como se puede evidenciar en la Figura 3. 8 [43] [48].



$$f(n) = \exp - \left(\frac{(n - \mu)^2}{2\sigma^2} \right)$$

Figura 3. 8 Función de activación gaussiana [43] [48].

Las redes neuronales artificiales cuentan con dos mecanismos de aprendizaje, los cuales son el aprendizaje supervisado y el no supervisado. El aprendizaje supervisado consiste en realizar un entrenamiento vigilado o controlado para calcular la respuesta deseada a partir de datos de entrada. En caso de que la respuesta deseada no corresponda con la calculada, se sugerirá en alterar o reformar los pesos de la red con el objetivo de obtener salidas aproximadas a las deseadas. Caso contrario es el aprendizaje no supervisado. Este tipo de aprendizaje no necesita de un entrenamiento anterior para adecuar los pesos de las neuronas. Debido a la ausencia del entrenamiento, la red no puede realizar una comparativa que demuestre si la salida producida es la correcta [43] [47] [48].

3.5.1.2 Tipos de redes neuronales artificiales

Actualmente, existen distintos tipos de redes neuronales artificiales los cuales son empleados para predecir, calcular, clasificar o estimar las salidas de interés. La red neuronal perceptrón fue ideado por el psicólogo Frank Rosenblatt en 1957. Este tipo de red perceptrón es conocido por contar con una capa o monocapa. Son los modelos más sencillos de las redes neuronales artificiales y es el fundamento de casi todos los conjuntos arquitecturas que se interconectan entre sí. La configuración inicial del perceptrón no puede diferenciar patrones de entrada muy complejos. Sin embargo, mediante la utilización de un proceso de aprendizaje podrá tener la disposición de distinguir los patrones de entrada con solución lineal. Su principal uso es la clasificación de conjuntos de datos que pueden ser separables linealmente. La arquitectura perceptrón se muestra en la Figura 3. 9. El perceptrón es una red de propagación hacia adelante (feedforward), el cual consiste en la ponderación de las señales de entrada y valores de pesos sinápticos y bias asignados de forma aleatoria. La ecuación de la sumatoria de las señales de entrada, pesos sinápticos y bias se muestra en la ecuación (3.3) [43] [46] [47] [48].

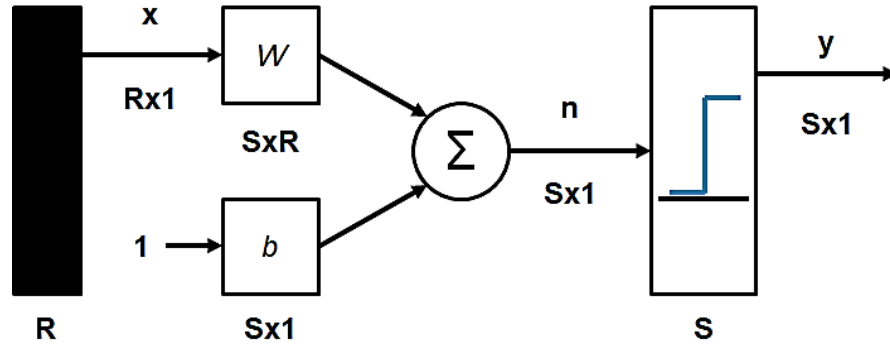


Figura 3. 9 Red clásica del perceptrón [43] [47] [48].

$$y = f(n) = f(W^T x + b) \quad (3.3)$$

La regla de aprendizaje del perceptrón resulta ser una serie de avances iterativos, los cuales se explicarán a continuación [43] [46] [47] [48]:

1. Se generan de forma aleatorizada los valores de pesos sinápticos $w_1, w_2, \dots, w_n$.
2. Se establecen las entradas/patrones $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ a la red junto con su salida deseada y_k .
3. Se calcula la salida real de la red (3.3).
4. Se determina el error (3.4), comprobando el valor deseado (y_k) y la salida real de la red y .

$$error = y_k - y \quad (3.4)$$

5. Los pesos sinápticos se actualizarán siempre y cuando el *error* calculado es $\neq 0$. La corrección se llevará acabo con la adición del peso anterior con el producto del valor del error calculado, la entrada/patrón utilizado y la tasa de aprendizaje (η) usualmente entre 0 y 1 como se muestra en (3.5).

$$w_i(nuevo) = w_i(anterior) + \eta * error * x_i \quad (3.5)$$

6. Si la salida de la red continúa presentando un error, se repetirán los pasos 4 y 5 hasta que los errores de las neuronas sean cero.

La siguiente red neuronal es la que tiene varias capas, también conocido como red multicapa. La red multicapa tendrá en cada capa su propia matriz de pesos w , su propio vector de bias b , su vector de entrada neta n y su vector de salida a . Para identificar las distintas capas se usará la notación del superíndice. El número de la capa estará representada en el superíndice como se muestra en la Figura 3. 10. Como se puede observar, las salidas de la primera capa serán las entradas de la segunda capa. Las salidas de la segunda capa serán las entradas de la tercera capa hasta llegar a la salida final de la arquitectura de la red neuronal multicapa. La salida de la red multicapa puede ser calculada por (3.6). La identificación de la estructura de la red multicapa será de la siguiente manera: $R - S^1 - S^2 - S^3$. En donde R será igual al número de datos de entrada, S^1 será el número de neuronas en la primera capa, S^2 será el número de neuronas de la segunda capa y S^3 será el número de neuronas de la tercera capa [48].

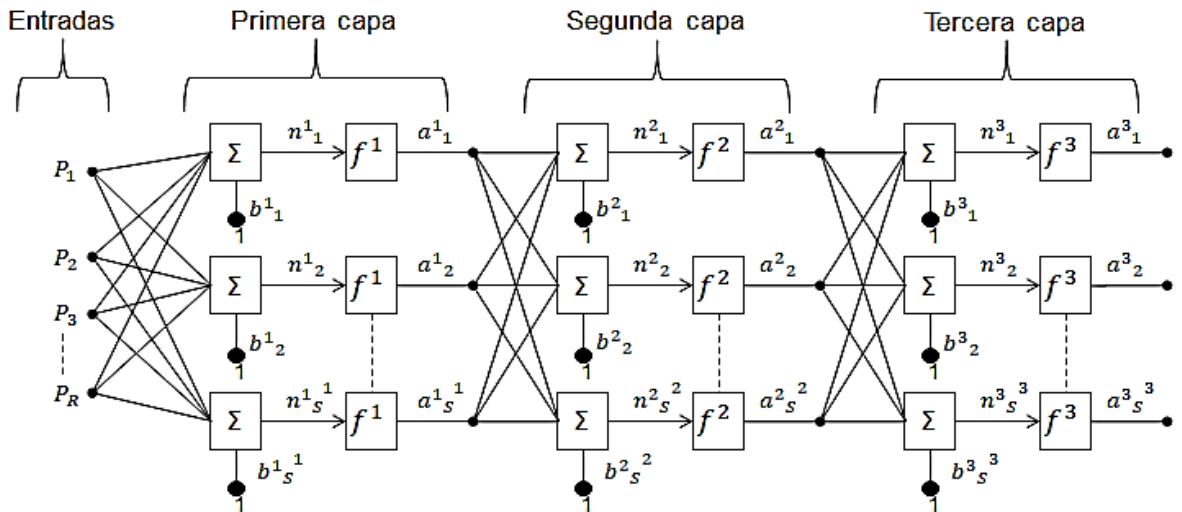


Figura 3. 10 Arquitectura de la red multicapa [48].

$$a^3 = f^3(w^3 f^2(w^2 f^1(w^1 p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (3.6)$$

La red multicapa posee un algoritmo conocido como backpropagation (backforward) y requiere de un entrenamiento supervisado el cual consta de 2 etapas. La etapa de entrenamiento y la etapa de validación. La etapa de entrenamiento ajustará los valores de los pesos en función del error generado, entre la salida deseada y la salida calculada. El error se propagará hacia atrás modificando los pesos las veces que sean necesarias hasta minimizar el error a un valor aceptable como se puede observar en la Figura 3. 11. La etapa de validación mantendrá los pesos ajustados de la etapa de entrenamiento durante la prueba. Este tipo de arquitectura es la más utilizada para la clasificación de patrones que no son separables linealmente [43] [47] [48].

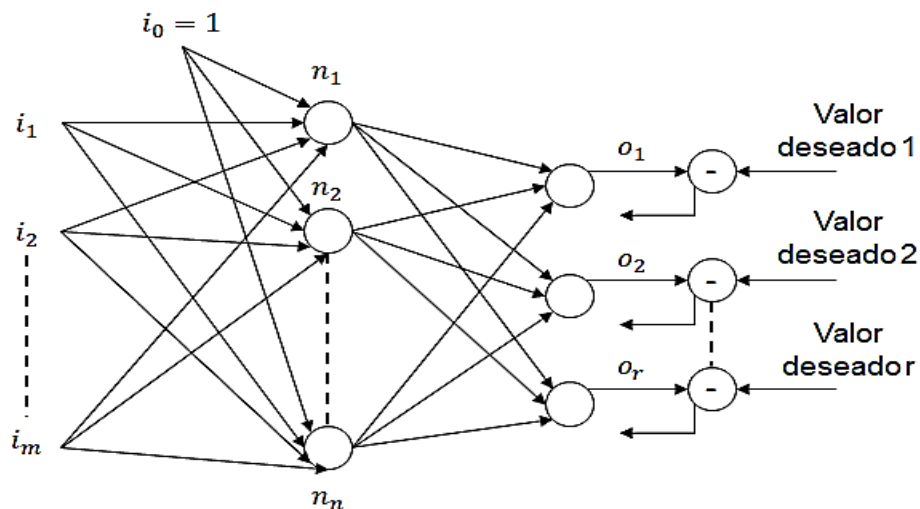


Figura 3. 11 Ejemplo de la arquitectura de red multicapa con propagación del error hacia atrás [48].

El entrenamiento del algoritmo Backpropagation para la red perceptrón multicapa, ejecuta una serie de pasos iterativos las cuales se explicarán a continuación [43] [47] [48]:

1. Los pesos de la red neuronal son inicializados aleatoriamente.
2. Se eligen funciones de activación para las neuronas.
3. Se calcula la salida de la red y se compara con el valor deseado calculando el error de la red.
4. Se actualizan los pesos de las capas anteriores propagando el error hacia atrás.
5. La etapa de entrenamiento concluirá cuando la estimación del error sea menor que el valor de ajuste mínimo proporcionado por el programador.
6. Cuando termina la etapa de entrenamiento se procederá a la etapa de validación utilizando los pesos actualizados

Otro tipo de RNA son las redes de función de base radial (RBF). La red RBF es una alternativa ante la red multicapa con algoritmo Backpropagation ya que realizan excelentes aproximaciones para problemas de ajuste de curvas. La RBF es un aproximador universal y puede usarse para la aproximación de funciones o el reconocimiento de patrones, evitando el problema de mínimos locales que se presentan en el entrenamiento de Backpropagation. Sin embargo, la RBF generalmente exhibe una respuesta lenta en la fase de entrenamiento. Esto es debido a la gran cantidad de neuronas asociadas en la segunda capa. Una de las ventajas de la red RBF es que los pesos lineales, asociados con la capa de salida, pueden tratarse por separado de las neuronas de la capa oculta. Como los pesos de las capas ocultas se ajustan mediante una optimización no lineal, los pesos de la capa de salida se ajustan mediante optimización lineal.

La precisión y la velocidad de aproximación de la red RBF pueden mejorarse al seleccionar los centros y anchos apropiados. La redistribución de los centros, a los lugares donde los datos de capacitación de entrada son significativos, puede conducir a un RBF más eficiente.

Por lo tanto, la contribución final de la neurona disminuirá para las entradas, que están lejos del centro de la neurona. La parte principal del entrenamiento de la red es ajustar los pesos de la capa de salida.

La red de base radial es una red de dos capas. Hay una distinción principal entre la red de función de base radial y una red de perceptrón de dos capas. En la primera capa de la red RBF, en lugar de ejecutar una operación de producto interno entre los pesos y la entrada de una multiplicación de matriz, se calculará la distancia entre el vector de entrada y las filas de la matriz de peso.

Además de las redes neuronales mencionadas anteriormente, existen otras redes más complejas y con combinaciones con otras técnicas tales como neuro difusos, máquinas de aprendizaje o aprendizaje profundo.

Existen determinadas aplicaciones de este tipo de Redes Neuronales Artificiales (RNA) los cuales son el reconocimiento de voz, el reconocimiento de firmas, el reconocimiento de huellas digitales, la inspección de calidad mediante sistemas visuales y la predicción de salidas de interés. A continuación, se mencionan en la Tabla 3. 5 algunas ventajas y desventajas de las RNA [43] [47] [48].

Tabla 3. 5 Ventajas y desventajas de las redes neuronales artificiales [43].

Ventajas	Desventajas
Las redes neuronales pueden simplificar algoritmos a través de una fase de aprendizaje.	Las RNA se deben entrenar para cada problema, pero el entrenamiento puede ser extenso y a la vez consumir varias horas de la computadora.
Da solución a problemas no lineales.	Es necesario realizar varias pruebas para determinar la arquitectura adecuada.
Las RNA son robustas, por lo que algunos elementos pueden fallar en el procesamiento de la información, pero no impide que la red continúe trabajando.	Debido a que las redes se entrenan en lugar de programarlas, éstas requieren de un gran número de datos.

3.5.2 Lógica difusa

La teoría de lógica difusa es una agrupación de principios matemáticos fundamentados en grados de membresía o pertenencia. La función principal de lógica difusa es modelar la información en base a reglas lingüísticas, las cuales son aproximadas a una función mediante la relación de entradas y salidas del sistema. Esta lógica expone rangos de membresía dentro de un intervalo entre cero y uno, mientras que la lógica convencional como la lógica booleana, presenta rangos que se limita en el cero o el uno [43] [47].

Mediante la utilización de lógica difusa se podrá interpretar la lógica humana. La lógica humana se basa en juicios con base a la experiencia para tomar decisiones, como por ejemplo al utilizar la variable de velocidad de soldadura en el proceso

GMAW. El operador afirmará que estará empleando una “rápida velocidad de soldadura” pero no se especifica cuanta velocidad [43] [47].

Debido a esto, el operador utiliza velocidades de soldadura con base a su criterio o experiencia y tales decisiones son en forma lingüística como “lento” o “rápido”. Este tipo de entradas no son utilizadas en un sistema convencional, mientras que en el sistema difuso si son utilizados. Por lo que, la utilización de lógica difusa tiene múltiples ventajas tales como [43] [47]:

- Modelar sistemas complejos y no lineales.
- Posee tolerancia al ruido para problemas que no requieren de soluciones precisas.
- Su modo de funcionamiento es similar a la lógica humana.
- No depende de ecuaciones matemáticas complejas.
- Es fácil de implementar.

3.5.2.1 Teoría de conjuntos difusos

La teoría de conjuntos clásicos o nítidos surge de la exigencia del ser humano de catalogar objetos. En la teoría de conjuntos clásicos, un conjunto se expresa como un conjunto claro y se puede describir por su función característica como se muestra en (3.7) [47].

$$\mu_c:U \rightarrow \{0,1\} \quad (3.7)$$

Donde U se denomina universo del discurso, es decir, una recopilación de elementos o datos que pueden ser continuos o discretos. En un conjunto nítido, cada elemento del universo del discurso pertenece al conjunto nítido ($\mu_c = 1$) o no pertenece al conjunto nítido ($\mu_c = 0$) [47].

3.5.2.2 Operaciones en la lógica convencional o conjuntos clásicos

Para un mejor entendimiento sobre las operaciones de conjuntos se tendrá el conjunto A y el conjunto B . Estos dos conjuntos se encuentran en el universo U y $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ son las funciones características del conjunto A y del conjunto B en el universo del discurso. La función característica $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ se muestra en (3.8) [47].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad y \quad \mu_B(x) = \begin{cases} 1, & x \in B \\ 0, & x \notin B \end{cases} \quad (3.8)$$

Las funciones características utilizan operadores como la unión, la intersección y el complemento. A continuación, se explicarán las funciones características con ayuda de los diagramas de Venn [47].

La unión $\cup$ representa a todos los elementos del universo que residen dentro del conjunto A , del conjunto B o entre los dos conjuntos. Es decir $C = A \cup B$ como se puede observar en la Figura 3. 12. En donde $\cup$ es el operador de la unión y cuya función característica μ_C se define en (3.9) [47].

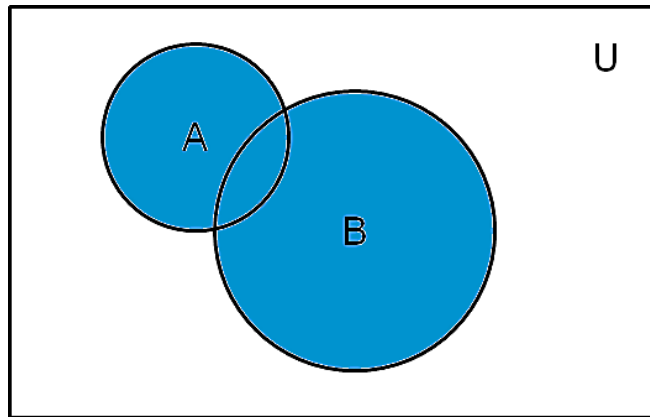


Figura 3. 12 Operador unión [43] [47].

$$\mu_C = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.9)$$

La intersección $\cap$ representa a todos los elementos de los conjuntos A y B que residen simultáneamente. Es decir $C = A \cap B$ como se puede observar en la Figura 3. 13. En donde $\cap$ es el operador de intersección y cuya función característica μ_C se define en (3.10) [47].

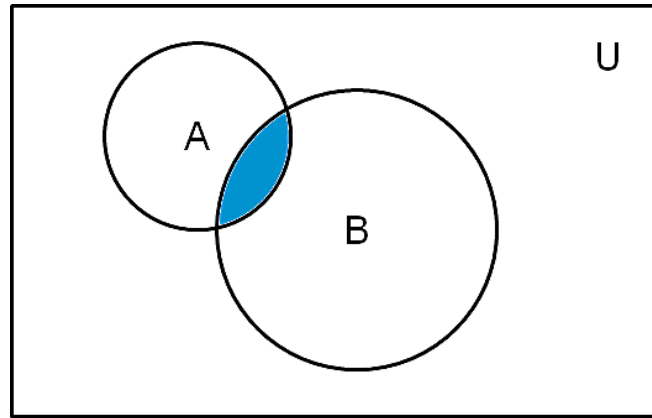


Figura 3. 13 Operador intersección [43] [47].

$$\mu_C = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.10)$$

El complemento del conjunto A se define como la selección de todos los elementos del universo que no cohabitan dentro del conjunto de A . El complemento del conjunto A es denotado como $\bar{A}$, cuyo diagrama de Venn se puede observar en la Figura 3. 14. La función característica $\mu_{\bar{A}}$ está definida en (3.11) [47].

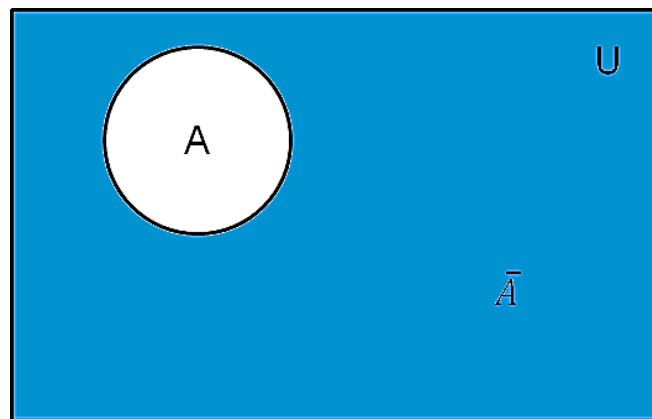


Figura 3. 14 Operador complemento [43] [47].

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad (3.11)$$

Como se mencionó anteriormente, los conjuntos nítidos tradicionales utilizan las operaciones lógicas como la unión, la intersección y el complemento para la clasificación de objetos limitados en valores de 0 y 1. Los conjuntos difusos también pueden aplicar las operaciones lógicas para clasificar objetos dentro de un intervalo entre 0 y 1. Las propiedades matemáticas como la conmutativa, la asociativa, la distributiva e identidad tienen influencia en los conjuntos clásicos. Algunas de estas propiedades se enlistan en el Anexo A [43] [47].

3.5.2.3 Conjuntos difusos

La definición de un conjunto difuso está dada por (3.12), el cual los elementos del universo del discurso pueden pertenecer al conjunto difuso con cualquier valor entre 0 y 1. El valor entre 0 y 1 es conocido como grado de membresía o de pertenencia [47].

$$\mu_F: U \rightarrow [0,1] \quad (3.12)$$

Si un elemento tiene un valor cercano a 1, el grado de membresía se considerará alto. La función característica de un conjunto difuso se denomina función de membresía, ya que proporciona el grado de membresía para cada elemento del universo del discurso [47].

Existen diferentes funciones de membresía para los conjuntos difusos tales como trapezoidal o PI (Figura 3. 15), saturación a la derecha (Figura 3. 16), saturación a la izquierda (Figura 3. 17), triangular (Figura 3. 18) y singleton (Figura 3. 19) por mencionar algunas funciones de membresía.

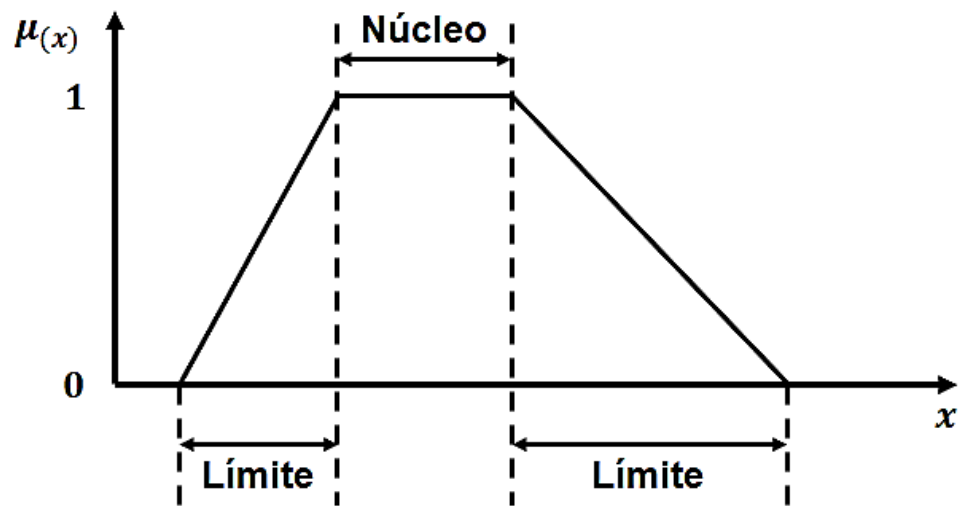
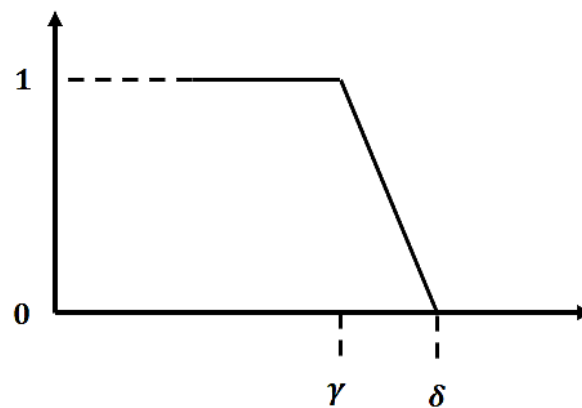


Figura 3. 15 Descripción de la función de membresía trapezoidal o PI [47].

La función PI es utilizada cuando se tiene un rango de valores óptimos la cual variará el ancho del núcleo. A partir de un cierto punto, la pendiente empezará a aumentar uniformemente hasta alcanzar el valor unitario, el cual se conservará hasta alcanzar un cierto punto que disminuirá la pendiente uniformemente [43] [47].



$$f(x) = \begin{cases} x \leq \gamma \rightarrow 1 \\ \gamma \leq x \leq \delta \rightarrow \frac{x - \delta}{\gamma - \delta} \\ x \geq \delta \rightarrow 0 \end{cases}$$

Figura 3. 16 Función saturación a la derecha [43] [47].

La función saturación a la derecha es utilizado cuando se inicia en valores unitarios y a partir de un cierto punto la pendiente disminuye constantemente hasta alcanzar el valor de 0 [43] [47].

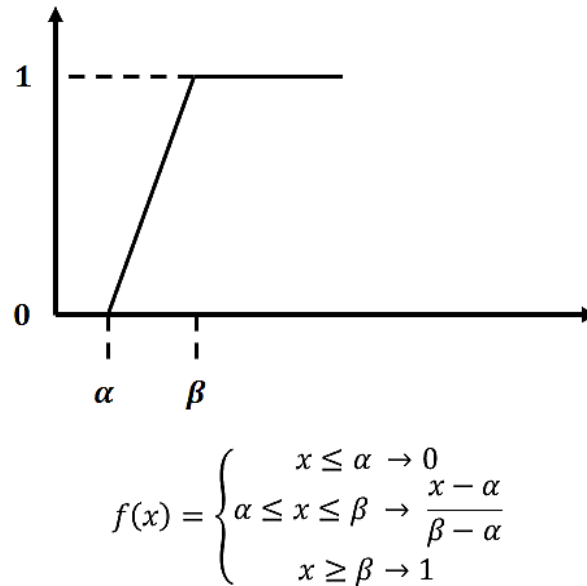


Figura 3. 17 Función saturación a la izquierda [43] [47].

La función de saturación a la izquierda es utilizada cuando se inicia en valores de 0 y a partir de cierto punto la pendiente aumentará constantemente hasta alcanzar el valor de 1 donde permanecerá constante [43] [47].

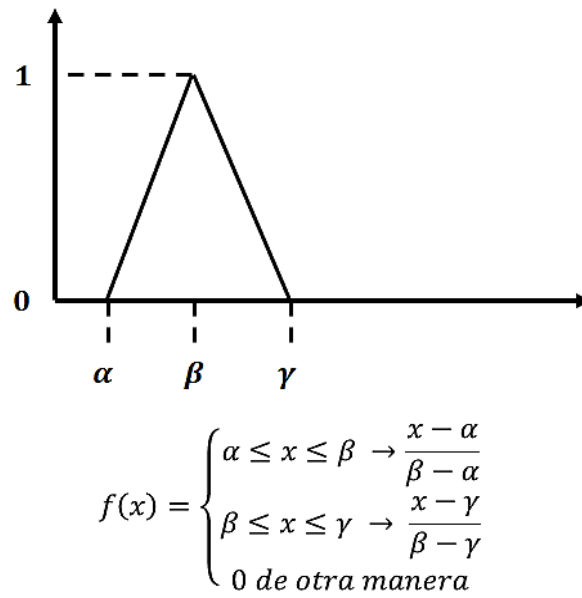


Figura 3. 18 Función triangular [43] [47].

La función triangular es utilizada cuando se tiene un valor óptimo. Esta función está conformada por dos pendientes, la pendiente positiva crece constantemente hasta alcanzar la unidad y al alcanzar la unidad disminuye la pendiente de manera uniforme [43] [47].

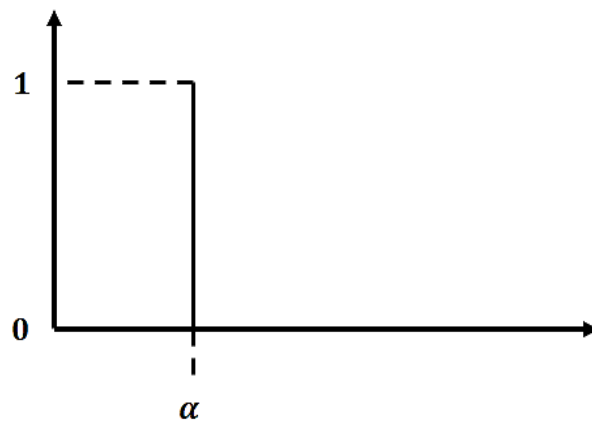


Figura 3. 19 Función Singleton [43] [47].

La función Singleton solo tendrá un valor único alfa que dará como resultado 1. Todos los demás valores únicos distintos de alfa tendrán un valor de 0 [43] [47].

A continuación, se presentarán las técnicas estadísticas que se seleccionaron para validar el comportamiento normal y la correlación de las variables del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado y robotizado.

3.6 Técnicas estadísticas

Actualmente existen varias definiciones de la estadística, de las cuales se mencionarán a continuación. De acuerdo al Webster's New Collegiate Dictionary define la estadística como una rama de las matemáticas que estudia el análisis, la recolección, interpretación y presentación de los datos numéricos. Por otro lado, Stuart y Ord (1991) definen a la estadística como una rama del método científico que estudia y analiza los datos poblacionales. Mientras que Rice (1995) considera que la estadística se encarga esencialmente de los procedimientos para analizar información aleatoria. Freund y Walpole (1987) comentan que la estadística es una disciplina de la ciencia que se encarga de realizar inferencias en datos observados y todo el problema de tomar decisiones frente a una incertidumbre [49].

Las definiciones anteriores de la estadística implican que se selecciona un subconjunto de datos de los datos de la experimentación. El objetivo de las técnicas estadísticas es realizar inferencias para estimar las variables dependientes, de los cuales están relacionadas con las variables independientes. Existen diferentes técnicas estadísticas para realizar inferencias sobre la normalidad o dependencia de los datos. Las técnicas estadísticas más utilizadas son las medidas de tendencia central, regresiones lineales simples o múltiples, en donde se realiza un análisis de regresión con estas técnicas.

3.6.1 Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central son ampliamente empleadas para realizar inferencias estadísticas. Son fáciles de calcular y permiten conocer el comportamiento normal de los datos con ecuaciones simples. La inferencia del comportamiento normal de los datos, con las medidas de tendencia central, se muestran en la Figura 3. 20 [50] [51].

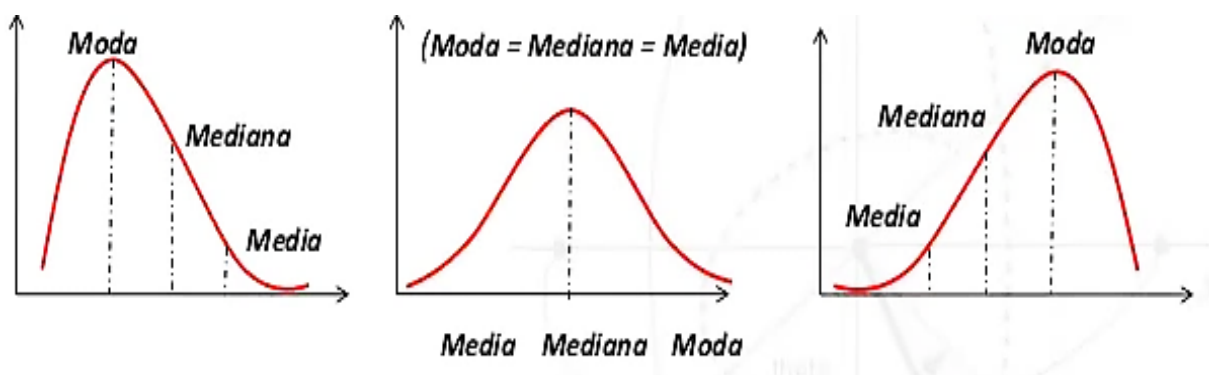


Figura 3. 20 Relación de las medidas de tendencia central.

Como se puede observar en la Figura 3. 20, las medidas de tendencia central pueden determinar el comportamiento normal de los datos con las siguientes relaciones:

- Si la $Moda < Mediana < Media$ se dice que no tiene un comportamiento normal y que su gráfica tiene una asimetría hacia la derecha.
- Si la $Moda = Mediana = Media$ se dice que tiene un comportamiento normal y que su gráfica es simétrica.
- Si la $Media > Mediana > Moda$ se dice que no tiene un comportamiento normal y que su gráfica tiene una asimetría hacia la izquierda.

3.6.2 Prueba de normalidad

Las pruebas de normalidad son conocidas como métodos que permiten determinar si los conjuntos de datos siguen una distribución en específico, en este caso una distribución normal de media cero y una varianza constante [50] [51]. El objetivo de realizar las pruebas de normalidad en esta investigación es determinar si los datos de voltaje, corriente, velocidad de soldadura, concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración que se emplean en el sistema triple difuso del proceso GMAW semiautomatizado siguen una distribución normal. Esto es debido a la incertidumbre que existe sobre si los datos del diseño de experimentos cumplen con la característica del comportamiento normal.

Para determinar la normalidad de los datos mencionados anteriormente existen varias pruebas de normalidad como Anderson-Darling, Ryan-Joiner y Kolmogorov-Smirnov. En esta investigación se propone utilizar la prueba de normalidad Anderson-Darling, con el programa Minitab, por ser la prueba más empleada para realizar el análisis de comportamiento normal de los datos.

Para rechazar o aceptar la hipótesis nula, se utiliza el coeficiente calculado de Anderson-Darling con el programa Minitab y se utilizará la siguiente relación:

- Si $AD = 0$, entonces los datos siguen una distribución normal y se rechaza la H_0 .
- Si $AD \neq 0$, entonces los datos no siguen una distribución normal y no se rechaza la H_0 .

3.6.3 Medidas de dependencia

El diagrama de dispersión es el método de apoyo más utilizado para analizar datos bivariados cuantitativos y visualizar si existe una relación de dependencia de un grupo de datos. Las ventajas de emplear un diagrama de dispersión son las siguientes:

es fácil de trazar, su interpretación es sencilla, los valores máximos y mínimos son fáciles de detectar y se puede observar si el conjunto de datos tiene un comportamiento lineal o no lineal [49] [51].

Dicho lo anterior, este método emplea datos cuantitativos para trazar el diagrama de dispersión. Sin embargo, el análisis e interpretación de la dependencia utilizando diagramas de dispersión es de manera cualitativa. En el análisis de los diagramas de dispersión de un conjunto de datos X con respecto a Y puede ser dependencia positiva, negativa o nula. De manera ilustrativa, se muestran los tres posibles diagramas de dispersión en la Figura 3. 21. En el inciso a) se puede observar una dependencia positiva, por lo que al incrementar el valor de X aumenta el valor de Y . En el inciso b) se puede apreciar una dependencia negativa, por lo que al incrementar el valor de X disminuye el valor de Y y en el inciso c) se tienen una dependencia nula, por lo que al incrementar X puede aumentar o disminuir el valor de Y .

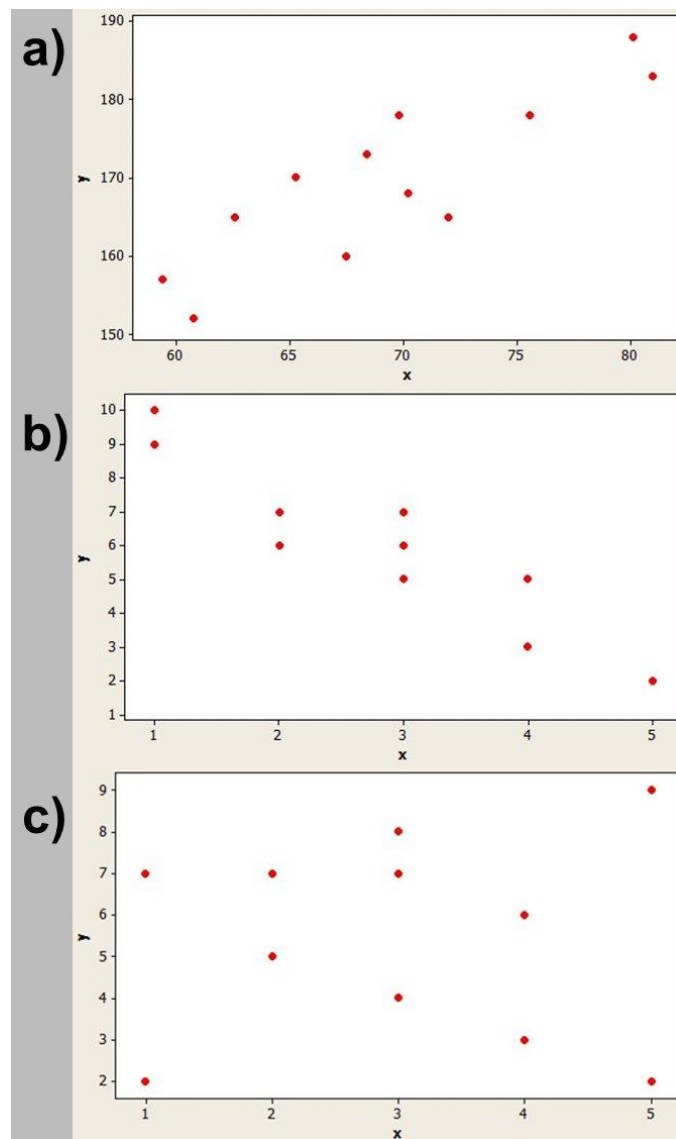


Figura 3. 21 Representación ilustrativa de diferentes gráficas de dispersión en donde: a) relación positiva, b) relación negativa y c) relación nula.

Sin embargo, realizar un análisis de dependencia de manera cualitativa en los diagramas de dispersión no indica el grado de dependencia que le corresponde. Por lo que, el análisis sobre el grado de dependencia es de manera intuitiva. Para determinar el grado de dependencia que les corresponde a los diagramas de dispersión se emplean dos medidas de dependencia: la covarianza y el coeficiente de correlación [49] [51].

La covarianza es una medida estadística de colaboración entre dos variables, cuyas variables varían en conjunto con sus medias respectivamente. La ecuación (3.13) se utilizó para calcular la covarianza (x, y) , la cual se muestra a continuación [49] [51].

$$Cov(x, y) = \frac{S_{xy}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (3.13)$$

En donde x_i es el coeficiente i -ésimo de la variable x , $\bar{x}$ es el valor promedio de la variable x , y_i es el coeficiente i -ésimo de la variable y , $\bar{y}$ es el valor promedio de la variable y y n es el número total de patrones.

El signo de la covarianza indica la relación o dependencia que tendrán las dos variables. Cuanto mayor sea el valor de la covarianza mayor será la dependencia. Dicho esto, se pueden obtener las siguientes relaciones dependiendo del valor de la covarianza, los cuales son [49] [51]:

- $Cov < 0$: indica una dependencia negativa, por lo que el valor de Y disminuye cuando X aumenta,
- $Cov > 0$: indica una dependencia positiva, por lo que el valor de Y aumenta cuando X aumenta y
- $Cov = 0$: indica que las variables Y con respecto a X no están correlacionadas y que no existe una dependencia.

Debido que la covarianza depende de la escala de medición, resulta inconveniente utilizar la covarianza como la única medida de dependencia y es complicado determinar si una covarianza es enorme o insignificante. Para solventar

este problema, se emplea la ecuación (3.14) el cual es la variación de la covarianza. En este caso, el coeficiente de correlación denotado como ρ tendrá una escala adimensional [49] [51].

$$\rho = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (3.14)$$

En donde $Cov(x, y)$ es la covarianza bivariada de la variable x con respecto a y , σ_1 es la desviación estándar de la variable x y σ_2 es la desviación estándar de la variable y .

De acuerdo con la literatura, el coeficiente de correlación ρ también se puede denotar como el estimador r y puede estimarse con la ecuación (3.15) tal como se muestra a continuación [49] [51].

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.15)$$

El signo del coeficiente de correlación es idéntico al signo de la covarianza y el coeficiente de correlación satisface la desigualdad $-1 \leq \rho \leq +1$ de las cuales se explican a continuación las relaciones de ρ [49] [51]:

- $\rho = +1$ indica una correlación positiva perfecta en una recta con pendiente positiva.
- $\rho > 0$: indica una dependencia positiva e implica un aumento de Y cuando X aumenta.
- $\rho = -1$ indica una correlación negativa perfecta en una recta con pendiente negativa.
- $\rho < 0$: indica una dependencia negativa e implica una disminución de Y cuando X aumenta.

- $\rho = 0$ indica una covarianza nula y que no existe una correlación lineal.

Se llega a la deducción que, la magnitud de ρ cercana a $+1$ o -1 implican una buena correlación o asociación lineal positiva o negativa entre x y y , mientras que las magnitudes cercanas a cero indican poca o ninguna correlación.

3.6.4 Análisis de regresión

Como se ha comentado en el estado del arte, los parámetros de los procesos de soldadura son conocidos como aquellas variables que determinan la calidad de las soldaduras. La calidad de la soldadura puede ser determinada por sus propiedades mecánicas, su microestructura o su geometría. Generalmente, al realizar las soldaduras se requiere de efectuar previamente varias pruebas preliminares. Las pruebas preliminares son necesarias para obtener los valores adecuados de los parámetros del proceso a utilizar y lograr una unión con calidad aceptable de acuerdo al código que se esté empleando. Sin embargo, los valores obtenidos resultan ser variables difíciles de medir por lo que las variables no son exactas.

En la práctica, existen problemas que implican uno o varios conjuntos de variables que tienen alguna relación inherente entre sí. Por ejemplo, en el proceso de soldadura GMAW es conocido que corriente, velocidad de soldadura y voltaje tienen una relación con la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz o la penetración [49] [50] [51] [52] [53].

Dicho todo lo anterior, el concepto de análisis de regresión pretende encontrar la mejor relación entre la variable dependiente “Y” y una o varias variables independientes “X”. Por lo que en esta investigación se propone emplear ecuaciones lineales que relacionan la variable “Y” con una o varias variables “X”. Una de las

ecuaciones lineales que puede aproximar la variable dependiente es el modelo de regresión lineal simple y está dada por la ecuación (3.16) [49] [50] [51] [52].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3.16)$$

En donde Y es el valor dependiente, β_0 y β_1 son los coeficientes de regresión desconocidos de la intersección y la pendiente respectivamente, x es el valor independiente y ε es un error aleatorio. En la práctica, el error aleatorio nunca se observa y se menciona que la ecuación de regresión lineal es únicamente hipotética. Es decir que la recta de regresión verdadera nunca se puede trazar [49] [50] [51] [52].

Como se mencionó anteriormente, la recta de regresión lineal simple verdadera o hipotética no se puede trazar, pero se puede obtener un modelo que pueda trazar una recta aproximada a la hipotética con la capacidad de pronosticar la salida dependiente de interés. Tal modelo es conocido como regresión lineal simple ajustada y consiste en calcular los coeficientes de regresión ajustados desconocidos. Es decir que se calcularán los coeficientes de regresión b_0 para β_0 y b_1 para β_1 por lo que la recta de regresión ajustada estará dada por la ecuación (3.17) [49] [50] [51] [52].

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x + e \quad (3.17)$$

Donde $\hat{y}$ es el valor pronosticado o ajustado de la recta de regresión lineal simple hipotética, ya que se espera que la recta ajustada se encuentre más cercano a la recta verdadera y e es un error residual. Los coeficientes de regresión ajustados b_0 y b_1 son calculados con las ecuaciones (3.18) y (3.19), en donde n es el número total de datos, x_i es la variable independiente y y_i es la variable dependiente [49] [50] [51] [52].

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.18)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.19)$$

En los casos en que una sola variable independiente no puede aproximar adecuadamente la variable dependiente, se requiere de involucrar más de una variable independiente en el análisis de regresión. Cuando se involucran más de una variable independiente el modelo se le conoce como regresión lineal múltiple denotado con la ecuación (3.20) [49] [50] [51] [52].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon_i \quad (3.20)$$

En donde y es la salida dependiente, x_k es el número de variables independientes que se van a utilizar de 0 hasta k , β_k son los coeficientes de regresión de 0 hasta k y ϵ es el error aleatorio en donde se infiere que tiene un valor de cero. Como en el caso del modelo de regresión lineal simple, la ecuación (3.17) es únicamente conceptual por lo que se utiliza la ecuación de regresión lineal múltiple estimada (3.21) para aproximar la variable dependiente [49] [50] [51] [52].

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k + e_i \quad (3.21)$$

En donde $\hat{y}$ es la salida estimada dependiente, b_k son los coeficientes de regresión estimados relacionados con β_k , x_k son el número de variables independientes y e_i es el error residual. De la misma manera que en la regresión lineal simple, la complejidad de este método radica en calcular los coeficientes de regresión estimados. Para el análisis de regresión lineal múltiple, la ecuación (3.21) puede ser interpretado con la ecuación (3.22) [49] [50] [51] [52].

$$y = xb + e \quad (3.22)$$

La interpretación de la ecuación (3.19) puede representar n ecuaciones de y_i en función del número de total de las variables x y puede resolverse con el método matricial. Por lo que la notación de matrices para la variable dependiente, la variable independiente, el coeficiente regresor y el error residual pueden ser interpretados con la ecuación (3.23) [49] [50] [51] [52].

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ & & \vdots & & \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}, e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Al obtener la notación matricial de la ecuación (3.23), se procede a calcular los coeficientes b con las operaciones matriciales correspondientes con la ecuación (3.24).

$$b = (X'X)^{-1}X'Y \quad (3.24)$$

En donde X es la matriz x , Y es la matriz y , X' es la matriz transpuesta de la matriz x , $(X'X)^{-1}$ es la matriz inversa del producto de la matriz x con la matriz transpuesta de x y $X'Y$ es la matriz del producto de la matriz transpuesta x con la matriz y [49] [50] [51] [52].

En esta investigación se propuso el uso del análisis de regresión lineal simple y múltiple para generar diferentes modelos matemáticos. El objetivo del análisis de regresión fue observar las aproximaciones de las salidas de interés en esta investigación. De acuerdo al error calculado, se realizó la inferencia sobre la factibilidad de los métodos de regresión lineal simple o múltiple para determinar los parámetros del proceso de soldadura GMAW-semiautomatizado y robotizado.

3.7 Transferencia de calor

Como se ha comentado anteriormente, el aluminio es un material metálico ligero con un peso específico de $2,70 \text{ g/cm}^3$, el cual es un tercio aproximado del peso específico del acero ($7,87 \text{ g/cm}^3$). Además, se genera de manera natural una capa de óxido conocido como alúmina convirtiéndolo en un material muy resistente a la corrosión. Debido a las características del aluminio, este material se define como un excelente conductor del calor, conductor de electricidad, es un material dúctil y no es tóxico. Por lo que, este material es usado habitualmente para la fabricación de recipientes para alimentos y bebidas. Asimismo, es un buen reflector tanto de luz como del calor [54] [55].

Es conocido que los procesos de soldadura, en específico el proceso GMAW, requiere de un flujo de energía térmica para fundir el metal de aporte y generar un charco de soldadura en el metal base. El recorrido de la antorcha de soldadura inicia de un punto *A* hasta un punto *B* para formar un cordón de soldadura. Es decir que, para poder generar un cordón de soldadura se requiere de la transmisión de calor, el cual es un flujo de energía térmica asociado con un diferencial de temperatura. Esta afirmación es respaldada por los trabajos de German León Lara y de Willder Gustavo Mojica Bustos [29] [56]. German León Lara y de Willder Gustavo Mojica Bustos mencionan que, existirá la transferencia de energía cuando exista un gradiente de temperatura. Existen tres casos particulares en donde el gradiente de temperatura es presentado los cuales son entre dos cuerpos en contacto, a través de un fluido o a través de la emanación/propagación de ondas existe. La transferencia de energía en este caso es el calor, por lo que el metal fundido es regido por la conducción, la convección y la radiación los cuales son los tres fenómenos básicos de la transmisión de calor.

La conducción es el movimiento de los átomos excitados por la energía térmica, el cual tiene una relación con la temperatura; a mayor temperatura mayor movimiento de los átomos. Dicho esto, la transferencia de calor existe entre dos cuerpos en contacto o cuando el calor viaja de un punto a otro en un mismo cuerpo y esto se le conoce como conductividad térmica. En el caso de los metales como por ejemplo el aluminio o el acero, poseen una alta conductividad térmica por lo que son materiales que pueden conducir eficazmente el calor, transfiriendo la energía más rápido de un punto caliente a un punto frío [29] [57].

La convección es el segundo tipo de transferencia de calor el cual interviene un fluido, ya sea un líquido o gaseoso. El fluido transportará la energía térmica de un punto caliente a un punto frío. El fluido extrae el calor de la zona de mayor temperatura, cambiando su densidad y desplazándose a una zona de menor temperatura para transmitir el calor [29] [57].

La radiación es el tercer tipo de transferencia térmica y se le atribuye a la emanación y propagación rectilínea de un flujo de partículas u ondas, en este caso ondas electromagnéticas. Este tipo de transferencia de calor ocurre cuando no existe contacto entre los materiales u objetos. En el caso de los metales existe una característica particular conocida como reflectante, el cual las ondas son reflejadas debido a la superficie de los metales como por ejemplo el aluminio y sus aleaciones [29] [57].

Actualmente existe una ecuación para determinar cuál de los dos tipos de transferencia de calor es el que predomina en la soldadura, conocido como número Péclet dado por la ecuación (3.25). Si el valor adimensional es superior a 1 entonces la transferencia de calor dominante será la convección y si el valor adimensional es menor a 1 entonces la transferencia de calor que domina en la soldadura será la conducción.

$$Pe = \frac{upC_pL}{k} \quad (3.25)$$

En donde Pe es el número Péclet, u es la velocidad en cm/s , p es la densidad en g/cm^3 , C_p es el calor específico a presión constante en $cal/(g^\circ C)$, L es la longitud en cm y k es la conductividad térmica en $cal/(cm^\circ Cs)$.

Sin embargo, la ecuación Péclet solo puede determinar dos tipos de transferencia de calor. Por lo que, no existe una ecuación que pueda determinar el tipo de transferencia de calor que existen en la soldadura sabiendo que, en la realidad la conducción, convección y radiación están presentes en la soldadura [56].

Por consiguiente, existe otro tipo de ecuación empleado en numerosas investigaciones en el área de la soldadura conocida como la ecuación de Rosenthal. La ecuación de Rosenthal es usada generalmente para predecir la dimensión junto con las formas de la región de fusión y la región afectada por el calor. Para poder aplicar la ecuación, Rosenthal planteó seis suposiciones para dar soluciones analíticas a sus dos ecuaciones, tales suposiciones son:

1. La dirección del calor se encuentra en estado estacionario,
2. La fuente de calor es preciso,
3. El calor de fusión es despreciable,
4. Sus propiedades térmicas son constantes,
5. No existe perdidas de calor de la superficie del metal base y
6. No existe convección en el charco de soldadura.

Por lo que, al depositar el metal fundido sobre una placa el flujo de calor solo dependerá del espesor del metal base [28] [58].

Como se mencionó anteriormente, el flujo de calor dependerá del espesor del metal base y se puede utilizar una de las dos ecuaciones de Rosenthal. Por lo que.

para espesores finos se utilizará la ecuación (3.26) y para espesores gruesos la ecuación (3.27) [28] [30].

$$\frac{2\pi(T - T_0)\lambda S}{Q} = \exp\left(\frac{vx}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (3.26)$$

$$\frac{2\pi(T - T_0)\lambda S}{Q} = \exp\left(\frac{-v(R - x)}{2\alpha}\right) \quad (3.27)$$

Donde T es la temperatura en un punto determinado en $^{\circ}\text{C}$, T_0 es la temperatura inicial de la placa en $^{\circ}\text{C}$, λ es la conductividad térmica del material en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, S es el grosor de la placa en m , Q es el calor entregado a la placa a partir de la fuente de calor en W , v es el avance de la soldadura en ms^{-1} , “ x ” es la distancia entre la fuente de calor puntual y el punto en el que se determina la temperatura a lo largo del eje x en m , K_0 es la función modificada de Bessel de segundo género y orden cero (adimensional), α es la difusividad térmica del material en m^2s^{-1} y puede calcularse con $\alpha = \lambda/\rho c$, r es la distancia radial a partir del origen en m . La distancia radial r puede calcularse con $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ siendo “ y ” la coordenada en el eje y y R es la distancia radial a partir del origen en m . La distancia radial R puede calcularse con $R = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$ [28] [30].

Varios investigadores emplean la ecuación (3.28) para calcular el espesor relativo. El espesor relativo es usado para identificar cuál de las dos ecuaciones de Rosenthal es el adecuado. Si el resultado adimensional es < 0.6 , entonces se usa la ecuación para placas finas. Si el resultado adimensional es > 0.9 , entonces se usa la ecuación para placas gruesas. Si el resultado adimensional se encuentra entre el intervalo 0.6 y 0.9, se recomienda aproximar el resultado con alguno de los extremos del intervalo para seleccionar cual ecuación utilizar [30].

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}} \quad (3.28)$$

Donde τ es el espesor relativo adimensional, d es el espesor del metal base en mm , C es el calor específico del material W/mm^3 , ρ es la densidad del material kg/mm^3 , T_0 es la temperatura de referencia en $^{\circ}C$, T_c es el grupo compuesto de temperaturas que van desde la temperatura de fusión del material base en $^{\circ}C$ y H_{net} es la potencia de entrada del proceso de soldadura dividido por la velocidad de avance y está dado como W/mm .

En resumen, las ecuaciones de Rosenthal pueden predecir la dimensión, la forma de la franja de fusión y la franja afectada por el calor siempre y cuando se cumplan con las seis suposiciones de Rosenthal. Se infiere que al no cumplir una de las seis suposiciones de Rosenthal, tales ecuaciones no son las más indicadas para poder predecir la dimensión, la forma de las zonas de fusión y la zona afectada por el calor. Además, existe la incertidumbre sobre el cálculo del espesor relativo para clasificar las placas en las categorías de fina o gruesa. Esto es debido que en la práctica y de acuerdo a los expertos dedicados en la soldadura, se considera una placa con un espesor fino (conocido como lámina) aquellas cuyo espesor es menor que las otras dimensiones. Otra manera de identificar si las placas son de un espesor fino o grueso es con ayuda de los códigos estructurales AWS. Los códigos estructurales AWS mencionan que, las placas de aluminio con un espesor menor a 5 mm son consideradas como placas con espesor fino [59] [60].

El objetivo de mencionar las ecuaciones anteriores, era demostrar que existen modelos matemáticos capaces de predecir uno de dos tipos de transferencia de calor que predomina en la soldadura, predecir la dimensión junto con las formas de la zona de fusión y la zona afectada por el calor y predecir el espesor de las placas a investigar.

Las ecuaciones anteriores pueden ser aplicadas asumiendo que los procesos de soldadura cumplen con los supuestos de Rosenthal o los supuestos de normalidad.

En la actualidad no existe una ecuación matemática que pueda predecir la calidad a través de la geometría del cordón de soldadura en el aluminio y sus aleaciones, en específico la aleación de aluminio 5052-H32. Por lo tanto, en esta investigación se propuso emplear lógica difusa para desarrollar un sistema triple difuso capaz de aproximar la calidad de la geometría del cordón de soldadura. Esto es debido a que esta técnica puede utilizar parámetros con variabilidad inherente, con incertidumbres, con ruido, cuyos parámetros puedan o no tener correlación, que cumplan o no con los supuestos de normalidad y en este caso con los supuestos de Rosenthal.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la metodología desarrollada para esta investigación, con el propósito de alcanzar los resultados esperados en la hipótesis y objetivos definidos. La Figura 4. 1 muestra el esquema de la metodología.

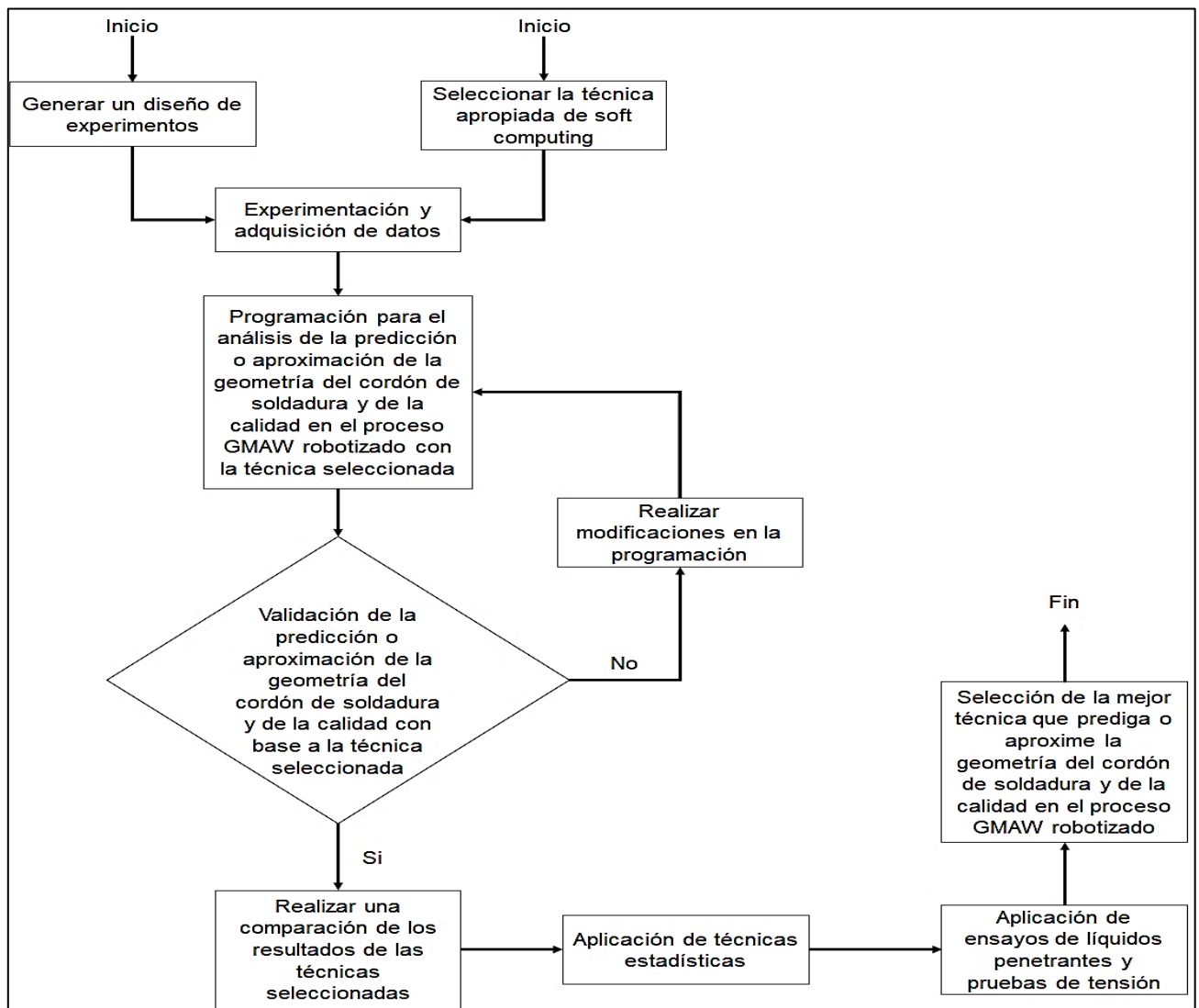


Figura 4. 1 Metodología.

La metodología en esta investigación tendrá dos fases iniciales en paralelo. La primera fase inicial fue generar el diseño de experimentos para el proceso GMAW semiautomatizado y robotizado. La segunda fase inicial fue la selección de las técnicas de soft computing a emplear en base a la literatura y al estado del arte. A continuación, se explicará cada parte de la metodología.

Generar un diseño de experimentos. – En esta sección, se realizó un estudio sobre cuales parámetros de entrada son los más relevantes para generar un cordón de soldadura en aleaciones de aluminio. Se realizó un diseño de experimentos para el proceso GMAW semiautomatizado y GMAW robotizado. Las variables de entrada más relevantes para el proceso GMAW semiautomatizado fueron voltaje, corriente y velocidad. Mientras que, las variables de entrada más importantes en el proceso GMAW robotizado fueron voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out, abertura de raíz.

Seleccionar la técnica apropiada de soft computing. – En esta sección, se realizó un estudio del estado del arte sobre cuales técnicas de soft computing pueden ser utilizados en los procesos de soldadura. Diversos investigadores emplean las redes neuronales artificiales para clasificar o calcular las salidas de interés. Otros investigadores diseñan sistemas difusos para aproximar las salidas de interés. Por lo tanto, se seleccionaron las redes neuronales artificiales y lógica difusa para ser utilizados en esta investigación [61] [62].

Experimentación y adquisición de datos. – La experimentación para el proceso GMAW semiautomatizado y el proceso GMAW robotizado se realizaron en COMIMSA. Se emplearon las variables de entrada descritos anteriormente para realizar las uniones de las placas de aleación de aluminio 5052-H32. Antes de realizar los cordones de soldadura, los parámetros de entrada fueron establecidos antes. El diseño de experimentos para el proceso GMAW semiautomatizado fueron 10 soldaduras sin réplica mientras que, el diseño de experimentos para el proceso GMAW robotizado

fueron 36 soldaduras más una réplica. La limitante del diseño de experimentos para el proceso GMAW semiautomatizado fue el material, debido a eso únicamente se realizaron 10 soldaduras sin réplica.

Programación para la predicción o aproximación de las salidas de interés. - Al finalizar las soldaduras por el proceso GMAW semiautomatizado, se analizó la salida de interés (penetración) de los cordones de soldadura mediante una caracterización macroestructural. La secuencia para la caracterización macroestructural fue a través de una metodología la cual fue una inspección visual a nivel macroestructural, en donde se realizó lo siguiente: corte transversal en los cordones de soldadura de aleación de aluminio 5052-H32, montado en resina, desbaste, pulido y ataque químico para resaltar la geometría interna de los cordones de soldadura. Se empleó una resina acrílica de montaje en frío de la marca Struers debido a su bajo costo, rápido tiempo de curado y por ser más clara para visualizar la geometría de los cordones de soldadura. Al finalizar la secuencia descrita anteriormente, se implementó una metodología para el análisis macroestructural de la penetración de los cordones de soldadura con el software ImageJ. El análisis de la geometría de los cordones de soldadura con el software ImageJ se trabajó en conjunto con el código estructural del aluminio AWS D1.2.

En las soldaduras del proceso GMAW robotizado se realizó la misma metodología descrita anteriormente, pero se realizó el análisis de la geometría del cordón de soldadura. De la misma manera, el análisis de la geometría de los cordones de soldadura fue con el software ImageJ y se trabajó en conjunto con el código estructural del aluminio AWS D1.2.

Con redes neuronales artificiales, la salida de interés fue de manera cualitativa, es decir, “penetración completa” que representa 1 y “penetración incompleta” que representa 0. En el caso de las soldaduras unidas por el proceso GMAW robotizado, se realizó un análisis con más variables de entradas para determinar las salidas

deseadas. El análisis para determinar las salidas de interés se explicará en las demás secciones. Las salidas de interés fueron la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad. Al tener la base de datos de entradas y salidas, se procedió a realizar las programaciones correspondientes en el programa MATLAB R2020b para calcular, predecir o aproximar las salidas de interés empleando lógica difusa y redes neuronales artificiales.

Validación de la predicción o aproximación. – Para validar la programación de redes neuronales artificiales y lógica difusa se calculó el error. Por lo que, si existe un error muy alejado a 0, la interpretación es que la programación de redes neuronales o lógica difusa no es apropiada para calcular o aproximar las salidas de interés. Si el error es cercano a 0, entonces la programación es adecuada para calcular o aproximar las salidas de interés.

Modificaciones en la programación. – Como se mencionó anteriormente, el error puede determinar si la programación es adecuada para calcular o predecir las salidas de interés. Si el error es cercano a 0, entonces la programación no requiere de un retrabajo. Si el error no es cercano a 0, entonces la programación si requiere de un retrabajo para modificar el código de programación y que pueda calcular o aproximar adecuadamente.

Comparación con las técnicas seleccionadas – Se realizó una comparación de los resultados con la técnica de redes neuronales y lógica difusa. Aunque las redes neuronales artificiales es uno de los métodos ideales para trabajar procesos complejos, se concluyó que la técnica de lógica difusa es más adecuada para aproximar las salidas de interés en los procesos de soldadura. Esto es debido a las ventajas que tiene el método de lógica difusa como trabajar con una cantidad mínima de datos a comparación de las redes neuronales. Además de que se puede incorporar el conocimiento humano al modelado generado.

Aplicación de técnicas estadísticas. - Se realizó diferentes cálculos estadísticos para determinar la normalidad de los datos. Además, se generó ecuaciones de regresión lineal simple y múltiple para corroborar la complejidad de calcular las salidas de interés de los procesos de soldadura.

Análisis por medio de líquidos penetrantes. - Se realizó el ensayo de líquidos penetrantes para determinar la sanidad de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32. El ensayo de líquidos penetrantes en esta investigación se rige bajo la prueba estandarizada E 165 [63] [64]. Se utilizó un kit de ensayo por líquidos penetrantes tipo II. Se realizó una metodología para aplicar en ensayo de líquidos penetrantes el cual fue: 1) aplicación de limpiador en la superficie para remover contaminantes como aceite, polvo, tierra o suciedad, 2) al limpiar la superficie se colocó el líquido penetrante visible de color rojo y se dejó por 5 *min*, 3) al pasar los 5 *min* se removió el excedente del penetrante y 4) se aplicó un líquido revelador para indicar la presencia de discontinuidades.

Selección de la mejor técnica. - La selección de las técnicas de redes neuronales artificiales y lógica difusa fue basada en la naturaleza de los parámetros, debido que los datos de entrada son inexactos, poseen ruido, no cumplen con los supuestos de normalidad y no están correlacionadas entre sí.

Además, se realizó una metodología para obtener las macrografías de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32, unidas por el proceso GMAW robotizado tal como se muestra en la Figura 4. 2. Para obtener una macrografía se requiere de realizar un proceso de preparación de muestra [65]. El objetivo de realizar las macrografías, en esta parte de la investigación, es medir la geometría de los cordones de soldadura con el programa ImageJ. Las mediciones de la geometría servirán como información para aproximar la calidad.

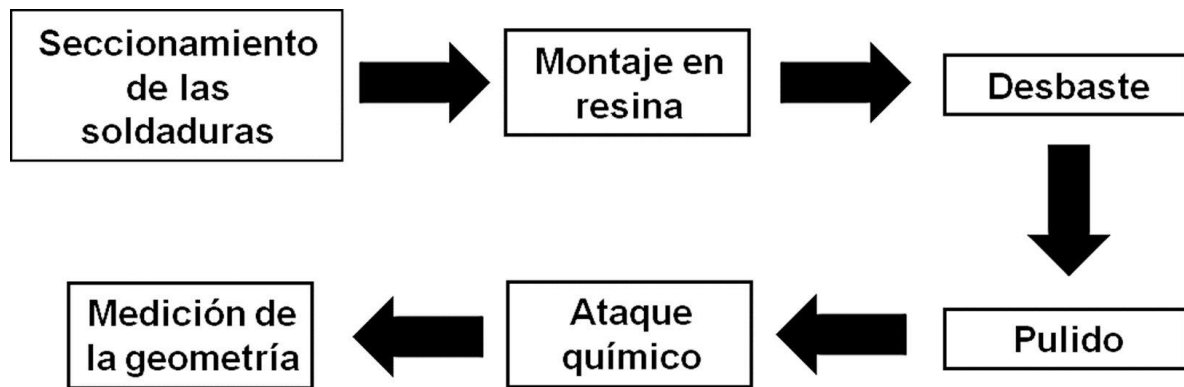


Figura 4. 2 Metodología para la medición de la geometría de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 unido por el proceso GMAW robotizado.

Recordando que en esta investigación se orientará en el análisis de la geometría del cordón de soldadura. Los cordones de soldadura fueron en placas de aleación de aluminio 5052-H32, unido con un metal de aporte ER5356 y empleando los parámetros de entrada del proceso GMAW ya sea semiautomatizado o robotizado. Los parámetros de entrada serán utilizados como información en el programa MATLAB R2020b para calcular, predecir o aproximar las salidas de interés empleando técnicas de soft computing como lógica difusa y redes neuronales artificiales. Los programas en MATLAB R2020b fueron realizados en una computadora marca Lenovo con un procesador AMD Ryzen 5 3500, con una tarjeta gráfica de AMD Radeon Vega Mobile y con un sistema operativo de 64 bits.

A continuación, se presentará la experimentación realizada para esta investigación, la cual está conformada por el diseño de experimentos del proceso GMAW semiautomatizado junto con las salidas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración para el modelado difuso. Asimismo, se expone el diseño de experimentos del proceso GMAW robotizado junto con las salidas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración para para el modelado difuso.

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

5.1 Proceso de soldadura GMAW semiautomatizado

5.1.1 Diseño de experimentos

En el proceso GMAW semiautomatizado, se utilizó un diseño de experimentos 2^3 el cual se puede observar en la Tabla 5. 1. El diseño de experimentos está formado por dos puntos centrales. La información del diseño de experimentos fue utilizada para realizar las inferencias sobre la relación o la dependencia de las variables de voltaje, corriente, velocidad y penetración. Como se puede observar, la velocidad tiene una variación mayor con respecto al voltaje y corriente debido que, el responsable de contralar la velocidad en un proceso de soldadura semiautomatizado es el soldador.

Tabla 5. 1 Diseño de experimentos 2^3 para el proceso GMAW semiautomatizado.

Soldadura	Voltaje	Corriente	Velocidad	Penetración
1	26	205	9.39	1
2	28	240	11.17	1
3	28	240	12.7	0
4	24	240	11.68	1
5	24	170	11.43	0
6	24	170	8.46	1
7	28	170	9.14	0
8	24	240	10.16	1
9	26	205	9.65	1
10	28	170	7.15	0

La variable de salida fue la penetración, determinada por inspección visual a nivel macro con el software ImageJ. Haciendo hincapié, se seleccionó el nivel macro porque el interés de esta investigación es la medición y el análisis de la geometría del cordón de soldadura. Si la penetración es completa entonces es denotado como 1, si la penetración es incompleta, entonces es denotado como 0. A continuación, se

mostrarán en la Figura 5. 1 algunas soldaduras unidas por el proceso GMAW semiautomatizado.

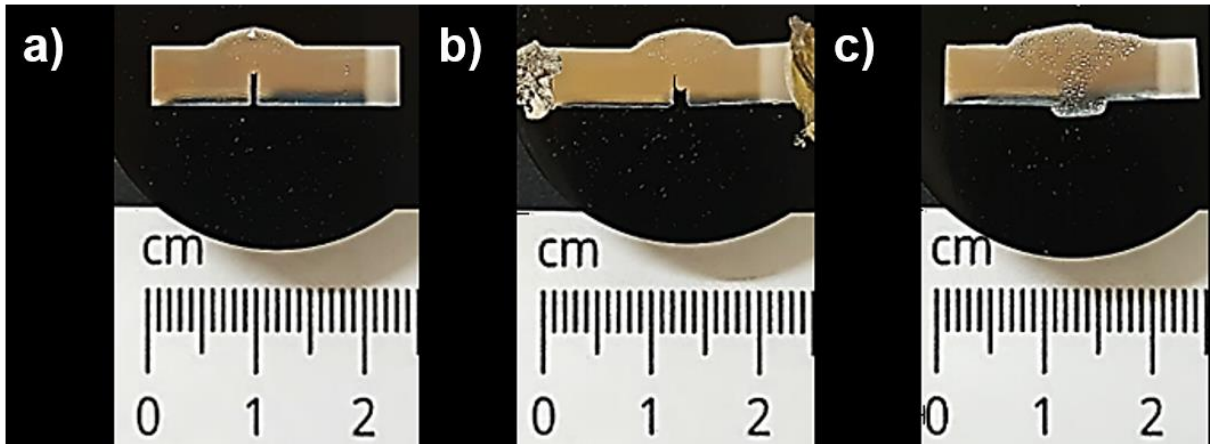


Figura 5. 1 Soldaduras por el proceso GMAW semiautomatizado en donde a) soldadura 5, b) soldadura 7 y c) soldadura 8.

Con la información del diseño de experimentos, se desarrolló un análisis estadístico para establecer la normalidad y la dependencia de los datos de entrada del proceso GMAW semiautomatizado. También se mostrarán el análisis de las ecuaciones de regresión lineal simple y múltiple para calcular la penetración de las soldaduras en el proceso GMAW semiautomatizado.

5.1.2 Medidas de tendencia central

Como se mencionó anteriormente, las medidas de tendencia central son ampliamente utilizadas para realizar inferencias sobre el comportamiento normal de los datos. Por lo que, se calcularon los valores de la media, mediana y moda de voltaje, corriente y velocidad de soldadura del proceso GMAW semiautomatizado. Los cálculos de la media, mediana y moda se muestran en la Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2 Relación de las medidas de tendencia central de las variables del proceso GMAW semiautomatizado.

Variable	Media	Mediana	Moda	Relación
Voltaje	26	26	24	Moda<Mediana=Media
Corriente	205	205	170	Moda<Mediana=Media
Velocidad de soldadura	10.0930	9.9050	7.1500	Moda<Mediana<Media

Con las relaciones de las medidas de tendencia central, se determinó el comportamiento normal de los datos. Las mediciones de tendencia central de voltaje y corriente no presentaron relaciones asimétricas o simétricas. Mientras que la velocidad de soldadura presentó una relación asimétrica hacia la derecha. Se puede inferir que las variables de entrada del proceso GMAW semiautomatizado no presentan un comportamiento normal.

5.1.3 Prueba de normalidad

Las pruebas de normalidad son métodos estadísticos que permiten determinar si los conjuntos de datos que se van a analizar siguen una distribución normal. Dicho esto, se muestra los resultados de la prueba Anderson-Darling sobre las variables del proceso GMAW semiautomatizado en la Tabla 5. 3. La prueba Anderson-Darling se realizó en el programa Minitab.

Tabla 5. 3 Prueba de normalidad Anderson-Darling para el proceso GMAW semiautomatizado

Variable	AD	Hipótesis
Voltaje	0.961	No se rechaza la H_0
Corriente	0.961	No se rechaza la H_0
Velocidad	0.156	No se rechaza la H_0
Penetración	1.263	No se rechaza la H_0

Para rechazar o no rechazar la hipótesis nula con el coeficiente calculado de Anderson-Darling por el programa Minitab, se utilizará la siguiente relación:

- Si $AD = 0$, entonces los datos tienen un comportamiento de distribución normal por lo que se rechaza la H_0 .
- Si $AD \neq 0$, entonces los datos no tienen un comportamiento de distribución normal por lo que no se rechaza la H_0 .

Debido a los resultados obtenidos de la prueba de normalidad Anderson-Darling, se puede concluir que las variables de entrada y de salida para el proceso GMAW semiautomatizado no tienen un comportamiento normal. Por lo que, se puede afirmar que emplear técnicas estadísticas con la suposición de que las variables del proceso de soldadura tienen un comportamiento normal no es lo más indicado para calcular, predecir o aproximar las salidas de interés.

5.1.4 Medidas de dependencia y la recta ajustada de regresión lineal simple

La información del diseño de experimentos del proceso GMAW semiautomatizado fue utilizada para realizar las inferencias sobre la relación o la dependencia de las variables de voltaje, corriente, velocidad y penetración.

Al analizar la Figura 5. 2, se observa el trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs corriente en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de voltaje vs corriente. La ecuación para graficar la recta ajustada fue *Corriente* = 205 – 0 *Volts*. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta

completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre voltaje vs corriente.

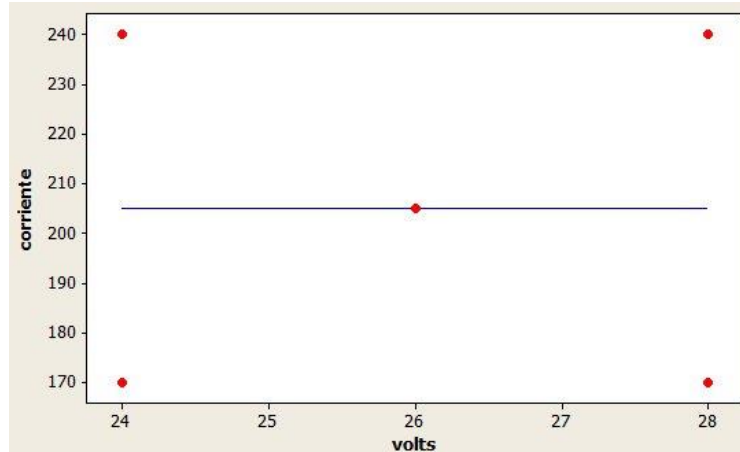


Figura 5. 2 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Corriente.

Como se puede observar en la Figura 5. 3, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs velocidad en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de voltaje vs velocidad. La ecuación para graficar la recta ajustada fue $Velocidad = 12.64 - 0.0981 Volts$. Se puede observar una recta descendente. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre voltaje vs velocidad es decir que, al incrementar el voltaje disminuye la velocidad.

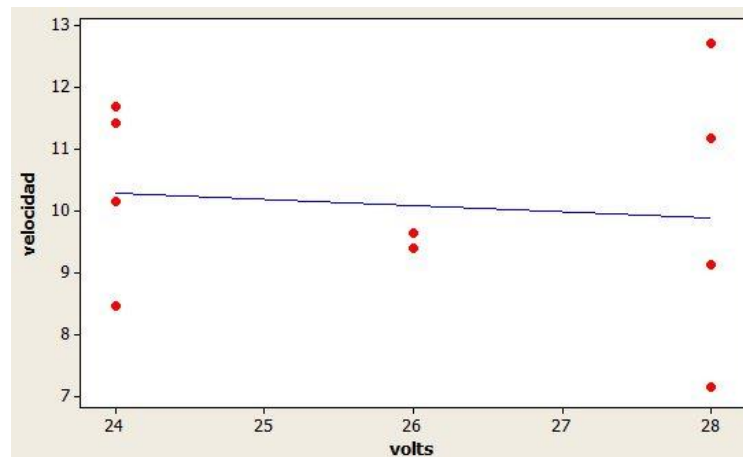


Figura 5. 3 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad.

De acuerdo con la Figura 5. 4, se puede observar el trazó el diagrama de dispersión de corriente vs velocidad en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de corriente vs velocidad. La ecuación para graficar la recta ajustada fue $Velocidad = 3.116 + 0.03404 \text{ corriente}$. Se puede observar una recta ascendente. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre corriente vs velocidad es decir que, al incrementar la corriente aumenta la velocidad.

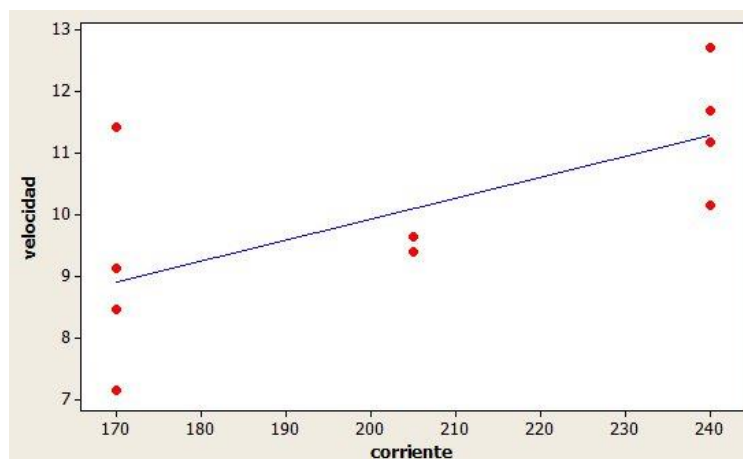


Figura 5. 4 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Corriente vs Velocidad.

En la Figura 5. 5, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de voltaje vs penetración. La ecuación para graficar la recta ajustada fue $Penetración = 3.850 - 0.1250 \text{ Volts}$. Se puede observar una recta descendente. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre voltaje vs penetración es decir que, al incrementar el voltaje disminuye la penetración.

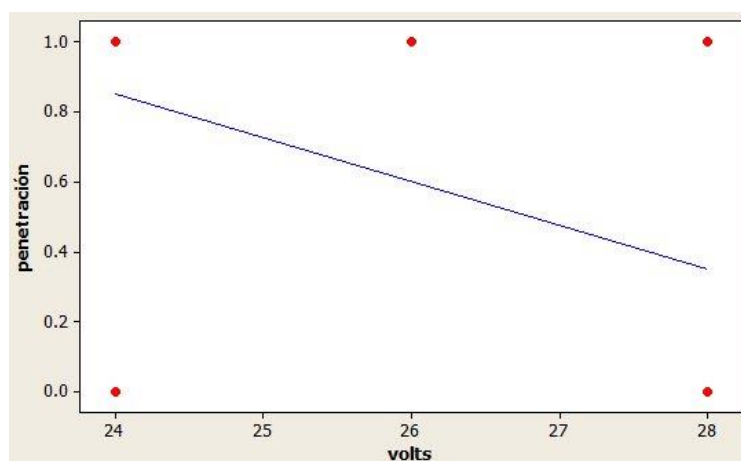


Figura 5. 5 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Penetración.

De acuerdo con la Figura 5. 6, se puede observar el trazó del diagrama de dispersión de corriente vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de corriente vs penetración. La ecuación para graficar la recta ajustada fue $Penetración = -0.864 + 0.007143 \text{ corriente}$. Se puede observar una recta ascendente. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre corriente vs penetración es decir que, al incrementar la corriente aumenta la penetración.

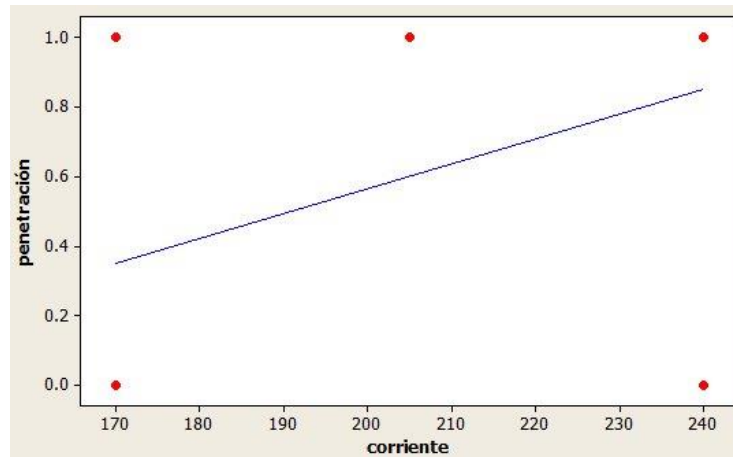


Figura 5. 6 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Corriente vs Penetración.

Como se puede observar en la Figura 5. 7, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para corroborar la relación, se trazó la recta ajustada de regresión lineal simple de velocidad vs penetración. La ecuación para graficar la recta ajustada fue $Penetración = 0.619 - 0.0019 \text{ velocidad}$. Se puede observar una recta ligeramente descendente. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre velocidad vs penetración es decir que, al incrementar la velocidad disminuye muy poco la penetración.

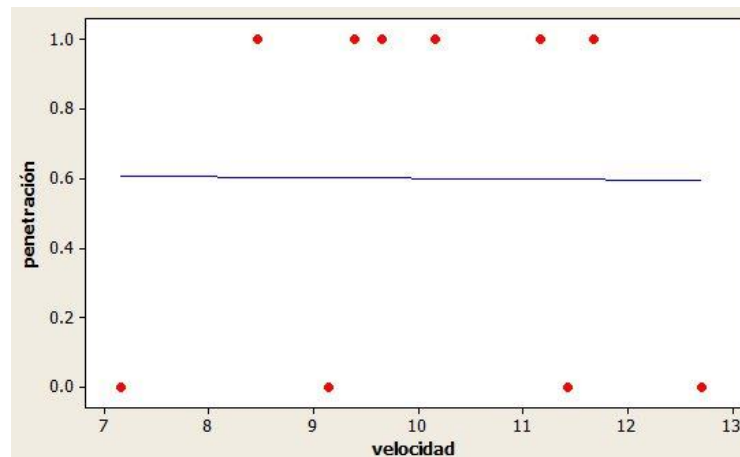


Figura 5. 7 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad vs Penetración.

Como se comentó en el marco teórico, los diagramas de dispersión y la recta ajustada de regresión lineal simple son técnicas para determinar la dependencia de las variables de manera cualitativa. Para conocer la dependencia de las variables de manera cuantitativa, se calcularon las medidas de dependencia de covarianza y coeficiente de correlación las cuales se muestran en la Tabla 5. 4.

Tabla 5. 4 Medidas de dependencia de las variables del proceso GMAW semiautomatizado.

Variable X - Variable Y	Covarianza	Coeficiente de correlación de Pearson
Voltaje – Corriente	0	0
Voltaje – Velocidad	–0.34889	–0.111
Corriente-Velocidad	37.0611	0.671
Voltaje-Penetración	–0.44444	–0.456
Corriente-Penetración	7.7778	0.456
Velocidad-Penetración	–0.00533	–0.006

Con los cálculos de la covarianza y el coeficiente de correlación de voltaje, corriente, velocidad y penetración para el proceso GMAW semiautomatizado, se puede deducir lo siguiente:

- El voltaje tiene una dependencia nula con la corriente, en este caso 0.
- El voltaje tiene poca dependencia negativa con la velocidad de -0.111 .
- La corriente tiene alta dependencia positiva con la velocidad de 0.671 .
- El voltaje tiene una dependencia negativa media con la penetración de -0.456 .
- La corriente tiene una dependencia positiva media con la penetración de 0.456 .
- La velocidad tiene muy poca dependencia negativa con la penetración de -0.006 .

Con los resultados de la covarianza y coeficiente de correlación, se puede deducir que las variables del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado tienen alguna interacción de dependencia entre ellas. Sin embargo, el voltaje y la corriente son las únicas variables que mostraron una dependencia nula. Mientras que, las demás variables de entrada tienen una dependencia con la salida de la penetración. Por lo que, al incrementar o disminuir los parámetros de entrada afectarán de manera positiva o negativa la salida.

5.1.5 Modelo de regresión lineal simple

Para realizar un análisis más completo de las soldaduras del proceso GMAW semiautomatizado, se optó por agregar en las salidas la concavidad de la corona y concavidad de la raíz. A continuación, se mostrarán las mediciones de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración de las soldaduras más representativas de aleación de aluminio 5052-H32 unidos por el proceso GMAW semiautomatizado. Las mediciones de la soldadura 5, 7 y 8 se muestran en la Figura 5. 8, Figura 5. 9 y Figura 5. 10. Las mediciones fueron realizadas con el programa ImageJ.

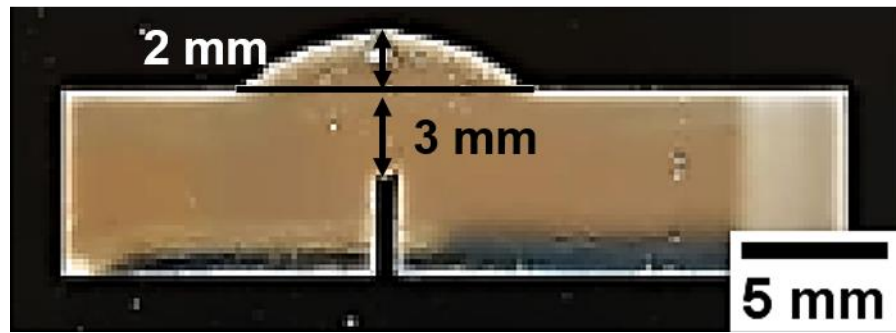


Figura 5. 8 Soldadura 5 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 3 mm y concavidad de la raíz de 0 mm.

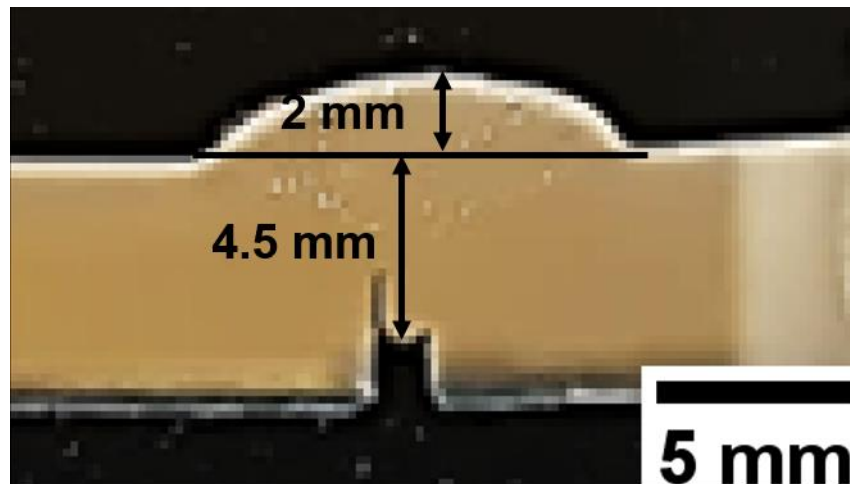


Figura 5. 9 Soldadura 7 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 4.5 mm y concavidad de la raíz de 0 mm.

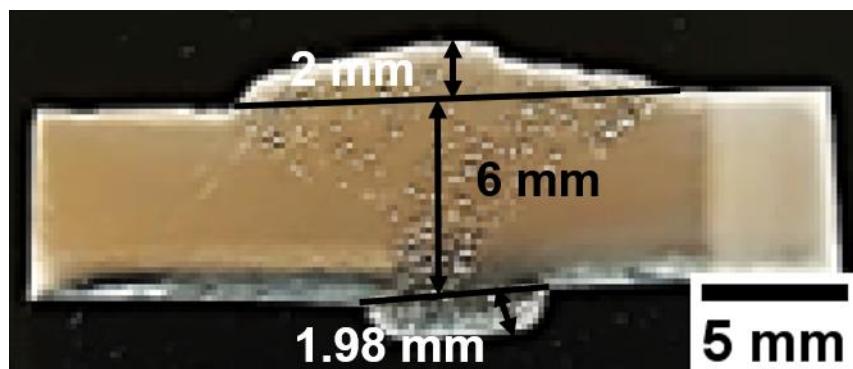


Figura 5. 10 Soldadura 8 con una concavidad de la corona de 2 mm, penetración de 6 mm y concavidad de la raíz de 1.98 mm.

Las mediciones reales de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración se muestran en la Tabla 5. 5. Con los datos de entrada y salidas se generó 9 ecuaciones de regresión lineal simple, en donde tres ecuaciones calcularán la concavidad de la corona, tres ecuaciones calcularán la concavidad de la raíz y tres ecuaciones calcularán la penetración. Las ecuaciones de regresión lineal simple se muestran en la Tabla 5. 6.

Tabla 5. 5 Datos de entrada y salidas del proceso GMAW semiautomatizado.

#	Datos de entrada			Mediciones de las salidas reales		
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Corona (mm)	Raíz (mm)	Penetración (mm)
1	26	205	9.39	3	0	6
2	28	240	11.17	2	2	6
3	28	240	12.7	2	0	3.2
4	24	240	11.68	2	2	6
5	24	170	11.43	2	0	3
6	24	170	8.46	2	2	6
7	28	170	9.14	2	0	4.5
8	24	240	10.16	2	2	6
9	26	205	9.65	2.1	2	6
10	28	170	7.15	2	0	5

Tabla 5. 6 Ecuaciones de regresión lineal simple del proceso GMAW semiautomatizado.

Variables dependientes	Ecuaciones de regresión lineal simple
Concavidad de la corona	$Y1 = 2.110 - 0.00000 \text{ Voltaje } X1$
	$Y2 = 2.110 + 0.000000 \text{ Corriente } X2$
	$Y3 = 2.398 - 0.02857 \text{ Velocidad } X3$
Concavidad de la raíz	$Y4 = 7.500 - 0.2500 \text{ Voltaje } X1$
	$Y5 = -1.929 + 0.01429 \text{ Corriente } X2$
	$Y6 = 0.502 + 0.0494 \text{ Velocidad } X3$
Penetración	$Y7 = 8.908 - 0.1438 \text{ Voltaje } X1$
	$Y8 = 3.193 + 0.00964 \text{ Corriente } X2$
	$Y9 = 7.915 - 0.2723 \text{ Velocidad } X3$

A continuación, se mostrarán las salidas calculadas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración en las Tabla 5. 7, Tabla 5. 8 y

Tabla 5. 9. También se calculó el error de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración para determinar la factibilidad de las regresiones lineales simples.

Tabla 5. 7 Salida aproximada de la concavidad de la corona y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.

Soldadura	Y1 = 2.110 - 0.00000 Voltaje X1		Y2 = 2.110 + 0.00000 Corriente X2		Y3 = 2.398 - 0.02857 Velocidad X3	
	Y1	E1	Y2	E2	Y3	E3
1	2.11	0.89	2.11	0.89	2.1297277	0.8702723
2	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.0788731	-0.0788731
3	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.035161	-0.035161
4	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.0643024	-0.0643024
5	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.0714449	-0.0714449
6	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.1585834	-0.1585834
7	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.1368702	-0.1368702
8	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.1077288	-0.1077288
9	2.11	-0.01	2.11	-0.01	2.1222995	-0.0222995
10	2.11	-0.11	2.11	-0.11	2.1948673	-0.1948673

Tabla 5. 8 Salida aproximada de la concavidad de la raíz y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.

Soldadura	Y4 = 7.500 - 0.2500 Voltaje X1		Y5 = - 1.929 + 0.01429 Corriente X2		Y6 = 0.502 + 0.0494 Velocidad X3	
	Y4	E4	Y5	E5	Y6	E6
1	1	-1	1.00045	-1.00045	0.965866	-0.965866
2	0.5	1.5	1.5006	0.4994	1.053798	0.946202
3	0.5	-0.5	1.5006	-1.5006	1.12938	-1.12938
4	1.5	0.5	1.5006	0.4994	1.078992	0.921008
5	1.5	-1.5	0.5003	-0.5003	1.066642	-1.066642
6	1.5	0.5	0.5003	1.4997	0.915972	1.084028
7	0.5	-0.5	0.5003	-0.5003	0.953516	-0.953516
8	1.5	0.5	1.5006	0.4994	1.003904	0.996096
9	1	1	1.00045	0.99955	0.97871	1.02129
10	0.5	-0.5	0.5003	-0.5003	0.853234	-0.853234

Tabla 5. 9 Salida aproximada de la penetración y el error calculado de las ecuaciones de RLS correspondientes.

Soldadura	Y7 = 8.908 - 0.1438 Voltaje X1		Y8 = 3.193 + 0.00964 Corriente X2		Y9 = 7.915 - 0.2723 Velocidad X3	
	Y7	E7	Y8	E8	Y9	E9
1	5.1692	0.8308	5.1692	0.8308	5.358103	0.641897
2	4.8816	1.1184	5.5066	0.4934	4.873409	1.126591
3	4.8816	-1.6816	5.5066	-2.3066	4.45679	-1.25679
4	5.4568	0.5432	5.5066	0.4934	4.734536	1.265464
5	5.4568	-2.4568	4.8318	-1.8318	4.802611	-1.802611
6	5.4568	0.5432	4.8318	1.1682	5.633126	0.366874
7	4.8816	-0.3816	4.8318	-0.3318	5.426178	-0.926178
8	5.4568	0.5432	5.5066	0.4934	5.148432	0.851568
9	5.1692	0.8308	5.1692	0.8308	5.287305	0.712695
10	4.8816	0.1184	4.8318	0.1682	5.978947	-0.978947

Como se puede observar, emplear el método de regresión lineal simple para calcular de manera bivariada la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración no es lo más indicado. Esto es debido porque los errores calculados de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración no fueron cercanos a cero. Por lo que, se requiere de realizar un análisis que involucre a más de una variable independiente, ya que más de un parámetro de soldadura afecta las salidas.

5.1.6 Modelo de regresión lineal múltiple

Como se comentó anteriormente, existen casos en que una sola variable independiente no puede aproximar adecuadamente la variable dependiente, por lo que se requiere de emplear más variables regresoras en el análisis de regresión lineal.

Dicho lo anterior, se generó las ecuaciones de regresión lineal múltiple en el programa Minitab. Se obtuvieron un total de tres ecuaciones en donde cada ecuación calculará la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz y la penetración. Las tres ecuaciones se muestran en la Tabla 5. 10.

Tabla 5. 10 Ecuaciones de regresión lineal múltiple para el proceso GMAW semiautomatizado.

Variables dependientes	Ecuaciones de regresión lineal múltiples
Concavidad de la corona	$Y_{10} = 2.40 - 0.0051 \text{ Voltaje } X_1 + 0.00184 \text{ Corriente } X_2 - 0.053 \text{ Velocidad } X_3$
Concavidad de la raíz	$Y_{11} = 6.30 - 0.280 \text{ Voltaje } X_1 + 0.0251 \text{ Corriente } X_2 - 0.314 \text{ Velocidad } X_3$
Penetración	$Y_{12} = 11.2 - 0.218 \text{ Voltaje } X_1 + 0.0364 \text{ Corriente } X_2 - 0.777 \text{ Velocidad } X_3$

De acuerdo con la Tabla 5. 11, se infiere que las ecuaciones de regresión lineal múltiple no son adecuadas para calcular la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz, la penetración. Esto es debido a los errores calculados en cada ecuación, ya que muestran valores distintos de cero.

Tabla 5. 11 Salida aproximada de la Concavidad de la corona, Concavidad de la raíz y penetración junto con el error calculado de las ecuaciones de RLM correspondientes.

Soldadura	Concavidad de la corona		Concavidad de la raíz		Penetración	
	Y10 = 2.40 - 0.0051		Y11 = 6.30 - 0.280		Y12 = 11.2 - 0.218	
	Voltaje X1+0.00184		Voltaje X1+0.0251		Voltaje X1+0.0364	
	Corriente X2-0.053		Corriente X2-0.314		Corriente X2-0.777	
	Velocidad X3		Velocidad X3		Velocidad X3	
	Y10	E10	Y11	E11	Y12	E12
1	2.146	0.853	1.216	-1.216	5.706	0.293
2	2.106	-0.106	0.976	1.023	5.162	0.837
3	2.024	-0.024	0.496	-0.496	3.973	-0.773
4	2.099	-0.099	1.936	0.063	5.638	0.361
5	1.983	0.016	0.258	-0.258	3.283	-0.283
6	2.146	-0.146	1.215	0.784	5.653	0.346
7	2.085	-0.085	-0.143	0.143	4.190	0.309
8	2.180	-0.180	2.413	-0.413	6.819	-0.819
9	2.132	-0.032	1.135	0.864	5.504	0.495
10	2.193	-0.193	0.493	-0.493	5.767	-0.767

5.1.7 Modelo de red neuronal artificial

En esta investigación se diseñó una red neuronal artificial exploratoria para analizar una salida en el proceso GMAW semiautomatizado. Se infirió que la red neuronal artificial tendrá la capacidad de analizar y clasificar la penetración, en los cordones de soldadura en placas de aleación de aluminio 5052-H32. La red neuronal artificial estará conformada por una capa de entrada con tres neuronas, una capa

oculta con “S” número de neuronas y una capa de salida con una neurona como se puede observar en la Figura 5. 11.

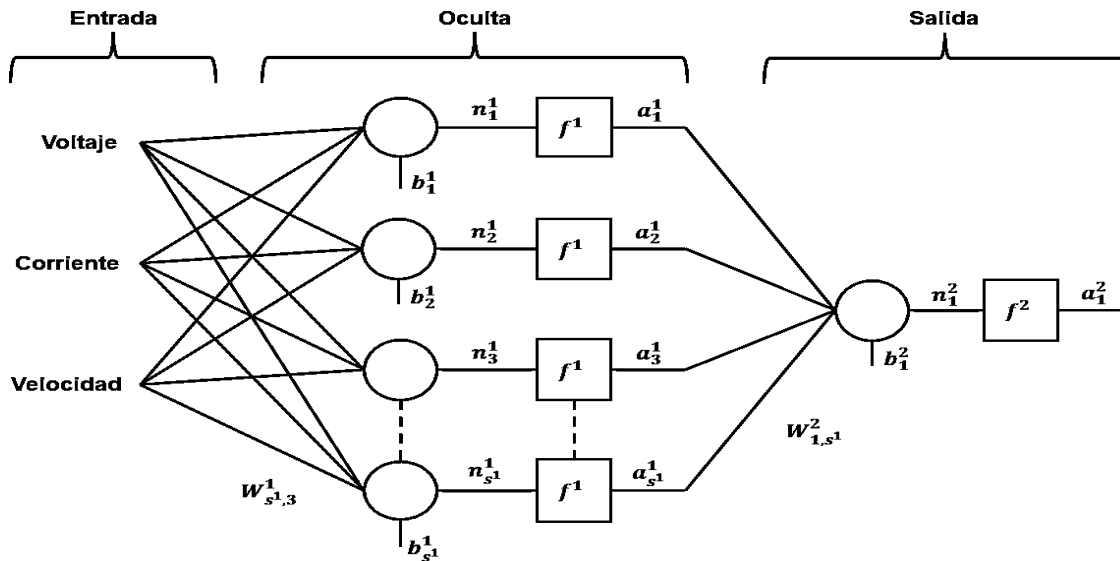


Figura 5. 11 Arquitectura de la red neuronal perceptrón multicapa exploratoria para predecir la penetración.

Se desarrolló una red neuronal artificial perceptrón multicapa considerando los siguientes aspectos como el número de datos de entrada que conforman cada patrón, el número de datos de salida de interés a analizar, el número de capas ocultas que tendrá la arquitectura a aspirar, el número de neuronas ocultas en las capas ocultas, el tamaño de la matriz de pesos y bias con valores aleatorizados, las funciones de transferencia a utilizar, el factor de aprendizaje (alfa), el error permitido determinado por el programador y finalmente el tipo de algoritmo de entrenamiento.

Por lo que, la arquitectura de la red neuronal perceptrón multicapa dependerá de cada uno de los elementos mencionados anteriormente, aunado a la complejidad misma del proceso de soldadura y de la cantidad de información de los datos de entrada del diseño de experimentos de la Tabla 5. 1.

La red neuronal artificial está formada por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Se inició con una arquitectura mínima de 3 – 3 – 1 hasta una arquitectura máxima de 3 – 10 – 1. Se utilizaron las funciones de activación lineal, sigmoideal y tangencial en la capa oculta y capa de salida respectivamente. Dicho lo anterior, se desarrollaron varias pruebas preliminares con diferentes combinaciones tales como lineal-sigmoideal, tangencial-tangencial y sigmoideal-tangencial por mencionar algunas. Las pruebas preliminares fueron realizadas para observar cuál combinación presenta la mejor clasificación en la penetración.

La cantidad de neuronas en la capa de entrada serán de tres elementos los cuales son voltaje, corriente y velocidad. La combinación de los tres datos de entrada con diferente parámetro conforma un patrón. La capa oculta está formada a partir de un mínimo de 3 neuronas hasta un máximo de 10 neuronas. En la capa oculta habrá una función de activación ya sea lineal, sigmoideal o tangencial. La capa de salida solo tendrá una neurona ya que la salida de interés es la penetración. La función de activación en la capa de salida será lineal, sigmoideal o tangencial con el objetivo de poder aproximar/clasificar la salida con sus respectivos patrones.

La arquitectura de red neuronal artificial perceptrón multicapa emplea el 70 % de información del diseño de experimentos de la Tabla 5. 1 para entrenar la red y el 30 % de información para la prueba y validación. Como se puede observar en la Tabla 5. 12, se realizaron nueve códigos de programación de redes neuronales perceptrón multicapa. Las arquitecturas que pueden aproximar/clasificar la penetración son aquellas cuyo conjunto de funciones de activación son lineal-sigmoideal, sigmoideal-sigmoideal y tangencial-sigmoideal.

Tabla 5. 12 Aproximación en porcentaje de la penetración con diferentes números de neuronas ocultas y sus funciones de activación correspondientes.

Capa oculta/salida	Número de neuronas en la capa oculta							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Lineal-Lineal	30 %	30 %	30 %	40 %	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>
Lineal-Sigmoidal	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %
Lineal-Tangencial	30 %	80 %	90 %	70 %	80 %	60 %	60 %	90 %
Sigmoidal-Lineal	70 %	70 %	70 %	80 %	40 %	80 %	30 %	50 %
Sigmoidal-Sigmoidal	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %
Sigmoidal-Tangencial	90 %	90 %	90 %	20 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Tangencial-Lineal	40 %	30 %	60 %	80 %	90 %	90 %	90 %	30 %
Tangencial-Sigmoidal	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %
Tangencial-Tangencial	30 %	30 %	80 %	80 %	80 %	30 %	80 %	70 %

Las arquitecturas mencionadas anteriormente pueden aproximar/clasificar la penetración un 90 %. Cualquier arquitectura con una combinación de funciones de activación diferentes a la lineal-sigmoidal, sigmoidal-sigmoidal y tangencial-sigmoidal brindarán aproximaciones/clasificaciones menores al 90 %.

También se analizó el tiempo en que tarda de procesar los nueve códigos. Además, se registró los errores calculados junto con el número de épocas y el número de iteraciones generados con el conjunto de funciones de activación lineal-sigmoidal, sigmoidal-sigmoidal y tangencial-sigmoidal. Los resultados fueron registrados en la Tabla 5. 13, con el objetivo de seleccionar cual conjunto de funciones de activación es el más adecuado para aproximar la penetración.

Tabla 5. 13 Análisis del tiempo, error calculado, épocas e iteraciones de los tres mejores conjuntos de funciones de activación de la red neuronal multiperceptron diseñada.

Capa oculta/salida	Tiempo (s)	Error calculado	Épocas	Iteraciones
Lineal-Sigmoidal	3 – 4 <i>aprox</i>	≤ 0.000001	> 68 <i>mil</i>	> 479 <i>mil</i>
Sigmoidal-Sigmoidal	15 – 33 <i>aprox</i>	$= 0.000001$	> 394 <i>mil</i>	> 2.7 <i>millones</i>
Tangencial-Sigmoidal	3 – 6 <i>aprox</i>	≤ 0.000001	> 93 <i>mil</i>	> 653 <i>mil</i>

Los errores calculados mostraron valores iguales o menores al error establecido previamente, en donde el error establecido fue de 0.000001. La diferencia principal entre los tres códigos fue el tiempo en que tarda el código en finalizar todo el procesamiento matemático interno. El número de épocas y el número de iteraciones alcanzó valores muy altos, sin embargo, estos valores son necesarios para alcanzar un error menor o igual al permitido.

Por lo que, de acuerdo a los resultados el conjunto que mejor aproxima/clasifica la penetración utilizando voltaje, corriente y velocidad de soldadura es la lineal-sigmoidal. Esto es debido al poco tiempo que tarda en finalizar sus operaciones matemáticas, al error calculado que fue menor al establecido y a la menor cantidad de épocas e iteraciones para aproximar/clasificar su salida. La ecuación que genera la mejor aproximación de la penetración es con la ecuación (5.1).

$$a^2 = f^2(W^2(f^1(W^1 * P + b^1) + b^2)) \quad (5.1)$$

En donde f^2 es la función de activación sigmoidal de la capa de salida, f^1 es la función de activación lineal de la capa oculta, W^2 es la matriz de pesos de la capa de salida, W^1 es la matriz de pesos de la capa oculta, b^2 es el sesgo de la capa de salida, b^1 es el sesgo en forma de vector columna en la capa oculta y P es el conjunto de elementos (voltaje, corriente y velocidad de soldadura) que conforman cada patrón.

A continuación, se muestra la salida de la red neuronal perceptrón multicapa calculado con la ecuación (5.1). Los resultados calculados de las 10 soldaduras se muestran en la Tabla 5. 14.

Tabla 5. 14 Resultado de la aproximación/clasificación de la penetración con la red neuronal artificial multiperceptron lineal-sigmoidal.

Soldadura	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Salida de la red	Salida deseada	Error
1	26	205	9.39	0.999	1	0.001
2	28	240	11.17	0.996	1	0.004
3	28	240	12.70	0.003	0	-0.003
4	24	240	11.68	0.999	1	0.001
5	24	170	11.43	2.27×10^{-7}	0	-2.27×10^{-7}
6	24	170	8.46	0.998	1	0.002
7	28	170	9.14	0.001	0	-0.001
8	24	240	10.16	1	1	0
9	26	205	9.65	0.999	1	0.001
10	28	170	7.15	0.999	0	-0.999

Las salidas deseadas de las 10 soldaduras tendrán únicamente dos valores, los cuales son “1” si tiene penetración completa y “0” si no tiene penetración completa. Esto es debido a que en la práctica solo pueden ocurrir estos dos casos. El error calculado es la diferencia entre la salida deseada y la salida calculada, en donde nueve soldaduras presentan errores cercanos a cero. Por lo que, el modelo matemático generado por la red neuronal artificial puede aproximar/clasificar el 90 % de las penetraciones.

Aclarando que, estos resultados de la experimentación están dirigidos para un proceso de soldadura GMAW semiautomatizado, empleando una red neuronal artificial y con un número de patrones limitados.

5.1.8 Modelo Difuso

En esta investigación, se desarrollaron dos variantes del sistema triple difuso que evalúan los datos de entrada de voltaje, corriente y velocidad del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado para aproximar la calidad de la geometría del cordón de soldadura. El sistema triple difuso está conformado por tres secciones difusas y cada sección por cuatro componentes. Las tres secciones del sistema triple difuso son el sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado, el sistema difuso de calidad y el sistema difuso de ajuste tal como se muestra en la Figura 5. 12.

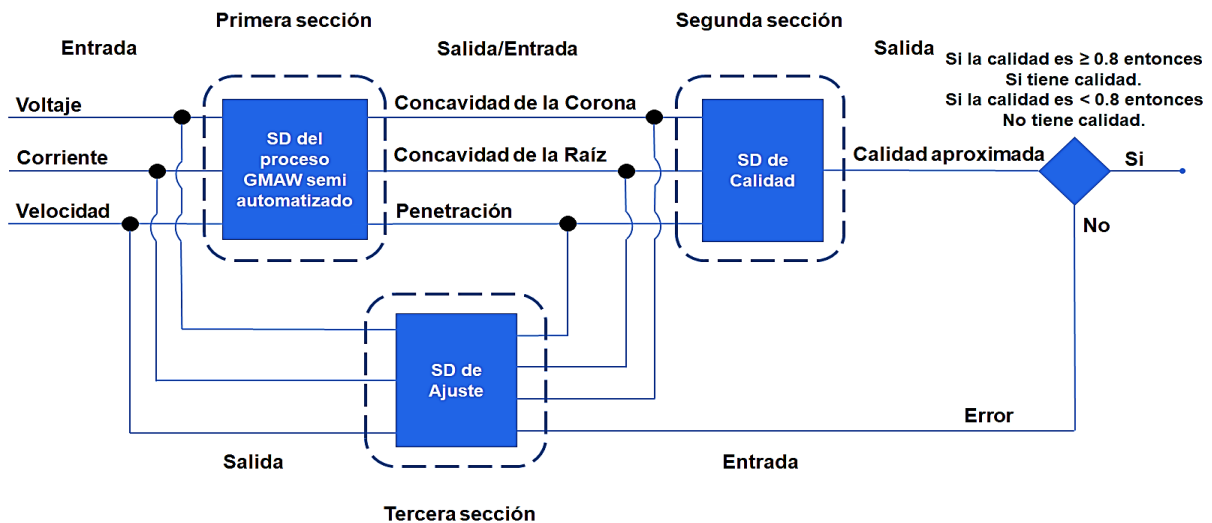


Figura 5. 12 Diseño del sistema triple difuso para evaluar la calidad pertinente del proceso GMAW semiautomatizado.

Los cuatro componentes que emplea cada sistema difuso son la fusificación, la base de conocimientos, la inferencia y la defusificación tal como se muestra en la Figura 5. 13.

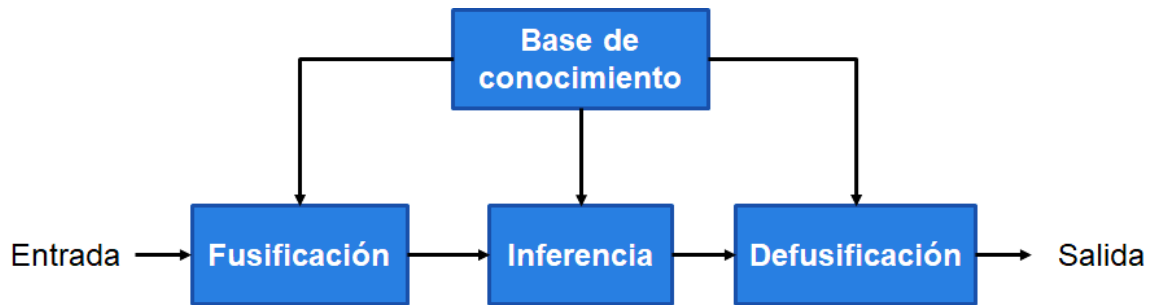


Figura 5. 13 Componentes que conforman al sistema de control difuso.

A continuación, se explicará la primera variante del sistema triple difuso para el proceso de soldadura GMAW semiautomatizado. La primera sección fue nombrada como sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado y tiene como objetivo aproximar las salidas de la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz y la penetración. La aproximación de las salidas es debido a la transformación de los valores cuantitativos de las entradas de voltaje, corriente y velocidad a valores difusos dentro del rango $[0,1]$ por medio de la fusificación. Los datos de entrada de voltaje, corriente y velocidad son conocidos como conjunto de antecedentes tal como se muestra en la Figura 5. 14. Los datos de salida de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración son conocidos como conjunto de consecuentes tal como se muestra en la Figura 5. 15.

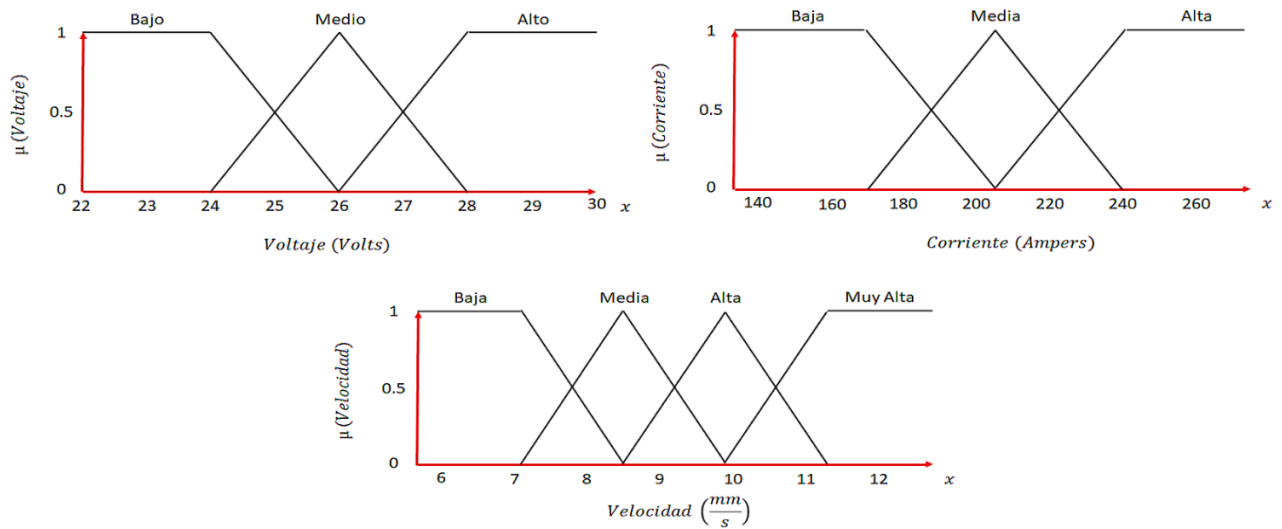


Figura 5. 14 Conjunto de antecedentes de voltaje, corriente y velocidad.

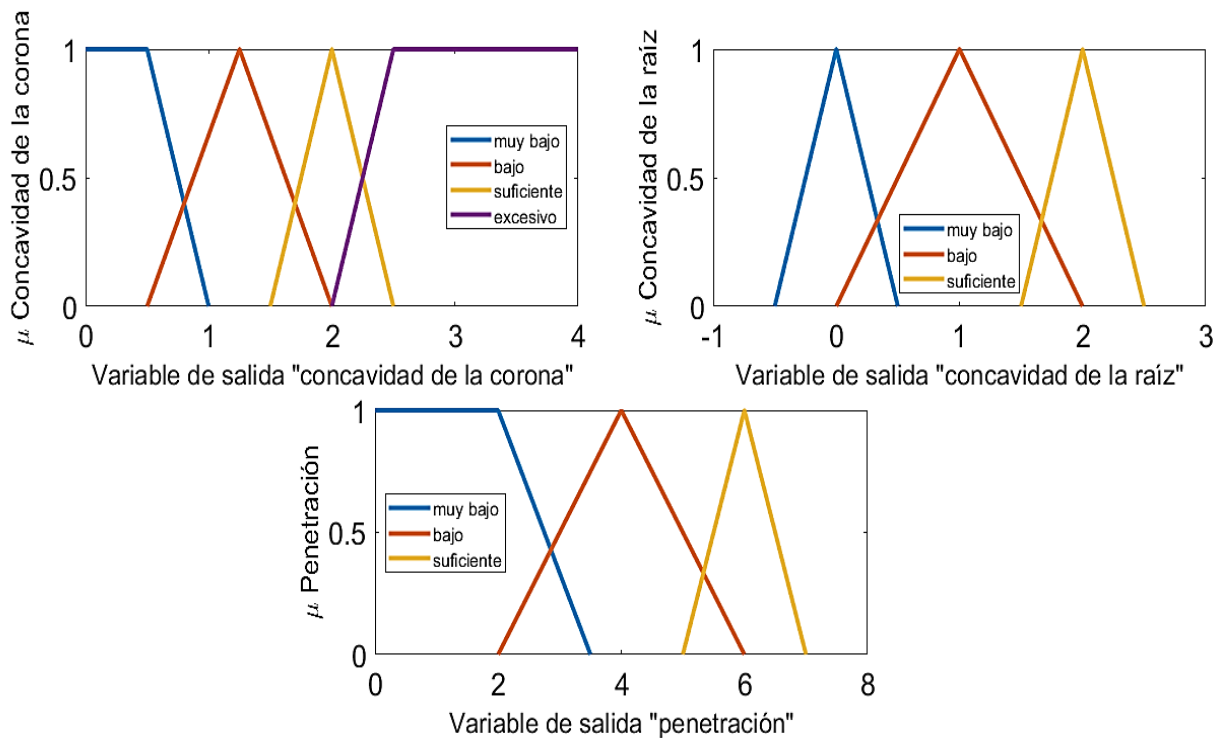


Figura 5. 15 Conjunto de consecuentes de concavidad de corona, concavidad de raíz y penetración.

Una vez transformando los valores de los datos de entrada, la sección del sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado trabajará en conjunto con la

base de conocimientos y la inferencia. La base de conocimientos y la inferencia servirán para determinar las nuevas salidas correspondientes al conjunto de cada entrada.

La técnica de lógica difusa utiliza el conocimiento y la experiencia de los expertos del proceso de soldadura, por lo que en la base de conocimientos que se generó tendrá un número finito de reglas difusas del tipo “SI-ENTONCES”. Las reglas difusas estarán relacionadas con los conjuntos de antecedentes y con los conjuntos de consecuentes. El método de inferencia más utilizado, en el sistema difuso, es el modus Ponens junto con la implicación Mamdani. La implicación Mamdani es un razonamiento hacia adelante que parte desde los antecedentes hasta los consecuentes.

A continuación, se mostrará la base de reglas difusas del sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado para determinar la geometría del cordón de soldadura. La base de datos estará conformada por 36 reglas lingüísticas obtenidas por el número de combinaciones posibles con respecto al número de valores lingüísticos de las variables lingüísticas de los conjuntos de antecedentes. En el Anexo C, se encuentra la tabla de las 36 combinaciones de reglas lingüísticas del sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado. A continuación, se enlistan las 36 reglas difusas del sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado en forma de enunciado, en donde B es bajo, M es medio, A es alto y MA muy alto para los conjuntos de antecedentes. Para los conjuntos de consecuentes se tiene que MP es muy poco, P es poco, S es suficiente y D es demasiado.

1. Si el voltaje es B y la corriente es B y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
2. Si el voltaje es B y la corriente es B y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es S y la penetración es S.

3. Si el voltaje es B y la corriente es B y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
4. Si el voltaje es B y la corriente es B y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
5. Si el voltaje es B y la corriente es M y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
6. Si el voltaje es B y la corriente es M y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
7. Si el voltaje es B y la corriente es M y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
8. Si el voltaje es B y la corriente es M y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
9. Si el voltaje es B y la corriente es A y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
10. Si el voltaje es B y la corriente es A y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
11. Si el voltaje es B y la corriente es A y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es S y la penetración es S.
12. Si el voltaje es B y la corriente es A y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es S y la penetración es S.
13. Si el voltaje es M y la corriente es B y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
14. Si el voltaje es M y la corriente es B y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
15. Si el voltaje es M y la corriente es B y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
16. Si el voltaje es M y la corriente es B y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
17. Si el voltaje es M y la corriente es M y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.

18. Si el voltaje es M y la corriente es M y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es S y la penetración es S.
19. Si el voltaje es M y la corriente es M y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
20. Si el voltaje es M y la corriente es M y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
21. Si el voltaje es M y la corriente es A y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
22. Si el voltaje es M y la corriente es A y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
23. Si el voltaje es M y la corriente es A y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
24. Si el voltaje es M y la corriente es A y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
25. Si el voltaje es A y la corriente es B y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
26. Si el voltaje es A y la corriente es B y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
27. Si el voltaje es A y la corriente es B y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
28. Si el voltaje es A y la corriente es B y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
29. Si el voltaje es A y la corriente es M y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es D y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
30. Si el voltaje es A y la corriente es M y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
31. Si el voltaje es A y la corriente es M y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.
32. Si el voltaje es A y la corriente es M y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.

33. Si el voltaje es A y la corriente es A y la velocidad es B entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
34. Si el voltaje es A y la corriente es A y la velocidad es M entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es P y la penetración es S.
35. Si el voltaje es A y la corriente es A y la velocidad es A entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es S y la penetración es S.
36. Si el voltaje es A y la corriente es A y la velocidad es MA entonces la concavidad de la corona es S y la concavidad de la raíz es MP y la penetración es P.

El método de razonamiento hacia adelante analiza los grados de membresía de los datos de entrada de voltaje, corriente y velocidad para calcular y obtener el grado de influencia que tiene en los consecuentes. El grado de influencia calculado de los consecuentes de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración es representado en valores difusos.

Debido que se necesita conocer el grado de influencia de los nuevos conjuntos de consecuentes en valores reales, se requiere de transformar los valores difusos calculados en valores reales. Por lo que, el método de defusificación (centroide) transformará los valores difusos calculados en valores reales. Este método requiere de localizar las coordenadas más significativas del área recortada (sombreada) para realizar la sustitución en la fórmula (5.2) del centroide, en donde $\mu_B(x)$ es el valor de membresía y x es el valor real.

$$Salida\ real = \frac{\int \mu_B(x) * x dx}{\int \mu_B(x) dx} \quad (5.2)$$

Los valores reales calculados por el método del centroide, en el sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado, serán utilizados como los datos de entrada en el sistema difuso de calidad.

La segunda sección del sistema triple difuso tiene como objetivo aproximar la calidad a partir de las nuevas entradas calculadas de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración. Las nuevas entradas y salidas de la segunda sección del sistema triple difuso se muestran en la Figura 5. 16 y Figura 5. 17.

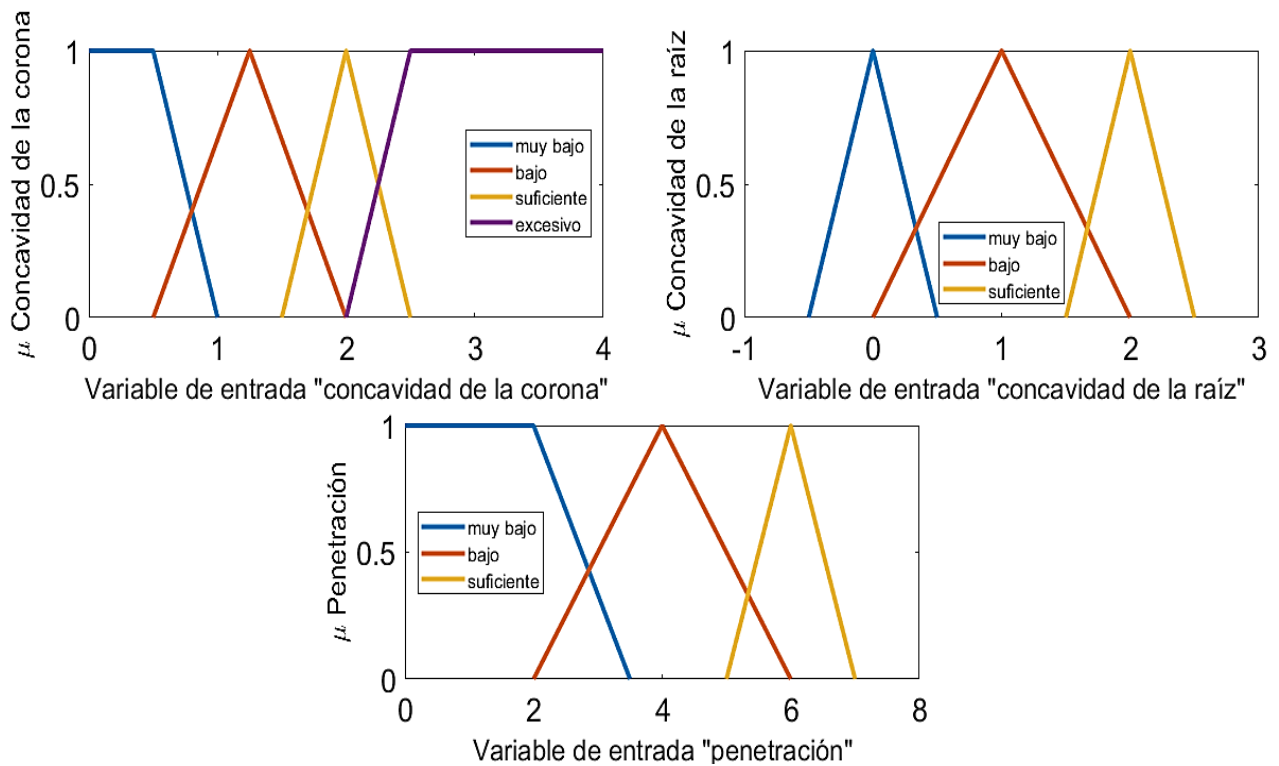


Figura 5. 16 Nuevos conjunto de antecedentes de concavidad de corona, concavidad de raíz y penetración.

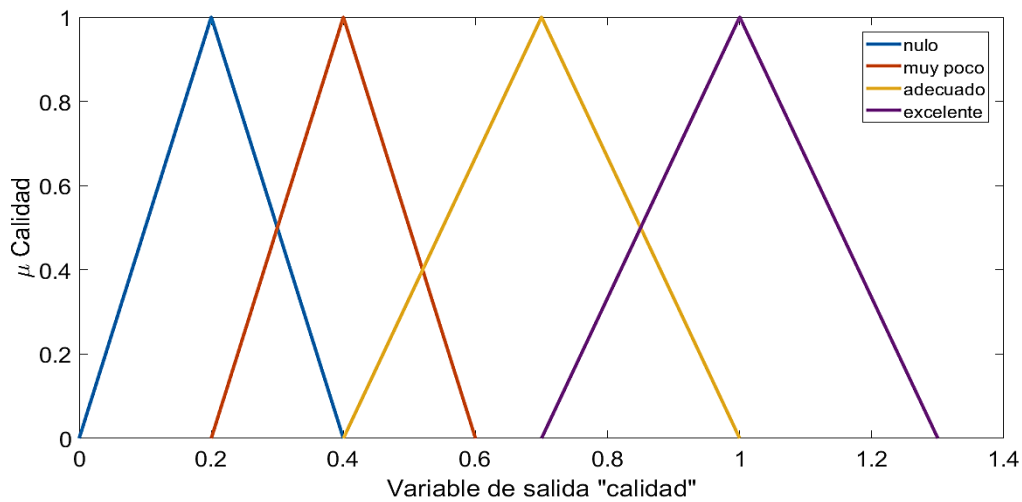


Figura 5. 17 Conjunto de consecuentes de calidad.

De la misma manera que en la primera sección, el sistema difuso de calidad trabajará en conjunto con una base de conocimientos y la inferencia para calcular el nuevo conjunto difuso de salida de la calidad. La base de datos estará conformada por 36 reglas lingüísticas, obtenidas por el número de combinaciones posibles con respecto al número de valores lingüísticos de las variables lingüísticas de los nuevos conjuntos de antecedentes. En el Anexo D, se encuentra la tabla de las 36 combinaciones de reglas lingüísticas del sistema difuso de calidad. Además del Anexo D, se enlistan las 36 reglas difusas del sistema difuso de calidad en forma de enunciado. En donde MP es muy poco, P es poco, S es suficiente y D es demasiado para los conjuntos de antecedentes. Para el conjunto de consecuente se tiene que N es nulo, MP es muy poco, A es adecuado y E es excelente.

1. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
2. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PP entonces la calidad es MP.
3. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PS entonces la calidad es E.

4. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
5. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PP entonces la calidad es MP.
6. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
7. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
8. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PP entonces la calidad es A.
9. Si la concavidad superior es CCMP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PS entonces la calidad es E.
10. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
11. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PP entonces la calidad es MP.
12. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
13. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
14. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PP entonces la calidad es MP.
15. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
16. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
17. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PP entonces la calidad es A.
18. Si la concavidad superior es CCP y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PS entonces la calidad es E.

19. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
20. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PP entonces la calidad es A.
21. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
22. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
23. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PP entonces la calidad es A.
24. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
25. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
26. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PP entonces la calidad es A.
27. Si la concavidad superior es CCS y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PS entonces la calidad es E.
28. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
29. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PP entonces la calidad es A.
30. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRMP y la penetración es PS entonces la calidad es E.
31. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
32. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PP entonces la calidad es A.
33. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRP y la penetración es PS entonces la calidad es E.

- 34. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PMP entonces la calidad es N.
- 35. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PP entonces la calidad es A.
- 36. Si la concavidad superior es CCD y la concavidad inferior es CRS y la penetración es PS entonces la calidad es E.

El valor real del nuevo conjunto de salida de la calidad es calculado con la ecuación del centroide (5.2). Como se puede observar en la Figura 5. 12, la salida del sistema difuso de calidad tendrá dos condiciones. Si la calidad calculada es ≥ 0.8 , entonces la geometría del cordón de soldadura tendrá una calidad adecuada o excelente de acuerdo al código estructural del aluminio AWS D1.2. Se podrá inferir que los parámetros del proceso GMAW semiautomatizado de voltaje, corriente y velocidad de soldadura no requerirán de algún ajuste.

Caso contrario, si la calidad calculada es < 0.8 entonces la geometría del cordón de soldadura se supondrá que no tiene una calidad adecuada. Esta suposición es debido al error calculado entre los valores calculados de la calidad y los valores reales de la calidad de las soldaduras. En consecuencia, los parámetros del proceso GMAW semiautomatizado de voltaje, corriente y velocidad de soldadura no son los más indicados para obtener una geometría del cordón de soldadura con calidad pertinente. Por lo que, se requiere de calcular los valores de ajuste de voltaje, corriente y velocidad para modificar los parámetros de la primera sección del sistema triple difuso.

La tercera sección del sistema triple difuso conocido como sistema difuso de ajuste, tiene como objetivo modificar abruptamente o paulatinamente los parámetros de voltaje, corriente y velocidad. Los datos de entrada para calcular los valores de ajuste son la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz, la penetración y el error calculado.

De la misma manera que en la primera y segunda sección, el sistema difuso de ajuste determinará los nuevos conjuntos difusos de sus salidas con la implicación Mamdani, la base de conocimientos y la inferencia. Con la ecuación del centroide se calculó el valor real de los nuevos conjuntos de salidas de voltaje, corriente y velocidad de soldadura los cuales se ponderarán a los valores originales de la primera sección, modificándolos y de manera iterativa calcular la calidad aproximada. La base de datos estará conformada por 108 reglas lingüísticas, obtenidas por el número de combinaciones posibles con respecto al número de valores lingüísticos de las variables lingüísticas de los nuevos conjuntos de antecedentes de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y el error calculado. En el Anexo E, se encuentra la tabla de las 108 combinaciones de reglas lingüísticas del sistema difuso de ajuste. En donde MP es muy poco, P es poco, S es suficiente y D es demasiado para los conjuntos de antecedentes. Para el conjunto de consecuente se tiene que CN es cambio negativo, SC es sin cambio y CP es cambio positivo.

A continuación, se presentarán las aproximaciones de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración de la primera y segunda variante del sistema triple difuso. Cabe mencionar que, la primera variante es diferente de la segunda variante debido a las modificaciones internas de los valores lingüísticos de las reglas difusas en cada sección del sistema triple difuso. Es debido a esas modificaciones que las salidas calculadas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y la penetración de la primera y segunda variante son diferentes. Las aproximaciones se pueden observar en la Tabla 5. 15, en donde C es la corona, R es la raíz y P es la penetración.

Tabla 5. 15 Resultados de las dos variantes del sistema triple difuso que aproxima la geometría del cordón de soldadura.

Soldadura	Mediciones de las salidas reales			Primera variante del sistema triple difuso			Segunda variante del sistema triple difuso		
				Mediciones de las salidas calculadas			Mediciones de las salidas calculadas		
	C	R	P	C	R	P	C	R	P
1	3	0	6	2.13	2	6	2	1.31	6
2	2	2	6	2	1.21	4.88	2	0.32	4.12
3	2	0	3.2	2	0.381	4	2	0.0002	4
4	2	2	6	2	2	6	2	2	6
5	2	0	3	1.55	0.42	2.63	2	0.0002	4
6	2	2	6	2	1.18	4.85	2.04	1.84	6
7	2	0	4.5	2	0.4099	4	2	0.65	4.53
8	2	2	6	2	2	6	2	2	6
9	2.1	2	6	2.07	2	6	2	1.31	6
10	2	0	5	2	0.381	4	2	0.0002	4

Las salidas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración se utilizarán como datos de entrada para la segunda sección del sistema triple difuso para aproximar la calidad. Los resultados de las dos variantes del sistema triple difuso que aproxima la calidad se pueden observar en la Tabla 5. 16.

Tabla 5. 16 Evaluación de los dos sistemas de control difuso que aproximan la calidad.

Soldadura	Primera variante del sistema triple difuso		Segunda variante del sistema triple difuso	
	Calidad de las mediciones de las salidas reales	Calidad de las mediciones de las salidas calculadas	Calidad de las mediciones de las salidas reales	Calidad de las mediciones de las salidas calculadas
1	1	1	1	1
2	1	0.67	1	0.58
3	0.34	0.4	0.34	0.4
4	1	1	1	1
5	0.31	0.27	0.31	0.4
6	1	0.65	1	1
7	0.4	0.4	0.4	0.7
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	0.71	0.4	0.4	0.4

Se calculó el error de cada variante del sistema triple difuso. El error es la diferencia entre la calidad real con la calidad aproximada. A demás, se midió el tiempo en que tarda el código en compilar. Los resultados del error y del tiempo se pueden ver en la Tabla 5. 17.

Tabla 5. 17 Calculo del error y el tiempo que tarda en compilar las dos variantes del sistema triple difuso desarrollados.

Soldadura	Error		Tiempo	
	Primera variante del sistema triple difuso	Segunda variante del sistema triple difuso	Primera variante del sistema triple difuso	Segunda variante del sistema triple difuso
1	0	0	1.0632 s	1.1241 s
2	0.33	0.41		
3	-0.06	-0.05		
4	0	0		
5	0.04	-0.08		
6	0.35	0		
7	0	-0.3		
8	0	0		
9	0	0		
10	0.31	0		

Como se puede observar, los resultados de los errores que presenta la primera variante del sistema triple difuso tienen un 70 % de valores cercanos al cero. Mientras que, la segunda variante del sistema triple difuso tiene hasta un 80 % de valores cercanos al cero. Por lo que, se seleccionó la segunda variante del sistema triple difuso, para calcular los valores de ajuste en la sección del sistema difuso de ajuste. Con los valores de ajuste se infiere que, el error disminuirá y mejorará la aproximación de las salidas.

Dicho todo lo anterior, se tomó como valores de entradas la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz, la penetración y el error para realizar los cálculos correspondientes en el sistema difuso de ajuste, tal como se observa en la Tabla 5.18.

Tabla 5. 18 Datos de entrada del sistema difuso de ajuste para calcular los valores de ajuste.

Soldadura	Concavidad de la corona (mm)	Concavidad de la raíz (mm)	Penetración (mm)	Error
1	2	1.31	6	0
2	2	0.32	4.12	0.41
3	2	0.0002	4	-0.05
4	2	2	6	0
5	2	0.0002	4	-0.08
6	2.04	1.84	6	0
7	2	0.65	4.53	-0.3
8	2	2	6	0
9	2	1.31	6	0
10	2	0.0002	4	0

El código del sistema triple difuso trabajó hasta cinco iteraciones, con un tiempo de compilación de 7.12 segundos para calcular los valores de ajustes y modificar los datos de entrada del voltaje, corriente y velocidad. A continuación, se mostrarán los valores de ajustes calculados, los valores modificados y las salidas aproximadas del proceso GMAW semiautomatizado. Los valores de ajustes y los valores modificados se pueden observar en la Tabla 5. 19, Tabla 5. 21, Tabla 5. 23 y Tabla 5. 25. Las salidas aproximadas se pueden observar en la Tabla 5. 20,

Tabla 5. 22, Tabla 5. 24 y Tabla 5. 26.

Tabla 5. 19 Valores de ajuste calculados en la primera iteración y los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad.

Soldadura	Valores de ajuste			Valores modificados		
	Voltaje	Corriente	Velocidad	Voltaje	Corriente	Velocidad
1	0	0	0	26	205	9.38
2	0	1.13	-1.13	28	241.13	10.03
3	0	0.38	-0.38	28	240.38	12.31
4	0	0	0	24	240	11.67
5	0	0.56	-0.56	24	170.56	10.86
6	0	0	0	24	170	8.45
7	0	2.32	-2.32	28	172.32	6.81
8	0	0	0	24	240	10.15
9	0	0	0	26	205	9.64
10	0	0	0	28	170	7.14

Tabla 5. 20 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la segunda iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la primera iteración.

Soldadura	Valores modificados			Salidas calculadas			
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Concavidad de la corona (mm)	Concavidad de la raíz (mm)	Penetración (mm)	Calidad
1	26	205	9.38	2	1.30	5.99	0.99
2	28	241.13	10.03	2	1.71	5.50	0.88
3	28	240.38	12.31	2	0	3.99	0.40
4	24	240	11.67	2	1.99	5.99	0.99
5	24	170.56	10.86	2	0	3.99	0.40
6	24	170	8.45	2	1.83	5.99	0.99
7	28	172.32	6.81	2	0.20	4.08	0.52
8	24	240	10.15	2	1.99	5.99	0.99
9	26	205	9.64	2	1.30	5.99	0.99
10	28	170	7.14	2	0	4	0.40

Tabla 5. 21 Valores de ajuste calculados en la segunda iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.

Soldadura	Valores de ajuste			Valores modificados		
	Voltaje	Corriente	Velocidad	Voltaje	Corriente	Velocidad
1	0	0	0	26	205	9.38
2	0	0.85	-0.85	28	241.98	9.18
3	0	0.38	-0.38	28	240.76	11.93
4	0	0	0	24	240	11.67
5	0	0.56	-0.56	24	171.13	10.29
6	0	0	0	24	170	8.45
7	0	0.84	-0.84	28	173.17	5.96
8	0	0	0	24	240	10.15
9	0	0	0	26	205	9.64
10	0	0	0	28	170	7.14

Tabla 5. 22 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la tercera iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la segunda iteración.

Soldadura	Valores modificados			Salidas calculadas			
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Concavidad de la corona (mm)	Concavidad de la raíz (mm)	Penetración (mm)	Calidad
1	26	205	9.38	2	1.30	5.99	0.99
2	28	241.98	9.18	2	1.28	5.99	0.99
3	28	240.76	11.93	2	0	3.99	0.40
4	24	240	11.67	2	1.99	5.99	0.99
5	24	171.13	10.29	2	0	4	0.40
6	24	170	8.45	2	1.83	5.99	0.99
7	28	173.17	5.96	2	0.25	4.11	0.54
8	24	240	10.15	2	1.99	5.99	0.99
9	26	205	9.64	2	1.30	5.99	0.99
10	28	170	7.14	2	0	4	0.40

Tabla 5. 23 Valores de ajuste calculados en la tercera iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.

Soldadura	Valores de ajuste			Valores modificados		
	Voltaje	Corriente	Velocidad	Voltaje	Corriente	Velocidad
1	0	0	0	26	205	9.38
2	0	0	0	28	241.99	9.18
3	0	0.38	-0.38	28	241.15	11.54
4	0	0	0	24	240	11.67
5	0	0.56	-0.56	24	171.69	9.73
6	0	0	0	24	170	8.45
7	0	1.07	-1.07	28	174.25	4.88
8	0	0	0	24	240	10.15
9	0	0	0	26	205	9.64
10	0	0	0	28	170	7.14

Tabla 5. 24 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la cuarta iteración con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la tercera iteración.

Soldadura	Valores modificados			Salidas calculadas			
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Concavidad de la corona (mm)	Concavidad de la raíz (mm)	Penetración (mm)	Calidad
1	26	205	9.38	2	1.30	5.99	0.99
2	28	241.98	9.18	2	1.28	5.99	0.99
3	28	241.15	11.54	2	0	3.99	0.40
4	24	240	11.67	2	1.99	5.99	0.99
5	24	171.69	9.73	2	0.45	4.16	0.66
6	24	170	8.45	2	1.83	5.99	0.99
7	28	174.25	4.88	2	0.32	4.14	0.58
8	24	240	10.15	2	1.99	5.99	0.99
9	26	205	9.64	2	1.30	5.99	0.99
10	28	170	7.14	2	0	4	0.40

Tabla 5. 25 Valores de ajuste calculados en la cuarta iteración y los valores modificados del voltaje, corriente y velocidad.

Soldadura	Valores de ajuste			Valores modificados		
	Voltaje	Corriente	Velocidad	Voltaje	Corriente	Velocidad
1	0	0	0	26	205	9.38
2	0	0	0	28	241.99	9.18
3	0	0.38	-0.38	28	241.53	11.16
4	0	0	0	24	240	11.67
5	0	1.90	-1.90	24	173.60	7.82
6	0	0	0	24	170	8.45
7	0	1.19	-1.19	28	175.44	3.69
8	0	0	0	24	240	10.15
9	0	0	0	26	205	9.64
10	0	0	0	28	170	7.14

Tabla 5. 26 Aproximación de la geometría del cordón de soldadura y la calidad en la quinta iteración, con los valores modificados de voltaje, corriente y velocidad de la cuarta iteración.

Soldadura	Valores modificados			Salidas calculadas			
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Concavidad de la corona (mm)	Concavidad de la raíz (mm)	Penetración (mm)	Calidad
1	26	205	9.38	2	1.30	5.99	0.99
2	28	241.99	9.18	2	1.28	5.99	0.99
3	28	241.53	11.16	2	0.33	4.12	0.59
4	24	240	11.67	2	1.99	5.99	0.99
5	24	173.60	7.82	2	1.29	5.99	0.99
6	24	170	8.45	2	1.83	5.99	0.99
7	28	175.44	3.69	2	0.37	4.18	0.61
8	24	240	10.15	2	1.99	5.99	0.99
9	26	205	9.64	2	1.30	5.99	0.99
10	28	170	7.14	2	0	4	0.40

Se calculó el error en las cinco iteraciones. En la tercera iteración mostró la mejor aproximación de resultados en un 90 %. Se observó que, las modificaciones de los valores de entrada de la corriente y la velocidad son los responsables de la disminución o el incremento del error en cada iteración como se puede observar en la Tabla 5. 27.

Tabla 5. 27 Disminución del error tras cada iteración.

Soldadura	Primera iteración	Segunda iteración	Tercera iteración	Cuarta iteración	Quinta iteración
1	0	0	0	0	0
2	0.41	0.11	0	0	0
3	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.24
4	0	0	0	0	0
5	-0.08	-0.08	-0.08	-0.34	-0.68
6	0	0	0	0	0
7	-0.30	-0.12	-0.14	-0.18	-0.21
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0

5.2 Proceso de soldadura GMAW robotizado

5.2.1 Diseño de experimentos

A continuación, se mostrará el primer diseño de experimentos 2^5 con cuatro puntos centrales del proceso GMAW robotizado en la Tabla 5. 28. La información del diseño de experimentos fue utilizada para realizar inferencias sobre el comportamiento normal y la dependencia de las variables de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out, abertura de raíz, concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración.

Tabla 5. 28 Primer diseño de experimentos 2⁵ para el proceso GMAW robotizado.

Soldadura	Voltaje (V)	Velocidad de alimentación de hilo (m/min)	Velocidad de avance del robot (m/min)	Stick out (cm)	Abertura de raíz (mm)	Corona (mm)	Raíz (mm)	Penetración (mm)
1	24	350	0.4	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
2	24	250	0.6	1.5	5	0.3812	0.0002	1.3916
3	24	350	0.4	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
4	27	300	0.5	1.7	3	1.7291	0.443	4
5	24	250	0.4	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
6	24	350	0.6	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
7	24	250	0.6	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
8	30	350	0.4	1.5	5	0.3812	1.9998	3.9999
9	30	250	0.4	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
10	30	350	0.4	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
11	27	300	0.5	1.7	3	1.7291	0.443	4
12	24	350	0.6	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
13	30	250	0.6	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
14	30	350	0.6	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
15	30	250	0.6	1.5	5	0.3812	0.0002	1.3916
16	30	250	0.4	2	5	0.3812	1.9998	1.3916
17	24	350	0.4	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
18	27	300	0.5	1.7	3	1.7291	0.443	4
19	24	350	0.6	1.5	5	0.3812	1	3.9999
20	30	250	0.6	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
21	30	250	0.4	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
22	30	350	0.4	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
23	30	350	0.6	1.5	0	2.0002	0.0002	1.3915
24	30	250	0.4	1.5	5	0.3812	0.0002	1.3916
25	30	250	0.6	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
26	24	350	0.6	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
27	24	250	0.4	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
28	30	350	0.6	2	5	0.3812	0.0002	1.3916
29	24	250	0.4	1.5	0	0.3813	0.0002	1.3915
30	24	250	0.6	1.5	0	1.25	0.0002	1.3915
31	24	250	0.6	2	0	2.0002	0.0002	1.3915
32	30	350	0.6	1.5	5	0.3812	0.0002	1.3916
33	30	350	0.4	2	5	0.3812	1.9998	3.9999

34	24	350	0.4	1.5	5	1.25	1.9998	5.9994
35	27	300	0.5	1.7	3	1.7291	0.443	4
36	24	250	0.4	1.5	5	0.3812	1	1.3916

El diseño factorial 2^5 del proceso GMAW robotizado cuenta con las siguientes características:

- Diseño: 2^5 con cuatro puntos centrales en el diseño de experimentos para verificar la variabilidad o normalidad del proceso de soldadura GMAW robotizado.
- Variables independientes o patrones de entrada: Voltaje (V), Velocidad de alimentación de hilo (Vh), Velocidad de avance del robot (Vr), Stick out (S) y Abertura de raíz (A).
- Variables dependientes o respuestas: Concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad.

El diseño de experimento factorial está conformado por 32 combinaciones con cuatro puntos centrales, teniendo un total de 36 patrones tal como se muestra en la Tabla 5. 28. Haciendo hincapié en la selección de los datos de entrada para un proceso robotizado, se realizaron varias pruebas preliminares para realizar cordones de soldaduras superficiales como se muestra en la Figura 5. 18. Se realizaron pruebas preliminares para asegurar que las variables descritas anteriormente puedan generar un cordón de soldadura, en una placa de aluminio 5052-H32 y unidos con un micro alambre ER5183 cuya composición química es similar al micro alambre ER5356.

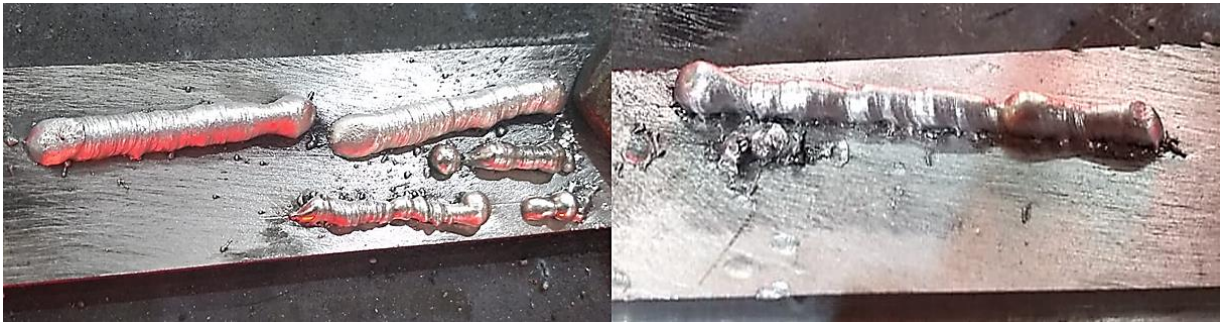


Figura 5. 18 Ejemplos de algunas experimentaciones preliminares.

En esta investigación se estará rigiendo por el código estructural del aluminio AWS D1.2, en donde la selección del micro alambre para unir placas de aleaciones de aluminio 5052-H32 es mencionado. De acuerdo con el código estructural del aluminio D1.2, se puede emplear el micro alambre ER5356 o el ER5183 debido a la similitud en sus composiciones químicas como se puede observar en la Tabla 5. 29.

Tabla 5. 29 Composición química de los micro alambres que son compatibles para unir placas de aleación de aluminio 5052.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ER5356	0.25 <i>max</i>	0.40 <i>max</i>	0.10 <i>max</i>	0.05 – 0.20	4.5 – 5.5	0.05 – 0.20	0.10 <i>max</i>	0.06 – 0.20	<i>Bal</i>
ER5183	0.40 <i>max</i>	0.40 <i>max</i>	0.10 <i>max</i>	0.05 – 1.0	4.30 – 5.20	0.05 – 0.25	0.25 <i>max</i>	0.15 <i>max</i>	<i>Bal</i>

Los parámetros de entrada se utilizarán en las técnicas seleccionadas en esta investigación, las cuales medidas de tendencia central, pruebas de normalidad, medidas de dependencia, regresión lineal, simple, regresión lineal múltiple, lógica difusa y redes neuronales artificiales.

5.2.2 Medidas de tendencia central

Se calcularon los valores de la media, mediana y moda de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out y abertura de raíz del proceso GMAW robotizado. Los cálculos de la media, mediana y moda se muestran en la Tabla 5. 30.

Tabla 5. 30 Relación de las medidas de tendencia central de las variables del proceso GMAW robotizado.

Variable	Media	Mediana	Moda	Relación
Voltaje	27	27	24	Moda<Mediana=Media
Velocidad de hilo	300	300	250	Moda<Mediana=Media
Velocidad de robot	0.50	0.50	0.40	Moda<Mediana=Media
Stick out	1.744	1.700	1.50	Moda<Mediana<Media
Abertura de raíz	2.556	3	0	Moda<Mediana<Media

Las variables de entrada de voltaje, velocidad de hilo y velocidad de robot no presentaron relaciones asimétricas o simétricas. Mientras que las variables de stick out y abertura de raíz presentaron una relación asimétrica hacia la derecha. Debido a los cálculos de las medidas de tendencia central, se puede inferir que las variables de entrada del proceso GMAW robotizado no presentan un comportamiento normal.

Aunque las medidas de tendencia central son fáciles de calcular y pueden demostrar el comportamiento normal de las variables de entrada, existen otros métodos para determinar el comportamiento normal de los datos. En la siguiente sección, se calculará la normalidad de los datos con la prueba de normalidad Anderson-Darling.

5.2.3 Prueba de normalidad

Las pruebas de normalidad son métodos estadísticos que permiten determinar si los conjuntos de datos siguen una distribución normal. Dicho esto, se muestra los resultados de la prueba Anderson-Darling sobre las variables del proceso GMAW robotizado en la Tabla 5. 31. La prueba Anderson-Darling se realizó en el programa Minitab.

Tabla 5. 31 Prueba de normalidad Anderson-Darling para el proceso GMAW robotizado del primer diseño de experimentos.

Variable	AD	Hipótesis
Voltaje	4.69	No se rechaza la H_0
Velocidad de hilo	4.69	No se rechaza la H_0
Velocidad de robot	4.69	No se rechaza la H_0
Stick out	4.77	No se rechaza la H_0
Abertura de raíz	4.77	No se rechaza la H_0
Concavidad de la corona	4.66	No se rechaza la H_0
Concavidad de la raíz	7.32	No se rechaza la H_0
Penetración	8.25	No se rechaza la H_0

Para rechazar o no rechazar la hipótesis nula con el coeficiente calculado de Anderson-Darling por el programa Minitab, se utilizará la siguiente relación:

- Si $AD = 0$, entonces los datos siguen una distribución normal por lo que se rechaza la H_0 .
- Si $AD \neq 0$, entonces los datos no siguen una distribución normal por lo que no se rechaza la H_0 .

Debido a los resultados obtenidos de la prueba de normalidad Anderson-Darling, se puede concluir que las variables de entrada y de salida para el proceso GMAW robotizado no tienen un comportamiento normal. Por lo que, se puede afirmar que emplear técnicas estadísticas con la suposición de que las variables del proceso de soldadura tienen un comportamiento normal no es lo más indicado para calcular, predecir o aproximar las salidas de interés.

5.2.4 Medidas de dependencia y la recta ajustada de regresión lineal simple

De la misma manera en que se realizó el análisis de la dependencia de las variables del proceso GMAW semiautomatizado, se graficó los diagramas de dispersión y la recta ajustada de regresión lineal simple para las variables del proceso GMAW robotizado. A continuación, se mostrarán los diagramas de dispersión, la recta ajustada de regresión lineal simple y las inferencias correspondientes para cada combinación posible de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out, abertura de raíz, concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración.

De acuerdo con la Figura 5. 19, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs velocidad de hilo en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Velocidad\ hilo = 300 - 0\ voltaje$ y se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre voltaje vs velocidad de hilo.

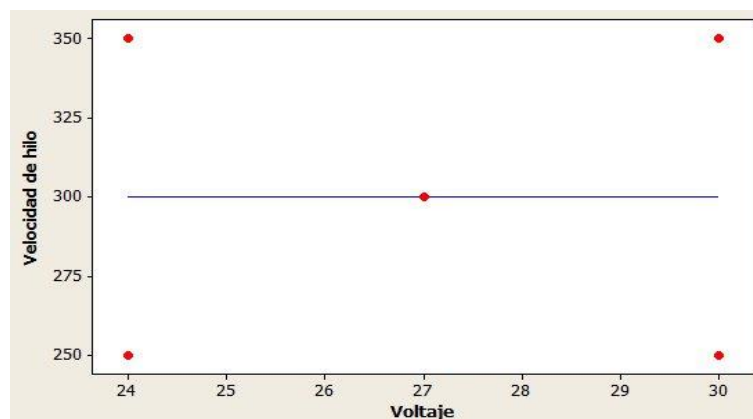


Figura 5. 19 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad de hilo.

Al observar la Figura 5. 20, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de voltaje vs velocidad de robot en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Velocidad\ de\ robot = 0.50 + 0\ voltaje$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre voltaje vs velocidad de robot.

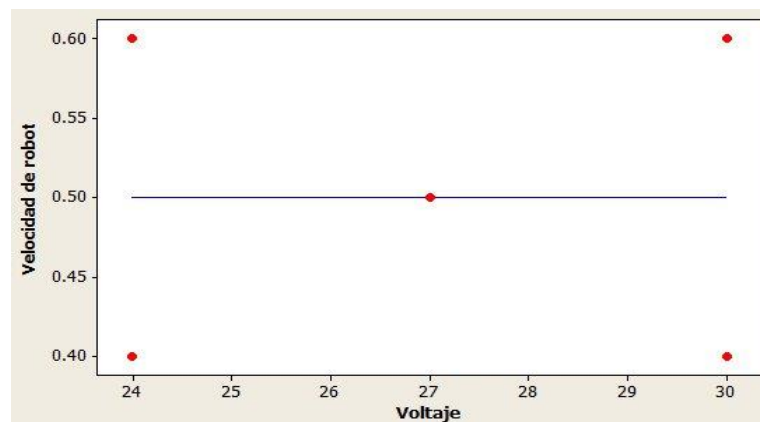


Figura 5. 20 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Velocidad de robot.

Como se puede observar en la Figura 5. 21, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs stick out en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Stick\ out = 1.74 - 0\ voltaje$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre voltaje vs stick out.

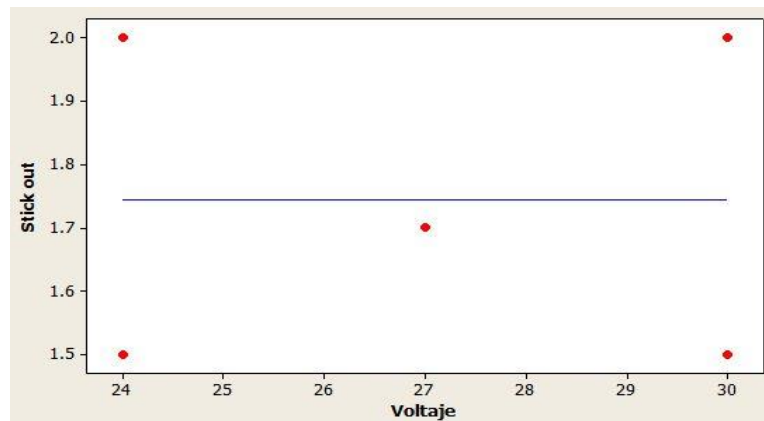


Figura 5. 21 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Stick out.

De acuerdo con la Figura 5. 22, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs abertura de raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Abertura\ de\ raíz = 2.56 - 0\ voltaje$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre voltaje vs abertura de raíz.

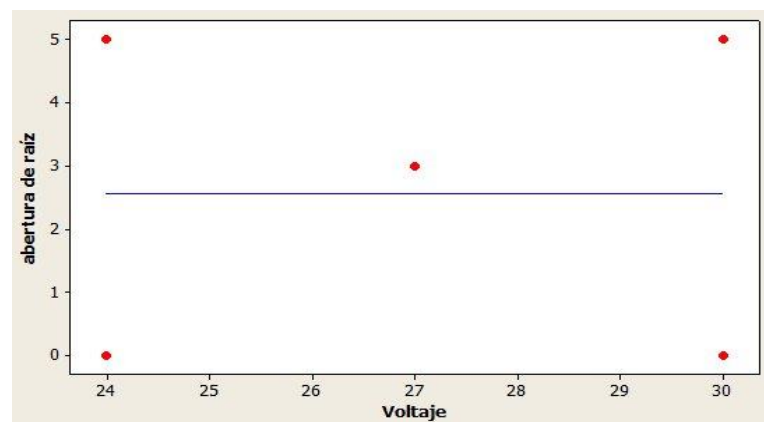


Figura 5. 22 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Abertura de raíz.

Al observar la Figura 5. 23, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs velocidad de robot en el programa Minitab. El diagrama de

dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Velocidad\ de\ robot = 0.50 + 0\ velocidad\ de\ hilo$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de hilo vs velocidad de robot.

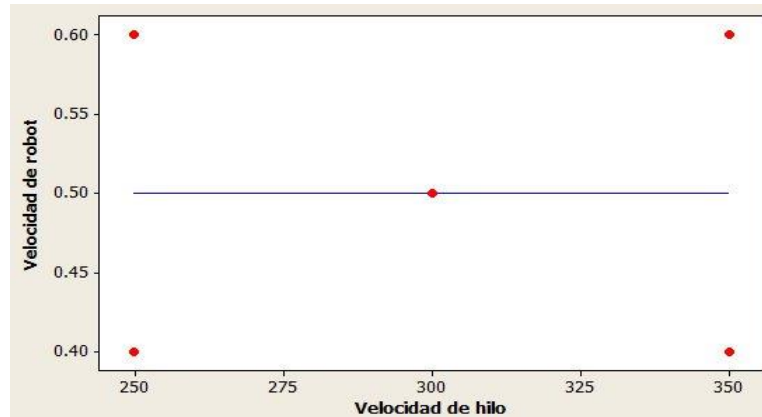


Figura 5. 23 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Velocidad de robot.

Como se puede observar en la Figura 5. 24, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs stick out en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Stick\ out = 1.74 + 0\ velocidad\ de\ hilo$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de hilo vs stick out.

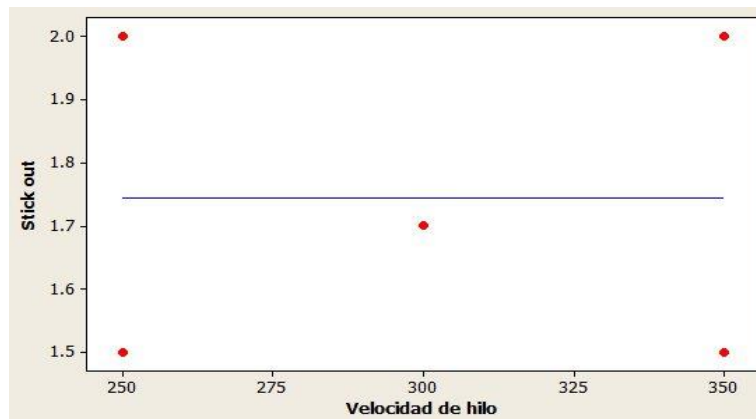


Figura 5. 24 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Stick out.

De acuerdo con la Figura 5. 25, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs abertura de raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Abertura\ de\ raíz = 2.56 - 0\ velocidad\ de\ hilo$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de hilo vs abertura de raíz.

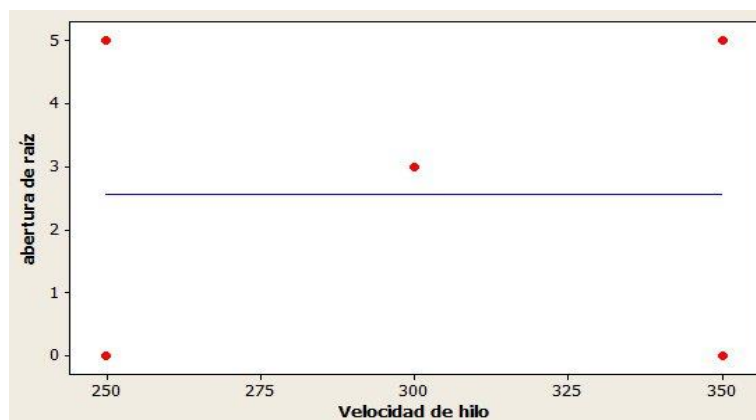


Figura 5. 25 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Abertura de raíz.

Al observar la Figura 5. 26, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de velocidad de robot vs stick out en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no

muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Stick\ out = 1.74 + 0\ velocidad\ de\ robot$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de robot vs stick out.

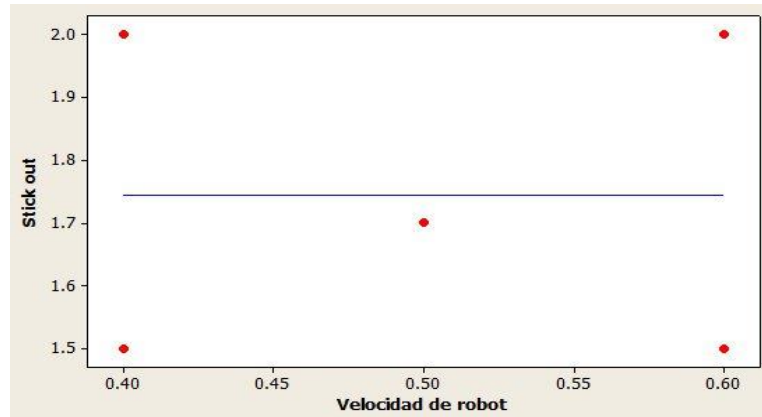


Figura 5. 26 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Stick out.

Como se puede observar en la Figura 5. 27, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de robot vs abertura de raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Abertura\ de\ raíz = 2.56 + 0\ velocidad\ de\ robot$. Se puede observar una recta completamente horizontal. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de robot vs abertura de raíz.

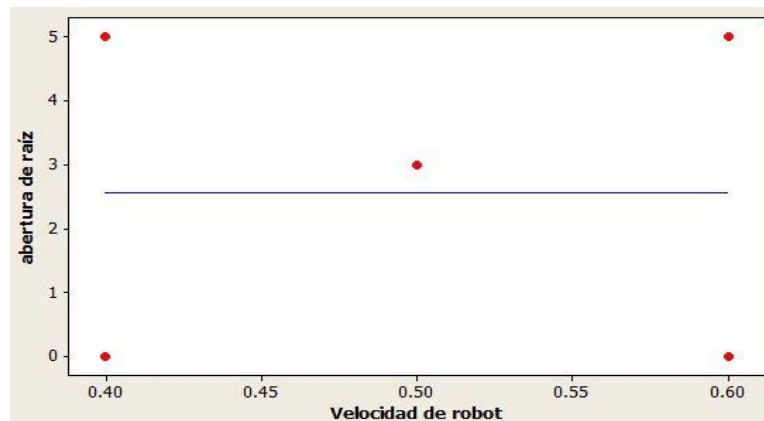


Figura 5. 27 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Abertura de raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 28, se trazó el diagrama de dispersión de stick out vs abertura de raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Abertura\ de\ raíz = 2.63 - 0.04\ stick\ out$. Se puede observar una recta ligeramente descendente. La recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre stick out vs abertura de raíz es decir que, al incrementar el stick out disminuye demasiado poco la abertura de raíz.

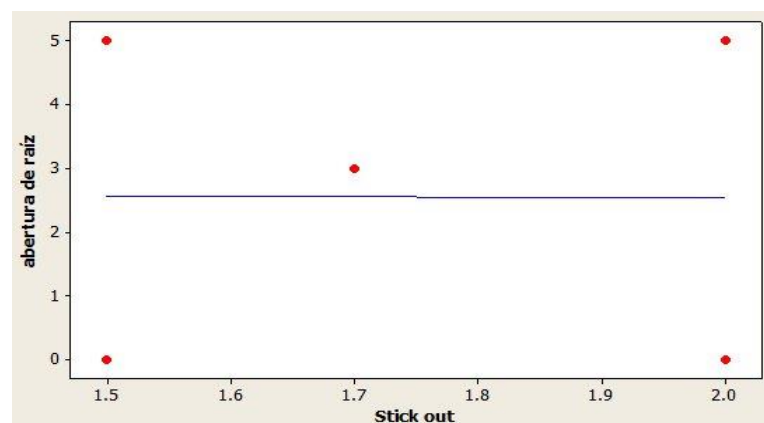


Figura 5. 28 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Stick out.

Al observar la Figura 5. 29, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de voltaje vs concavidad de la corona en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación *Concavidad corona* = $0.79 + 0.0156 \text{ voltaje}$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de voltaje y concavidad de la corona a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre voltaje vs concavidad de la corona es decir que, al incrementar el voltaje aumenta muy poco la concavidad de la corona.

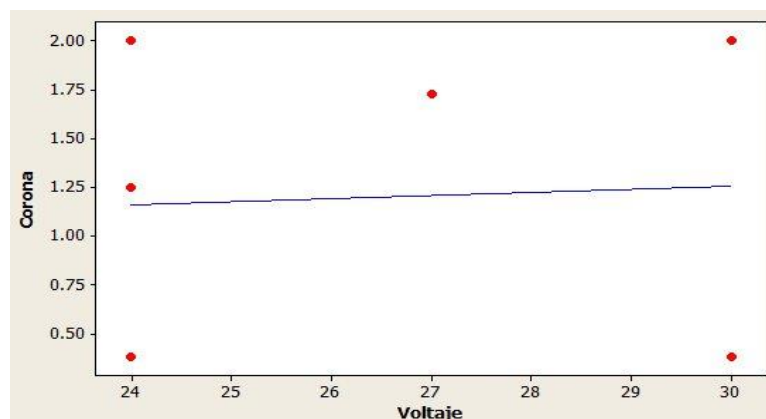


Figura 5. 29 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Concavidad corona.

Como se puede observar en la Figura 5. 30, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs concavidad de raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación *Concavidad raíz* = $-0.24 + 0.0208 \text{ voltaje}$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de voltaje y concavidad de raíz a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre

voltaje vs concavidad de raíz es decir que, al incrementar el voltaje aumenta muy poco la concavidad de raíz.

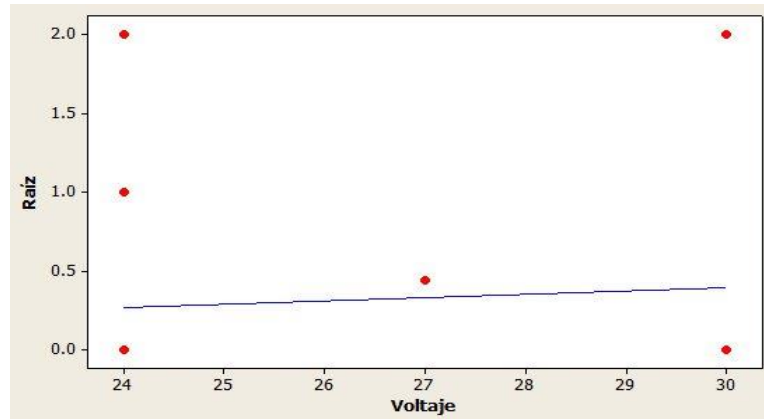


Figura 5. 30 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Concavidad de la raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 31, se trazó el diagrama de dispersión de voltaje vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Penetración = 2.59 - 0.0208 \text{ voltaje}$. Se puede observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de voltaje y penetración a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre voltaje vs penetración es decir que, al incrementar el voltaje disminuye muy poco la penetración.

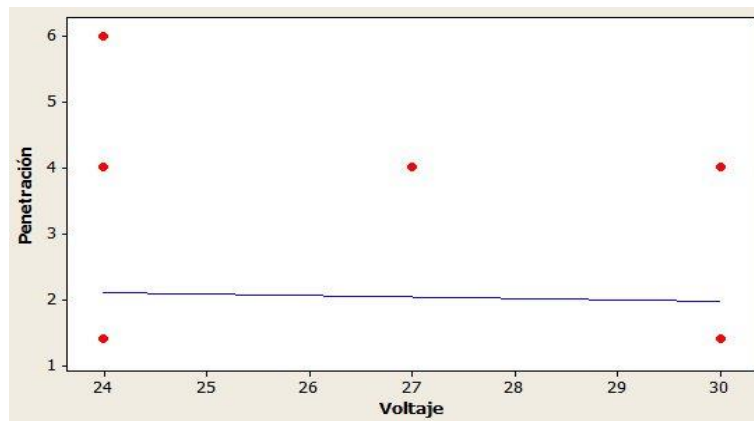


Figura 5. 31 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Voltaje vs Penetración.

Al observar la Figura 5. 32, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs concavidad de la corona en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ corona = 0.602 + 0.00202\ velocidad\ de\ hilo$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de velocidad de hilo y concavidad de la corona a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre velocidad de hilo vs concavidad de la corona es decir que, al incrementar la velocidad de hilo aumenta muy poco la concavidad de la corona.

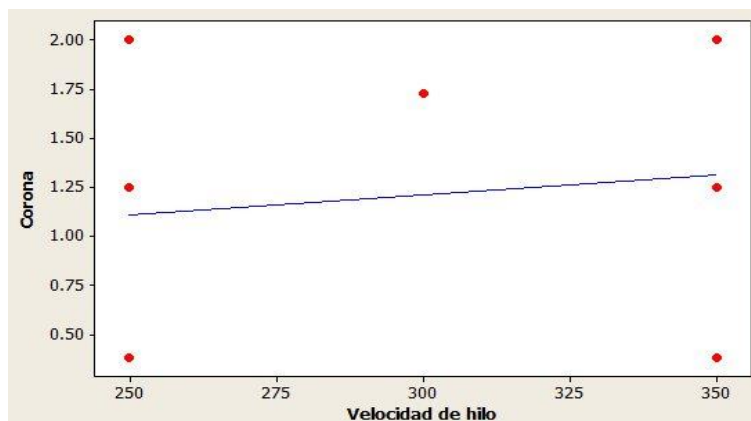


Figura 5. 32 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Concavidad de la corona.

Como se puede observar en la Figura 5. 33, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs concavidad de la raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple. Al trazar la recta ajustada de regresión lineal simple con la ecuación $\text{Concavidad raíz} = -0.423 + 0.00250 \text{ velocidad de hilo}$, se puede graficar y observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de velocidad de hilo y concavidad de la raíz a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre velocidad de hilo vs concavidad de la raíz es decir que, al incrementar la velocidad de hilo aumenta muy poco la concavidad de la raíz.

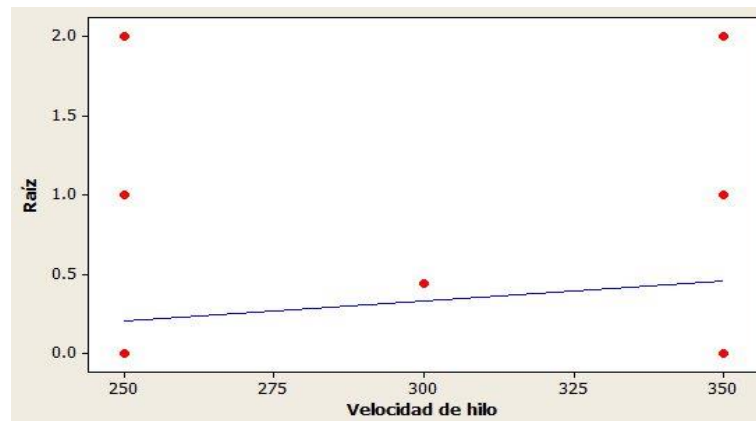


Figura 5. 33 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Concavidad de la raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 34, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de hilo vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Penetración = -0.30 + 0.00777 \text{ velocidad de hilo}$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de velocidad de hilo y penetración a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre velocidad de hilo vs penetración es decir que, al incrementar la velocidad de hilo aumenta poco la penetración.

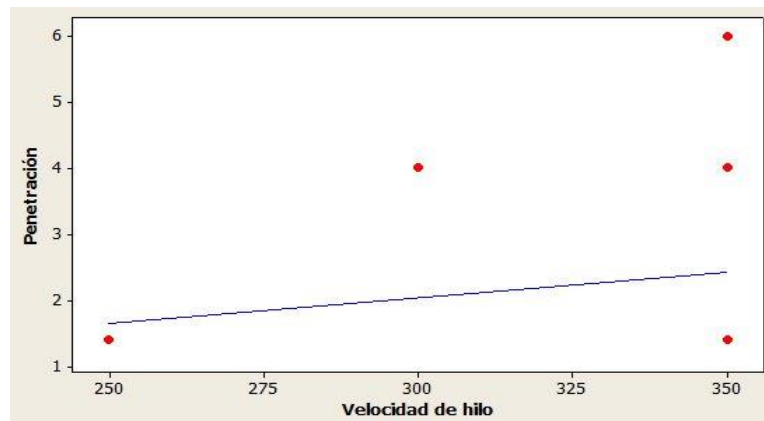


Figura 5. 34 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de hilo vs Penetración.

Al observar la Figura 5. 35, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de velocidad de robot vs concavidad de la corona en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ corona = 1.21 - 0\ velocidad\ de\ robot$. Se puede observar una recta completamente horizontal, confirmando la relación nula del diagrama de dispersión. Una recta completamente horizontal es un indicativo de una dependencia nula entre velocidad de robot vs concavidad de la corona.

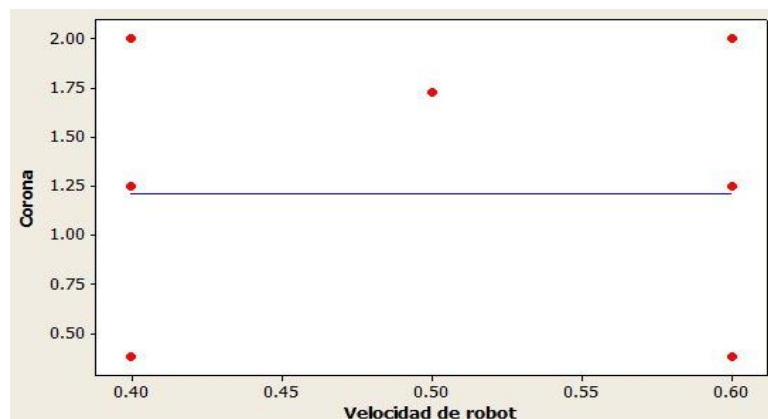


Figura 5. 35 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Concavidad de la corona.

Como se puede observar en la Figura 5. 36, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de robot vs concavidad de la raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $\text{Concavidad corona} = 1.58 - 2.50 \text{ velocidad de robot}$. Se puede observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de velocidad de robot y concavidad de la raíz a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre velocidad de robot vs concavidad de la raíz es decir que, al incrementar la velocidad de robot disminuye poco la concavidad de la raíz.

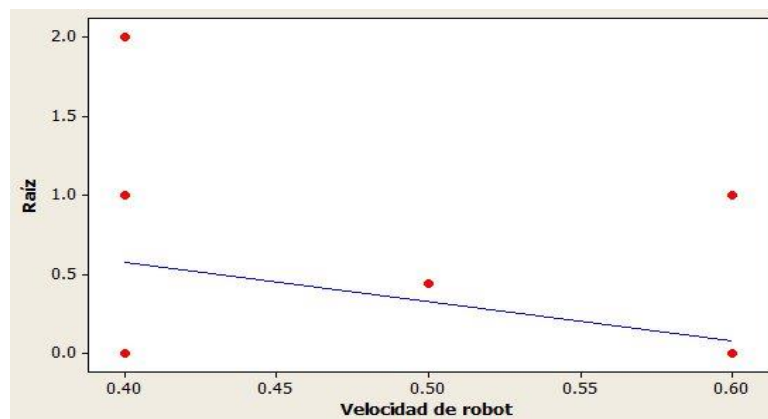


Figura 5. 36 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Concavidad de la raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 37, se trazó el diagrama de dispersión de velocidad de robot vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $\text{Penetración} = 3.15 - 2.26 \text{ velocidad de robot}$. Se puede observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de velocidad de robot y penetración a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una

relación nula. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre velocidad de robot vs penetración es decir que, al incrementar la velocidad de robot disminuye muy poco la penetración.

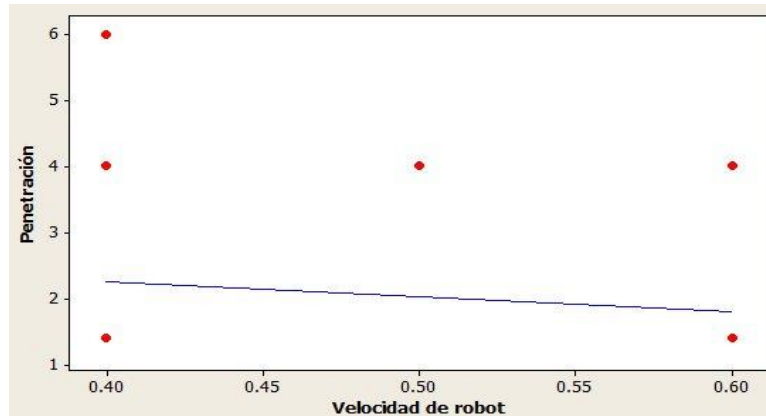


Figura 5. 37 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Velocidad de robot vs Penetración.

Al observar la Figura 5. 38, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de stick out vs concavidad de la corona en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ de\ la\ corona = -0.30 + 0.00777\ stick\ out$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de stick out y concavidad de la corona a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre stick out vs concavidad de la corona es decir que, al incrementar el stick out aumenta muy poco la concavidad de la corona.

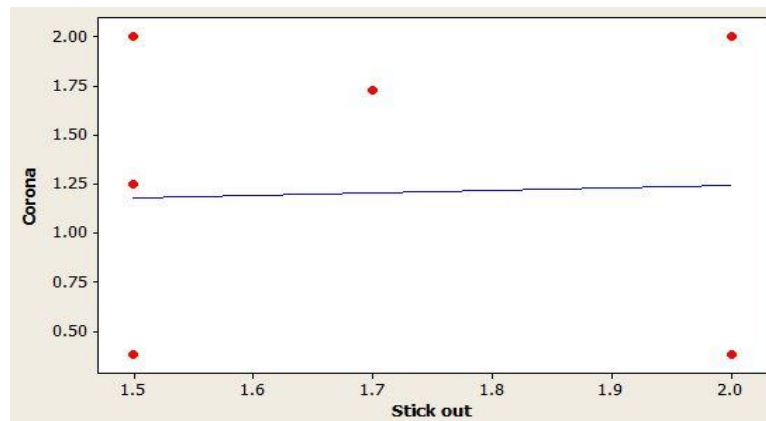


Figura 5. 38 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Concavidad de la corona.

Como se puede observar en la Figura 5. 39, se trazó el diagrama de dispersión de stick out vs concavidad de la raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ raíz = 0.781 - 0.260\ stick\ out$. Se puede observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de stick out y concavidad de la raíz a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre velocidad de robot vs penetración es decir que, al incrementar el stick out disminuye muy poco la concavidad de la raíz.

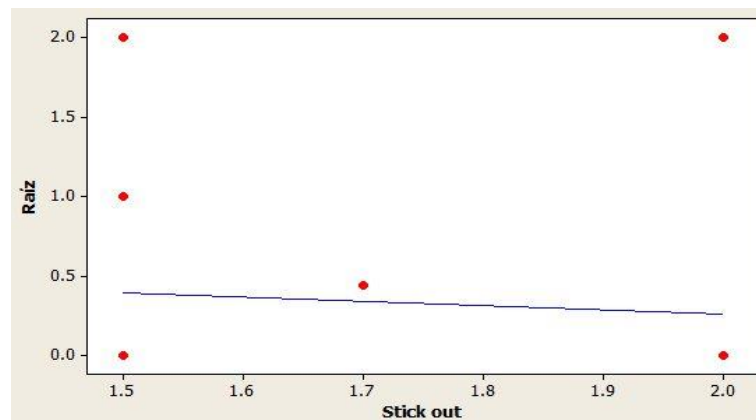


Figura 5. 39 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Concavidad de la raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 40, se trazó el diagrama de dispersión de stick out vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Penetración = 0.781 - 0.260 \text{ stick out}$. Se puede observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de stick out y penetración a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta descendente es un indicativo de dependencia negativa entre stick out vs penetración es decir que, al incrementar el stick out disminuye muy poco la penetración.

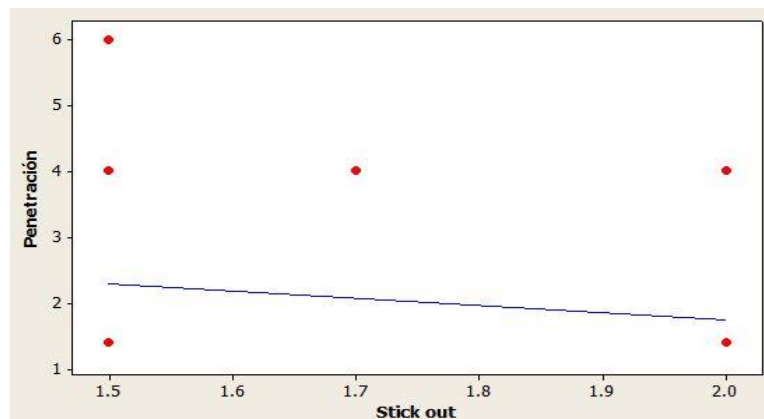


Figura 5. 40 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Stick out vs Penetración.

Al observar la Figura 5. 41, se encuentra el trazó del diagrama de dispersión de abertura de raíz vs concavidad de la corona en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ corona = 1.92 - 0.277 \text{ abertura de raíz}$. Se puede graficar y observar una recta descendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de abertura de raíz y concavidad de la corona a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta

descendente es un indicativo de dependencia negativa entre abertura de raíz vs concavidad de la corona es decir que, al incrementar la abertura de raíz disminuye mucho la concavidad de la corona.

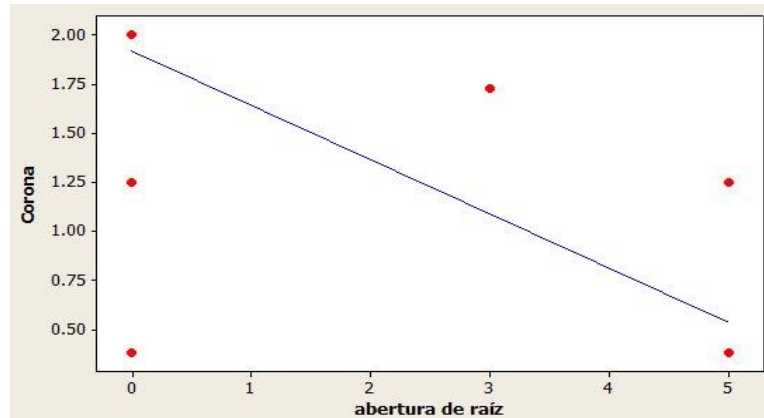


Figura 5. 41 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Concavidad de la corona.

Como se puede observar en la Figura 5. 42, se trazó el diagrama de dispersión de abertura de raíz vs concavidad de la raíz en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Concavidad\ raíz = 0.06 + 0.126\ abertura\ de\ raíz$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de abertura de raíz y concavidad de la raíz a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre abertura de raíz vs concavidad de la raíz es decir que, al incrementar la abertura de raíz aumenta poco la concavidad de la raíz.

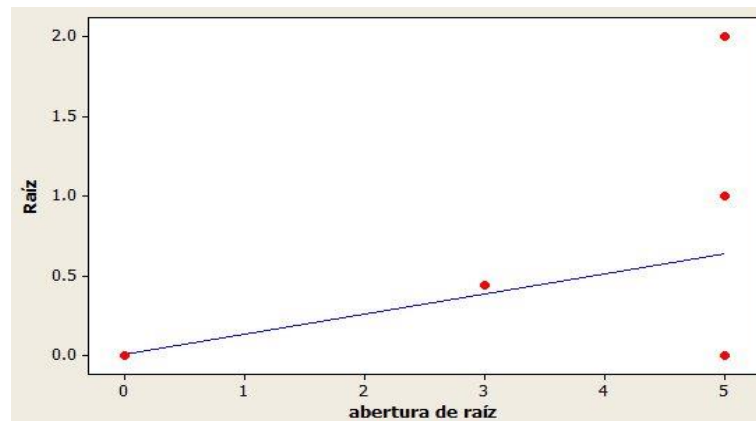


Figura 5. 42 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Concavidad de la raíz.

De acuerdo con la Figura 5. 43, se trazó el diagrama de dispersión de abertura de raíz vs penetración en el programa Minitab. El diagrama de dispersión no muestra una relación positiva o negativa, por lo que se infiere que estas variables no tienen una relación. Para validar la inferencia anterior se realizó el análisis de regresión lineal simple con la ecuación $Penetración = 1.58 + 0.174 \text{ abertura de raíz}$. Se puede observar una recta ascendente. Por lo que, existe una relación entre las variables de abertura de raíz y penetración a pesar de que la gráfica de dispersión mostrara una relación nula. Una recta ascendente es un indicativo de dependencia positiva entre abertura de raíz vs penetración es decir que, al incrementar la abertura de raíz aumenta poco la penetración.

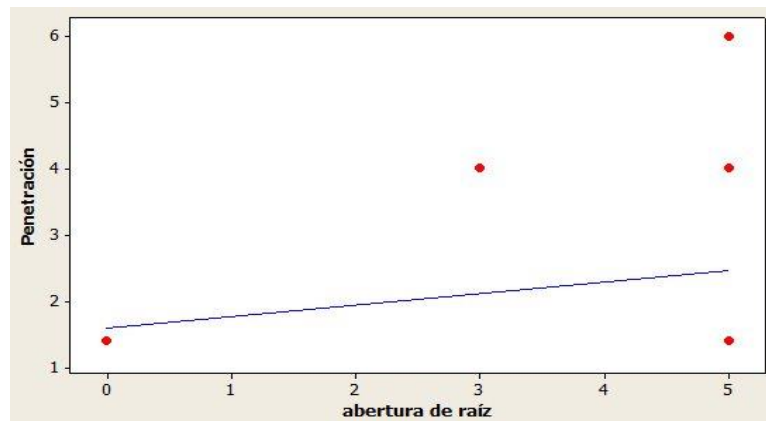


Figura 5. 43 Diagrama de dispersión con recta de regresión lineal Abertura de raíz vs Penetración.

Se puede afirmar que, los diagramas de dispersión son técnicas para determinar la dependencia de las variables de una manera visual y cualitativa. Para conocer el grado de dependencia de las variables del proceso GMAW robotizado de manera cuantitativa, se calcularon las medidas de dependencia de covarianza y coeficiente de correlación, las cuales se muestran en la Tabla 5. 32.

Tabla 5. 32 Medidas de dependencia de las variables del proceso GMAW robotizado.

Variable X - Variable Y	Covarianza	Coefficiente de correlación de Pearson
Voltaje - Velocidad de hilo	0	0
Voltaje - Velocidad de robot	0	0
Voltaje - Stick out	0	0
Voltaje-Abertura de raíz	0	0
Velocidad de hilo - Velocidad de robot	0	0
Velocidad de hilo - Stick out	0	0
Velocidad de hilo - Abertura de raíz	0	0
Velocidad de robot - Stick out	0	0
Velocidad de robot - Abertura de raíz	0	0
Stick out - Abertura de raíz	-0.00253	-0.004
Voltaje-Concavidad corona	0.1285	0.058
Voltaje-Concavidad raíz	0.1713	0.091
Voltaje-Penetración	-0.1713	-0.048
Velocidad de hilo-Concavidad corona	4.6256	0.125
Velocidad de hilo-Concavidad raíz	5.7131	0.183
Velocidad de hilo-Penetración	17.761	0.298
Velocidad de robot-Concavidad corona	0	0
Velocidad de robot-Concavidad raíz	-0.0228	-0.366
Velocidad de robot-Penetración	-0.0206	-0.173
Stick out-Concavidad corona	0.0077	0.042
Stick out-Concavidad raíz	-0.0149	-0.096
Stick out-Penetración	-0.0628	-0.210
Abertura de raíz-Concavidad corona	-1.5892	-0.860
Abertura de raíz-Concavidad raíz	0.7207	0.461
Abertura de raíz-Penetración	1.0009	0.335

Con los cálculos de covarianza y coeficiente de correlación de las variables de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out, abertura de raíz, concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración para el proceso GMAW robotizado, se puede inferir lo siguiente:

- Los datos de entrada del proceso GMAW robotizado no están correlacionados, exceptuando el stick out con la abertura de raíz. Sin embargo, el coeficiente de

correlación es muy pequeño, por lo que se deduce que tiene casi una nula correlación.

- El voltaje tiene muy poca correlación con las variables de salida. Se deduce que el voltaje tiene un efecto muy poco con la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración.
- La velocidad de hilo tiene una correlación mayor que el voltaje. Se puede inferir que la velocidad de hilo tiene un mayor efecto con las variables de salida.
- La velocidad de robot presenta correlaciones con la concavidad de la raíz y la penetración. La velocidad de robot presenta una correlación nula con la concavidad de la corona.
- El stick out presenta mejor correlación con la penetración. Sin embargo, se presenta muy poca correlación en la concavidad de la corona y concavidad de la raíz.
- La abertura de raíz presentó la mejor correlación con las variables de salida, en específico la concavidad de la corona.

En base a los resultados anteriores sobre la correlación, las variables de entrada del proceso de soldadura GMAW robotizado no están correlacionadas entre sí. Sin embargo, las variables de entrada con las salidas muestran alguna dependencia. Finalmente, la variable de entrada que presentó la mayor dependencia con las salidas de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y la penetración fue la abertura de raíz.

5.2.5 Modelo de regresión lineal simple

Como se explicó anteriormente, el análisis de regresión lineal tiene como finalidad aproximar una o varias respuestas de interés en procesos demasiados complejos, como por ejemplo los procesos de soldadura.

Las ecuaciones de regresión lineal simple fueron realizadas en el programa Minitab. Se obtuvieron un total de 15 ecuaciones en donde cinco ecuaciones aproximarán la concavidad de la corona, cinco ecuaciones la concavidad de la raíz y cinco ecuaciones la penetración. Las 15 ecuaciones se muestran en la Tabla 5. 33.

Tabla 5. 33 Ecuaciones de regresión lineal simple.

Variables dependientes	Ecuaciones de regresión lineal simples
Concavidad de la corona	$Y13 = 0.271 - 0.0009 \text{ Voltaje } X1$
	$Y14 = -0.444 + 0.00221 \text{ Velocidad hilo } X2$
	$Y15 = 0.679 - 0.884 \text{ Velocidad robot } X3$
	$Y16 = -1.41 + 0.942 \text{ Stick out } X4$
	$Y17 = 0.506 - 0.135 \text{ Abertura raíz } X5$
Concavidad de la raíz	$Y18 = 0.685 - 0.0177 \text{ Voltaje } X1$
	$Y19 = 0.173 - 0.000407 \text{ Velocidad hilo } X2$
	$Y20 = 0.150 - 0.206 \text{ Velocidad robot } X3$
	$Y21 = -0.330 + 0.216 \text{ Stick out } X4$
	$Y22 = 0.0885 - 0.0206 \text{ Abertura raíz } X5$
Penetración	$Y23 = 1.31 - 0.002 \text{ Voltaje } X1$
	$Y24 = -2.42 + 0.0119 \text{ Velocidad hilo } X2$
	$Y25 = 3.15 - 3.80 \text{ Velocidad robot } X3$
	$Y26 = -8.06 + 5.33 \text{ Stick out } X4$
	$Y27 = 2.42 - 0.587 \text{ Abertura raíz } X5$

A continuación, se mostrarán las salidas calculadas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración en las Tabla 5. 34, Tabla 5. 36 y Tabla 5. 38. Las salidas calculadas fueron ponderadas por las ecuaciones de regresión lineal simple de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración mostradas en la Tabla 5. 33. También se mostrarán el error calculado de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración en las Tabla 5. 35, Tabla 5. 37 y Tabla 5. 39 para determinar la factibilidad de las regresiones lineales simples.

Tabla 5. 34 Cálculos de la concavidad de la corona con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Concavidad de la corona				
	Y13	Y14	Y15	Y16	Y17
1	0.2413	0.34939	0.3254	0.003	0.371
2	0.2413	0.12618	0.1486	0.003	0.101
3	0.2413	0.34939	0.3254	0.474	0.101
4	0.2386	0.23668	0.237	0.1914	0.236
5	0.2413	0.12618	0.3254	0.474	0.101
6	0.2413	0.34939	0.1486	0.003	0.371
7	0.2413	0.12618	0.1486	0.474	0.101
8	0.2359	0.34939	0.3254	0.003	0.101
9	0.2359	0.12618	0.3254	0.003	0.371
10	0.2359	0.34939	0.3254	0.003	0.371
11	0.2386	0.23668	0.237	0.1914	0.236
12	0.2413	0.34939	0.1486	0.474	0.101
13	0.2359	0.12618	0.1486	0.003	0.371
14	0.2359	0.34939	0.1486	0.474	0.371
15	0.2359	0.12618	0.1486	0.003	0.101
16	0.2359	0.12618	0.3254	0.474	0.101
17	0.2413	0.34939	0.3254	0.474	0.371
18	0.2386	0.23668	0.237	0.1914	0.236
19	0.2413	0.34939	0.1486	0.003	0.101
20	0.2359	0.12618	0.1486	0.474	0.371
21	0.2359	0.12618	0.3254	0.474	0.371
22	0.2359	0.34939	0.3254	0.474	0.371
23	0.2359	0.34939	0.1486	0.003	0.371
24	0.2359	0.12618	0.3254	0.003	0.101
25	0.2359	0.12618	0.1486	0.474	0.101
26	0.2413	0.34939	0.1486	0.474	0.371
27	0.2413	0.12618	0.3254	0.474	0.371
28	0.2359	0.34939	0.1486	0.474	0.101
29	0.2413	0.12618	0.3254	0.003	0.371
30	0.2413	0.12618	0.1486	0.003	0.371
31	0.2413	0.12618	0.1486	0.474	0.371
32	0.2359	0.34939	0.1486	0.003	0.101
33	0.2359	0.34939	0.3254	0.474	0.101
34	0.2413	0.34939	0.3254	0.003	0.101
35	0.2386	0.23668	0.237	0.1914	0.236
36	0.2413	0.12618	0.3254	0.003	0.101

Tabla 5. 35 Error de la concavidad de la corona con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Error de la concavidad de la corona				
	<i>E13</i>	<i>E14</i>	<i>E15</i>	<i>E16</i>	<i>E17</i>
1	−0.2413	−0.34939	−0.3254	−0.003	−0.371
2	−0.2413	−0.12618	−0.1486	−0.003	−0.101
3	−0.2413	−0.34939	−0.3254	−0.474	−0.101
4	0.7214	0.72332	0.723	0.7686	0.724
5	−0.2413	−0.12618	−0.3254	−0.474	−0.101
6	−0.2413	−0.34939	−0.1486	−0.003	−0.371
7	−0.2413	−0.12618	−0.1486	−0.474	−0.101
8	−0.2359	−0.34939	−0.3254	−0.003	−0.101
9	−0.2359	−0.12618	−0.3254	−0.003	−0.371
10	−0.2359	−0.34939	−0.3254	−0.003	−0.371
11	−0.2386	−0.23668	−0.237	−0.1914	−0.236
12	0.2187	0.11061	0.3114	−0.014	0.359
13	−0.2359	−0.12618	−0.1486	−0.003	−0.371
14	0.4441	0.33061	0.5314	0.206	0.309
15	−0.2359	−0.12618	−0.1486	−0.003	−0.101
16	−0.2359	−0.12618	−0.3254	−0.474	−0.101
17	1.1287	1.02061	1.0446	0.896	0.999
18	−0.2386	−0.23668	−0.237	−0.1914	−0.236
19	−0.2413	−0.34939	−0.1486	−0.003	−0.101
20	−0.2359	−0.12618	−0.1486	−0.474	−0.371
21	0.9941	1.10382	0.9046	0.756	0.859
22	0.4241	0.31061	0.3346	0.186	0.289
23	−0.2359	−0.34939	−0.1486	−0.003	−0.371
24	−0.2359	−0.12618	−0.3254	−0.003	−0.101
25	−0.2359	−0.12618	−0.1486	−0.474	−0.101
26	0.9887	0.88061	1.0814	0.756	0.859
27	0.5287	0.64382	0.4446	0.296	0.399
28	−0.2359	−0.34939	−0.1486	−0.474	−0.101
29	−0.2413	−0.12618	−0.3254	−0.003	−0.371
30	−0.2413	−0.12618	−0.1486	−0.003	−0.371
31	−0.2413	−0.12618	−0.1486	−0.474	−0.371
32	−0.2359	−0.34939	−0.1486	−0.003	−0.101
33	0.9341	0.82061	0.8446	0.696	1.069
34	−0.2413	−0.34939	−0.3254	−0.003	−0.101
35	−0.2386	−0.23668	−0.237	−0.1914	−0.236
36	−0.2413	−0.12618	−0.3254	−0.003	−0.101

Tabla 5. 36 Cálculos de la concavidad de la raíz con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Concavidad de la raíz				
	Y18	Y19	Y20	Y21	Y22
1	0.1009	0.026887	0.0676	−0.006	0.0679
2	0.1009	0.067994	0.0264	−0.006	0.0267
3	0.1009	0.026887	0.0676	0.102	0.0267
4	0.0478	0.047644	0.047	0.0372	0.0473
5	0.1009	0.067994	0.0676	0.102	0.0267
6	0.1009	0.026887	0.0264	−0.006	0.0679
7	0.1009	0.067994	0.0264	0.102	0.0267
8	−0.0053	0.026887	0.0676	−0.006	0.0267
9	−0.0053	0.067994	0.0676	−0.006	0.0679
10	−0.0053	0.026887	0.0676	−0.006	0.0679
11	0.0478	0.047644	0.047	0.0372	0.0473
12	0.1009	0.026887	0.0264	0.102	0.0267
13	−0.0053	0.067994	0.0264	−0.006	0.0679
14	−0.0053	0.026887	0.0264	0.102	0.0679
15	−0.0053	0.067994	0.0264	−0.006	0.0267
16	−0.0053	0.067994	0.0676	0.102	0.0267
17	0.1009	0.026887	0.0676	0.102	0.0679
18	0.0478	0.047644	0.047	0.0372	0.0473
19	0.1009	0.026887	0.0264	−0.006	0.0267
20	−0.0053	0.067994	0.0264	0.102	0.0679
21	−0.0053	0.067994	0.0676	0.102	0.0679
22	−0.0053	0.026887	0.0676	0.102	0.0679
23	−0.0053	0.026887	0.0264	−0.006	0.0679
24	−0.0053	0.067994	0.0676	−0.006	0.0267
25	−0.0053	0.067994	0.0264	0.102	0.0267
26	0.1009	0.026887	0.0264	0.102	0.0679
27	0.1009	0.067994	0.0676	0.102	0.0679
28	−0.0053	0.026887	0.0264	0.102	0.0267
29	0.1009	0.067994	0.0676	−0.006	0.0679
30	0.1009	0.067994	0.0264	−0.006	0.0679
31	0.1009	0.067994	0.0264	0.102	0.0679
32	−0.0053	0.026887	0.0264	−0.006	0.0267
33	−0.0053	0.026887	0.0676	0.102	0.0267
34	0.1009	0.026887	0.0676	−0.006	0.0267
35	0.0478	0.047644	0.047	0.0372	0.0473
36	0.1009	0.067994	0.0676	−0.006	0.0267

Tabla 5. 37 Error de la concavidad de la raíz con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Error de la Concavidad de la raíz				
	<i>E18</i>	<i>E19</i>	<i>E20</i>	<i>E21</i>	<i>E22</i>
1	-0.1009	-0.026887	-0.0676	0.006	-0.0679
2	-0.1009	-0.067994	-0.0264	0.006	-0.0267
3	-0.1009	-0.026887	-0.0676	-0.102	-0.0267
4	-0.0478	-0.047644	-0.047	-0.0372	-0.0473
5	-0.1009	-0.067994	-0.0676	-0.102	-0.0267
6	-0.1009	-0.026887	-0.0264	0.006	-0.0679
7	-0.1009	-0.067994	-0.0264	-0.102	-0.0267
8	0.0053	-0.026887	-0.0676	0.006	-0.0267
9	0.0053	-0.067994	-0.0676	0.006	-0.0679
10	0.0053	-0.026887	-0.0676	0.006	-0.0679
11	-0.0478	-0.047644	-0.047	-0.0372	-0.0473
12	0.4191	0.493113	0.4936	0.418	0.4933
13	0.0053	-0.067994	-0.0264	0.006	-0.0679
14	0.0053	-0.026887	-0.0264	-0.102	-0.0679
15	0.0053	-0.067994	-0.0264	0.006	-0.0267
16	0.0053	-0.067994	-0.0676	-0.102	-0.0267
17	-0.1009	-0.026887	-0.0676	-0.102	-0.0679
18	-0.0478	-0.047644	-0.047	-0.0372	-0.0473
19	-0.1009	-0.026887	-0.0264	0.006	-0.0267
20	0.0053	-0.067994	-0.0264	-0.102	-0.0679
21	0.0053	-0.067994	-0.0676	-0.102	-0.0679
22	0.0053	-0.026887	-0.0676	-0.102	-0.0679
23	0.0053	-0.026887	-0.0264	0.006	-0.0679
24	0.0053	-0.067994	-0.0676	0.006	-0.0267
25	0.0053	-0.067994	-0.0264	-0.102	-0.0267
26	-0.1009	-0.026887	-0.0264	-0.102	-0.0679
27	1.0791	1.112006	1.1124	1.078	1.1121
28	0.0053	-0.026887	-0.0264	-0.102	-0.0267
29	-0.1009	-0.067994	-0.0676	0.006	-0.0679
30	-0.1009	-0.067994	-0.0264	0.006	-0.0679
31	-0.1009	-0.067994	-0.0264	-0.102	-0.0679
32	0.0053	-0.026887	-0.0264	0.006	-0.0267
33	0.0053	-0.026887	-0.0676	-0.102	-0.0267
34	-0.1009	-0.026887	-0.0676	0.006	-0.0267
35	-0.0478	-0.047644	-0.047	-0.0372	-0.0473
36	-0.1009	-0.067994	-0.0676	0.006	-0.0267

Tabla 5. 38 Cálculos de la penetración con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Penetración				
	Y23	Y24	Y25	Y26	Y27
1	1.244	1.8521	1.63	−0.065	1.833
2	1.244	0.6502	0.87	−0.065	0.659
3	1.244	1.8521	1.63	2.6	0.659
4	1.238	1.2452	1.25	1.001	1.246
5	1.244	0.6502	1.63	2.6	0.659
6	1.244	1.8521	0.87	−0.065	1.833
7	1.244	0.6502	0.87	2.6	0.659
8	1.232	1.8521	1.63	−0.065	0.659
9	1.232	0.6502	1.63	−0.065	1.833
10	1.232	1.8521	1.63	−0.065	1.833
11	1.238	1.2452	1.25	1.001	1.246
12	1.244	1.8521	0.87	2.6	0.659
13	1.232	0.6502	0.87	−0.065	1.833
14	1.232	1.8521	0.87	2.6	1.833
15	1.232	0.6502	0.87	−0.065	0.659
16	1.232	0.6502	1.63	2.6	0.659
17	1.244	1.8521	1.63	2.6	1.833
18	1.238	1.2452	1.25	1.001	1.246
19	1.244	1.8521	0.87	−0.065	0.659
20	1.232	0.6502	0.87	2.6	1.833
21	1.232	0.6502	1.63	2.6	1.833
22	1.232	1.8521	1.63	2.6	1.833
23	1.232	1.8521	0.87	−0.065	1.833
24	1.232	0.6502	1.63	−0.065	0.659
25	1.232	0.6502	0.87	2.6	0.659
26	1.244	1.8521	0.87	2.6	1.833
27	1.244	0.6502	1.63	2.6	1.833
28	1.232	1.8521	0.87	2.6	0.659
29	1.244	0.6502	1.63	−0.065	1.833
30	1.244	0.6502	0.87	−0.065	1.833
31	1.244	0.6502	0.87	2.6	1.833
32	1.232	1.8521	0.87	−0.065	0.659
33	1.232	1.8521	1.63	2.6	0.659
34	1.244	1.8521	1.63	−0.065	0.659
35	1.238	1.2452	1.25	1.001	1.246
36	1.244	0.6502	1.63	−0.065	0.659

Tabla 5. 39 Error de la penetración con las ecuaciones de regresión lineal simple.

Soldadura	Error de la Penetración				
	<i>E23</i>	<i>E24</i>	<i>E25</i>	<i>E26</i>	<i>E27</i>
1	-1.244	-1.8521	-1.63	0.065	-1.833
2	-1.244	-0.6502	-0.87	0.065	-0.659
3	-1.244	-1.8521	-1.63	-2.6	-0.659
4	1.262	1.2548	1.25	1.499	1.254
5	-1.244	-0.6502	-1.63	-2.6	-0.659
6	-1.244	-1.8521	-0.87	0.065	-1.833
7	-1.244	-0.6502	-0.87	-2.6	-0.659
8	-1.232	-1.8521	-1.63	0.065	-0.659
9	-1.232	-0.6502	-1.63	0.065	-1.833
10	-1.232	-1.8521	-1.63	0.065	-1.833
11	-1.238	-1.2452	-1.25	-1.001	-1.246
12	4.536	3.9279	4.91	3.18	5.121
13	-1.232	-0.6502	-0.87	0.065	-1.833
14	2.268	1.6479	2.63	0.9	1.667
15	-1.232	-0.6502	-0.87	0.065	-0.659
16	-1.232	-0.6502	-1.63	-2.6	-0.659
17	2.626	2.0179	2.24	1.27	2.037
18	-1.238	-1.2452	-1.25	-1.001	-1.246
19	-1.244	-1.8521	-0.87	0.065	-0.659
20	-1.232	-0.6502	-0.87	-2.6	-1.833
21	4.578	5.1598	4.18	3.21	3.977
22	4.558	3.9379	4.16	3.19	3.957
23	-1.232	-1.8521	-0.87	0.065	-1.833
24	-1.232	-0.6502	-1.63	0.065	-0.659
25	-1.232	-0.6502	-0.87	-2.6	-0.659
26	4.576	3.9679	4.95	3.22	3.987
27	4.546	5.1398	4.16	3.19	3.957
28	-1.232	-1.8521	-0.87	-2.6	-0.659
29	-1.244	-0.6502	-1.63	0.065	-1.833
30	-1.244	-0.6502	-0.87	0.065	-1.833
31	-1.244	-0.6502	-0.87	-2.6	-1.833
32	-1.232	-1.8521	-0.87	0.065	-0.659
33	4.768	4.1479	4.37	3.4	5.341
34	-1.244	-1.8521	-1.63	0.065	-0.659
35	-1.238	-1.2452	-1.25	-1.001	-1.246
36	-1.244	-0.6502	-1.63	0.065	-0.659

Se puede inferir que, emplear el método de regresión lineal simple para calcular de manera bivariada la geometría del cordón de soldadura no es lo más indicado. Esto es debido porque los errores calculados de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración no fueron cercanos a cero. Por lo que, se requiere de realizar un análisis que involucre a más de una variable independiente ya que más de un parámetro de soldadura afecta la geometría del cordón.

5.2.6 Modelo de regresión lineal múltiple

Dicho lo anterior, se generó las ecuaciones de regresión lineal múltiple en el programa Minitab. Se obtuvieron un total de tres ecuaciones en donde cada ecuación aproximarán la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz y la penetración. Las tres ecuaciones se muestran en la Tabla 5. 40.

Tabla 5. 40 Ecuaciones de regresión lineal múltiple.

Variables dependientes	Ecuaciones de regresión lineal múltiples
Concavidad de la corona	$Y_{28} = -1.34 - 0.0009 \text{ Voltaje } X_1 + 0.00221 \text{ Velocidad hilo } X_2$ $- 0.884 \text{ Velocidad robot } X_3 + 0.942 \text{ Stick out } X_4$ $- 0.135 \text{ Abertura raíz}$
Concavidad de la raíz	$Y_{29} = 0.577 - 0.0177 \text{ Voltaje } X_1 - 0.000407 \text{ Velocidad hilo } X_2$ $- 0.206 \text{ Velocidad robot } X_3 + 0.216 \text{ Stick out } X_4$ $- 0.0206 \text{ Abertura raíz}$
Penetración	$Y_{30} = -8.58 - 0.002 \text{ Voltaje } X_1 + 0.0119 \text{ Velocidad hilo } X_2$ $- 3.80 \text{ Velocidad robot } X_3 + 5.33 \text{ Stick out } X_4$ $- 0.587 \text{ Abertura raíz}$

A continuación, se mostrarán las salidas calculadas de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y el error en la Tabla 5. 41 con el método de regresión lineal múltiple. Las salidas calculadas fueron ponderadas por las ecuaciones de regresión lineal múltiple de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración mostradas en la Tabla 5. 40.

Tabla 5. 41 Cálculos de la corona, la raíz, penetración y errores con las ecuaciones RLM.

Soldadura	Error de la Penetración					
	Corona		Raíz		Penetración	
	Y28	E28	Y29	E29	Y30	E30
1	0.34809	-0.34809	0.067787	-0.067787	1.5141	-1.5141
2	-0.32192	0.32192	0.026494	-0.026494	-1.6218	1.6218
3	0.54909	-0.54909	0.134587	-0.134587	3.0051	-3.0051
4	0.19768	0.76232	0.037444	-0.037444	1.0002	1.4998
5	0.32588	-0.32588	0.175694	-0.175694	1.8032	-1.8032
6	0.17129	-0.17129	0.026587	-0.026587	0.7541	-0.7541
7	0.14908	-0.14908	0.134494	-0.134494	1.0432	-1.0432
8	0.07269	-0.07269	-0.079613	0.079613	0.3281	-0.3281
9	0.11948	-0.11948	0.002694	-0.002694	0.3002	-0.3002
10	0.34269	-0.34269	-0.038413	0.038413	1.5021	-1.5021
11	0.19768	-0.19768	0.037444	-0.037444	1.0002	-1.0002
12	0.37229	0.08771	0.093387	0.426613	2.2451	3.5349
13	-0.05732	0.05732	-0.038506	0.038506	-0.4598	0.4598
14	0.63689	0.04311	0.028387	-0.028387	3.4071	0.0929
15	-0.32732	0.32732	-0.079706	0.079706	-1.6338	1.6338
16	0.32048	-0.32048	0.069494	-0.069494	1.7912	-1.7912
17	0.81909	0.55091	0.175787	-0.175787	4.1791	-0.3091
18	0.19768	-0.19768	0.037444	-0.037444	1.0002	-1.0002
19	-0.09871	0.09871	-0.014613	0.014613	-0.4199	0.4199
20	0.41368	-0.41368	0.069494	-0.069494	2.2052	-2.2052
21	0.59048	0.63952	0.110694	-0.110694	2.9652	2.8448
22	0.81369	-0.15369	0.069587	-0.069587	4.1671	1.6229
23	0.16589	-0.16589	-0.079613	0.079613	0.7421	-0.7421
24	-0.15052	0.15052	-0.038506	0.038506	-0.8738	0.8738
25	0.14368	-0.14368	0.028294	-0.028294	1.0312	-1.0312
26	0.64229	0.58771	0.134587	-0.134587	3.4191	2.4009
27	0.59588	0.17412	0.216894	0.963106	2.9772	2.8128
28	0.36689	-0.36689	-0.012813	0.012813	2.2331	-2.2331
29	0.12488	-0.12488	0.108894	-0.108894	0.3122	-0.3122
30	-0.05192	0.05192	0.067694	-0.067694	-0.4478	0.4478
31	0.41908	-0.41908	0.175694	-0.175694	2.2172	-2.2172
32	-0.10411	0.10411	-0.120813	0.120813	-0.4319	0.4319
33	0.54369	0.62631	0.028387	-0.028387	2.9931	3.0069
34	0.07809	-0.07809	0.026587	-0.026587	0.3401	-0.3401
35	0.19768	-0.19768	0.037444	-0.037444	1.0002	-1.0002

36	-0.14512	0.14512	0.067694	-0.067694	-0.8618	0.8618
-----------	----------	---------	----------	-----------	---------	--------

En base a los cálculos anteriores, emplear el método de regresión lineal múltiple para calcular la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración no mostró los resultados esperados de la geometría del cordón de soldadura. Esto es debido al error calculado distinto de cero de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración. Se puede inferir que, realizar un análisis multivariado con técnicas estadísticas para calcular las salidas de interés en el proceso de soldadura GMAW robotizado no es adecuado. Esto es debido a las características de las variables de entrada del proceso GMAW robotizado ya que están correlacionadas, tienen dependencia, no son normales y el proceso es demasiado complejo.

Los resultados mostrados de los modelos de regresión lineal simple y múltiple afirman que, se necesita de métodos novedosos para calcular o aproximar las salidas de interés a través de un análisis multivariado.

Debido a la cantidad de datos de entrada en el diseño de experimentos del proceso GMAW robotizado, se optó por utilizar lógica difusa para realizar las aproximaciones de la calidad a través de la geometría del cordón de soldadura. A continuación, se comentará la experimentación y resultados para el proceso de soldadura GMAW robotizado empleando la técnica de lógica difusa.

5.2.7 Modelo Triple Difuso

Recordando que el método de lógica difusa permite modelar cualquier proceso demasiado complejo, en donde no existe un modelo matemático preciso capaz de dar solución a un problema. Los variables que pueden ser empleados en lógica difusa son parámetros con incertidumbre, con variabilidad inherente, con ruido, con comportamiento normal o no normal y también aquellos que requiere de la experiencia o el conocimiento del ser humano para dar solución a un problema.

Durante la investigación, se desarrolló un sistema triple difuso para el proceso GMAW semiautomatizado el cual se muestra en la Figura 5. 44. Debido a la adecuada respuesta de la calidad de las geometrías de los cordones de soldadura que presentó el sistema triple difuso desarrollado para el proceso GMAW semiautomatizado, se modificó y se desarrolló un sistema triple difuso para el proceso de soldadura GMAW robotizado.

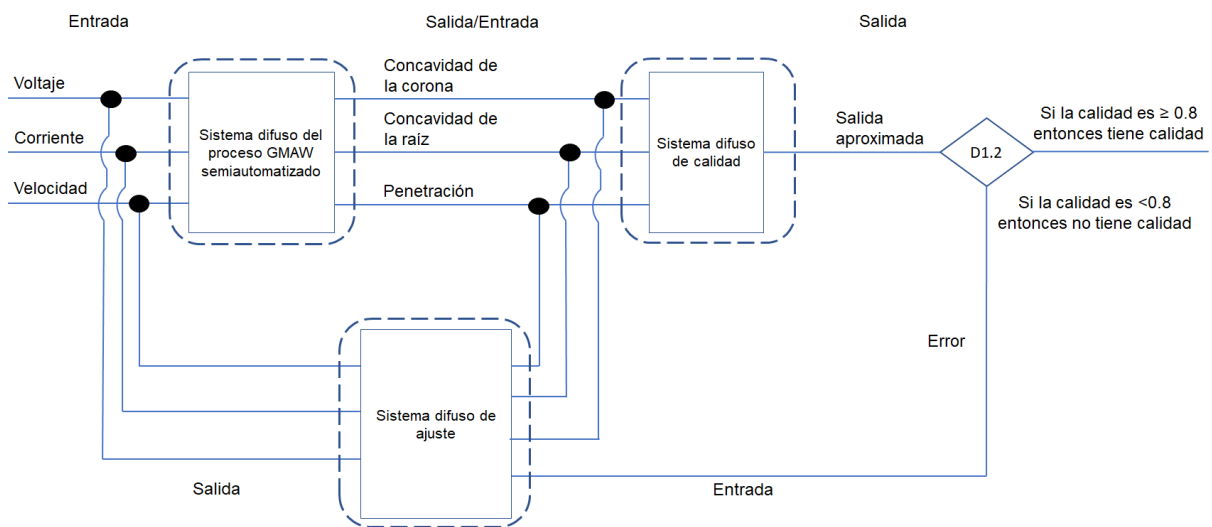


Figura 5. 44 Sistema triple difuso desarrollado para el proceso GMAW semiautomatizado.

El nuevo sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado aproximará las salidas de la concavidad de la corona, la concavidad de la raíz, la penetración y la calidad a partir de incrementos o decrementos de los datos de entrada de voltaje, velocidad de alimentación de hilo, velocidad de avance del robot, stick out y abertura de raíz. Los datos de entrada estarán representados como conjuntos de antecedentes. Los conjuntos de antecedentes se pueden observar en las Figura 5. 45, Figura 5. 46, Figura 5. 47, Figura 5. 48 y Figura 5. 49.

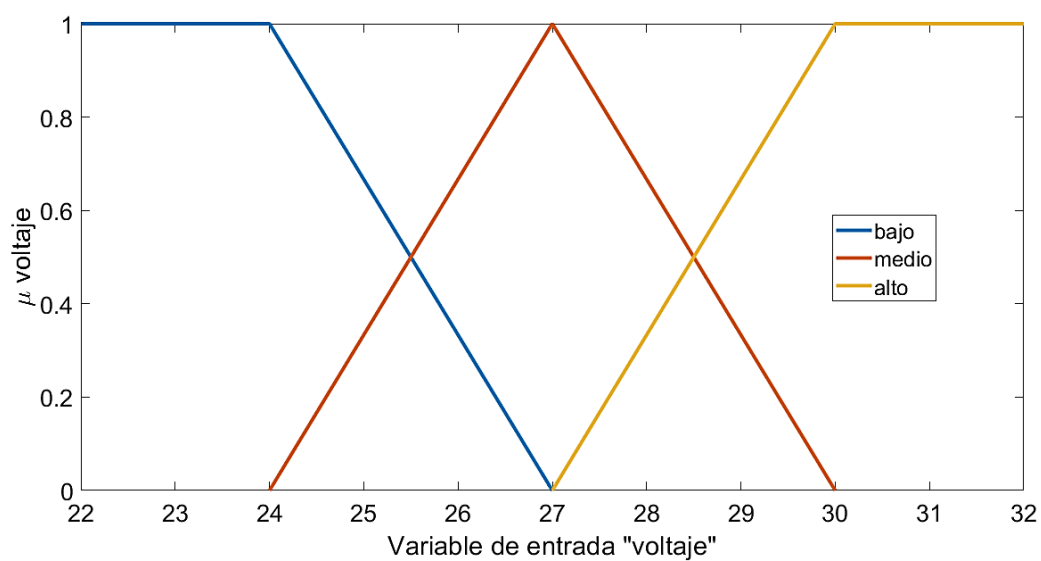


Figura 5. 45 Conjunto difuso de antecedente del voltaje

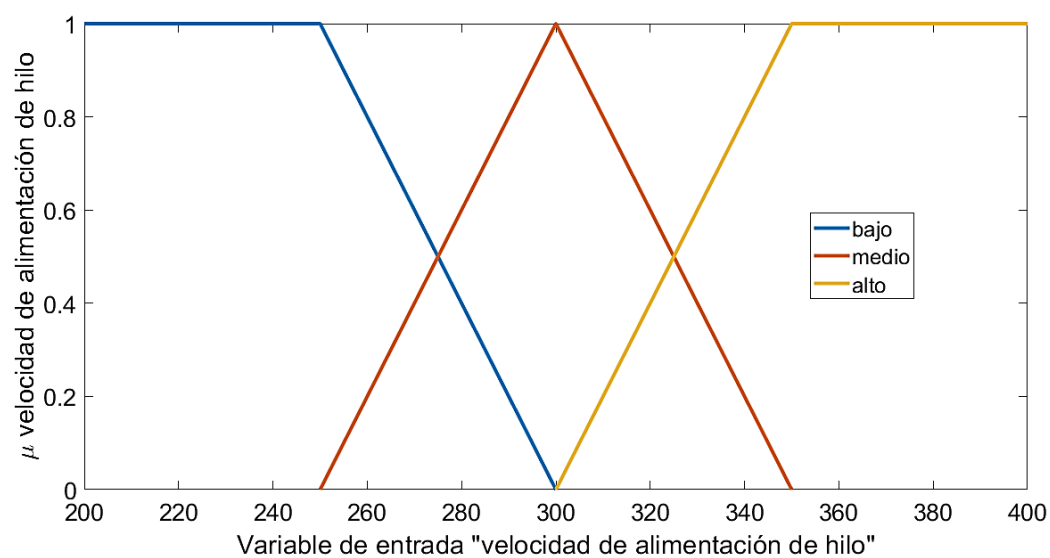


Figura 5. 46 Conjunto difuso de antecedente de la velocidad de alimentación de hilo

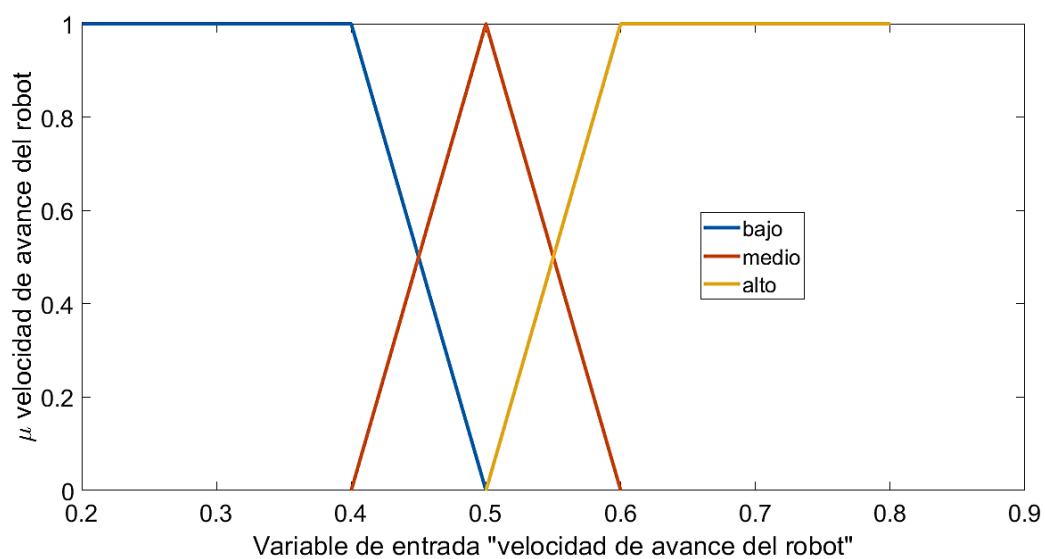


Figura 5. 47 Conjunto difuso de antecedente de la velocidad de avance del robot

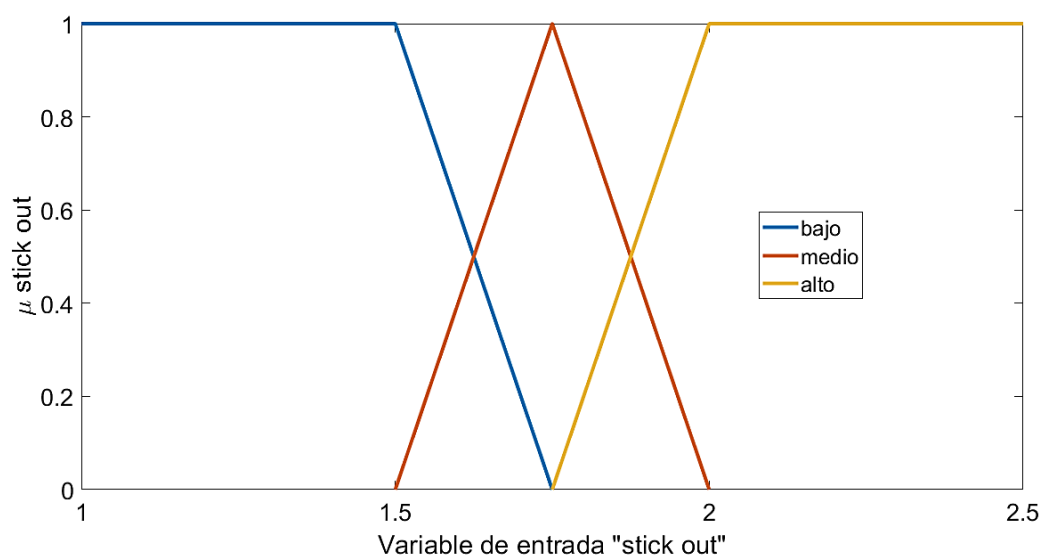


Figura 5. 48 Conjunto difuso de antecedente del stick out

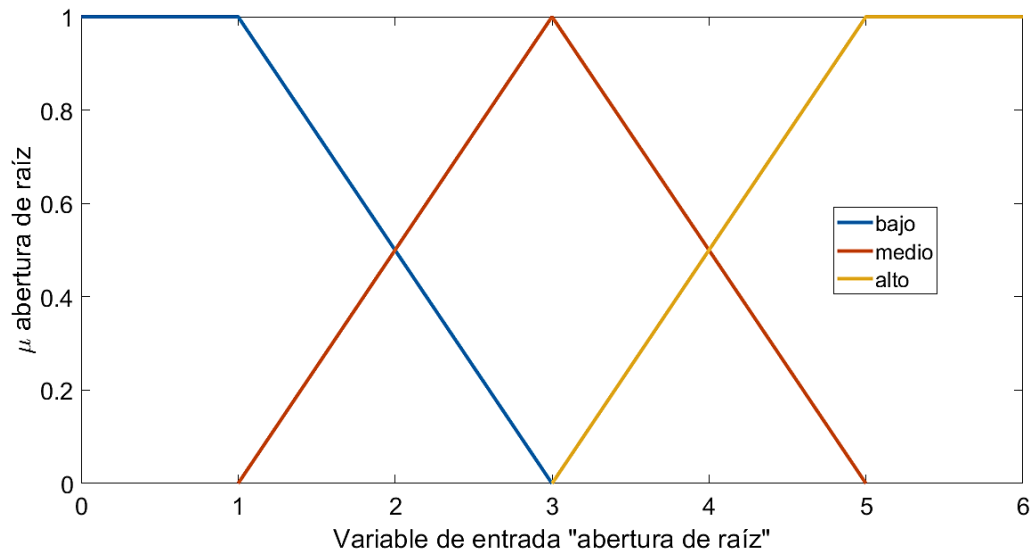


Figura 5. 49 Conjunto difuso de antecedente de la abertura de raíz

Cada conjunto difuso es la representación visual de cómo se modela los parámetros o variables del proceso de soldadura robotizada mediante lógica difusa. Los datos de entrada pasan por el proceso de fusificación, actúa la base de conocimientos en conjunto con la inferencia y finalmente el proceso de defusificación. Este proceso ocurre en cada sección del sistema triple difuso representado en la Figura 5. 50.

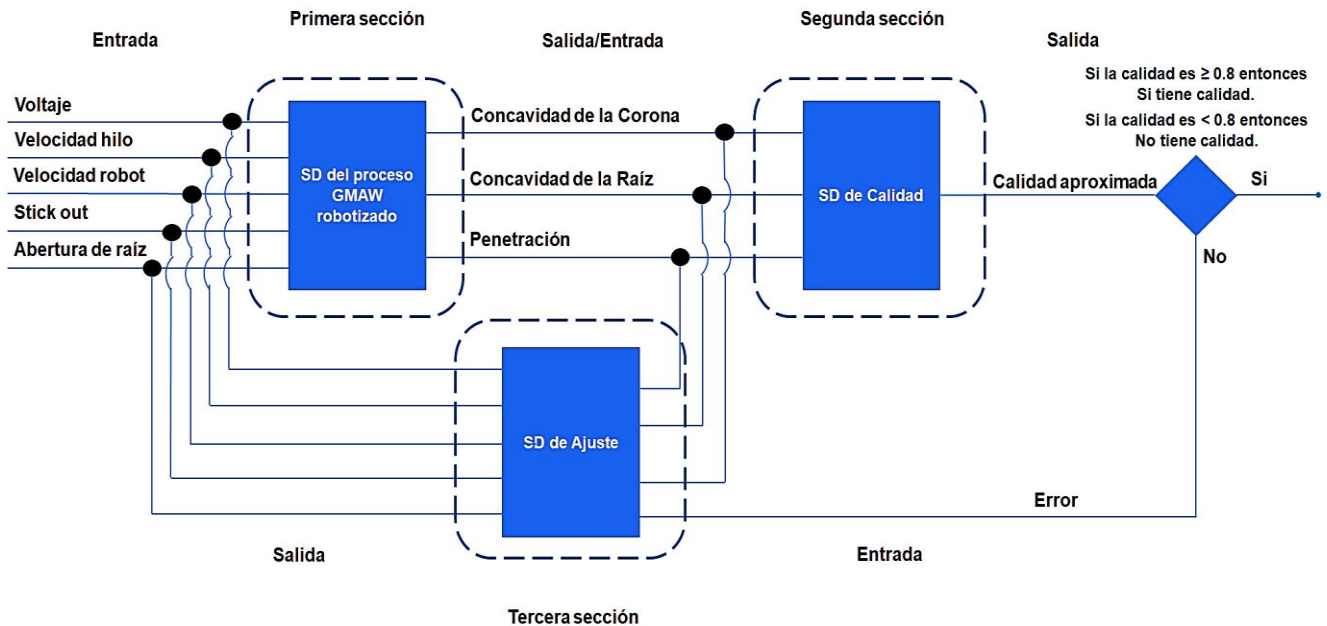


Figura 5. 50 Sistema triple difuso para la aproximación de la geometría del cordón de soldadura y su calidad en aleación de aluminio 5052-H32 para el proceso GMAW robotizado.

Dicho esto, se modificó los tres datos de entrada del sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado de la Figura 5. 44 por los cinco datos de entradas del proceso GMAW robotizado. Se desarrolló la programación en MATLAB R2020b y se calcularon los nuevos datos de entrada que aproximarán las geometrías de cordones de soldadura con una calidad acreditable de acuerdo al código estructural del aluminio AWS D1.2.

Los resultados de las nuevas entradas se pueden observar en la Tabla 5. 42, en donde se realizó nuevamente la experimentación. Los nuevos parámetros de entrada del proceso GMAW robotizado fueron previamente establecidos en el teach pendant, los cuales se encuentran en el Anexo G. El teach pendant es un dispositivo que está constituido por un teclado alfanumérico y una pantalla de edición, cuya función es la manipulación del robot KUKA KR-16 a través de programaciones generados por el operador.

Tabla 5. 42 Diseño de experimentos 2⁵ modificado por el sistema triple difuso del proceso GMAW robotizados.

Soldadura	Voltaje (V)	Velocidad de alimentación de hilo (m/min)	Velocidad de avance del robot (m/min)	Stick out (cm)	Abertura de raíz (mm)
1	33	359	0.4	1.5	1
2	33	258	0.6	1.5	3
3	33	359	0.4	2	3
4	36	308	0.5	1.7	2
5	33	258	0.4	2	3
6	33	359	0.6	1.5	1
7	33	258	0.6	2	3
8	39	359	0.4	1.5	3
9	39	258	0.4	1.5	1
10	39	359	0.4	1.5	1
11	36	308	0.5	1.7	2
12	33	359	0.6	2	3
13	39	258	0.6	1.5	1
14	39	359	0.6	2	1
15	39	258	0.6	1.5	3
16	39	258	0.4	2	3
17	33	359	0.4	2	1
18	36	308	0.5	1.7	2
19	33	359	0.6	1.5	3
20	39	258	0.6	2	1
21	39	258	0.4	2	1
22	39	359	0.4	2	1
23	39	359	0.6	1.5	1
24	39	258	0.4	1.5	3
25	39	258	0.6	2	3
26	33	359	0.6	2	1
27	33	258	0.4	2	1
28	39	359	0.6	2	3
29	33	258	0.4	1.5	1
30	33	258	0.6	1.5	1
31	33	258	0.6	2	1
32	39	359	0.6	1.5	3
33	39	359	0.4	2	3
34	33	359	0.4	1.5	3

35	36	308	0.5	1.7	2
36	33	258	0.4	1.5	3

Se observó que, al incrementar el número de variables de entrada existe un aumento en el número de reglas difusas en la base de conocimientos. Por lo que, se realizó varias modificaciones debido al número de valores lingüísticos que mejor describen a cada variable lingüística. El aumento del número de variables de entrada afecta en el procesamiento interno del sistema difuso, agrandando la complejidad de la técnica de lógica difusa. En el caso de la primera sección del modelo triple difuso, el número de reglas difusas en la base de conocimientos fue de 243 reglas difusas. En el caso de la segunda sección del modelo triple difuso, el número de reglas difusas en la base de conocimientos fue de 36 reglas difusas. En el caso de la tercera sección del modelo triple difuso, el número de reglas difusas en la base de conocimientos fue de 108 reglas difusas.

Como se mencionó anteriormente, el sistema difuso requiere de un razonamiento el cual es el análisis interno de las implicaciones difusas que relacionan dos conjuntos de diferentes universos, conocidos como el antecedente y el consecuente. El sistema difuso empleado en esta investigación utiliza la implicación Mamdani ($\min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$) por ser el más utilizado tomando los valores de membresía más pequeños de cada par ordenado.

A continuación, se mostrarán las soldaduras 1, 16, 21, 30 y 33 del primer diseño de experimentos y del segundo diseño de experimentos modificado con el sistema triple difuso desarrollado. Los parámetros utilizados para generar los cordones de soldadura fueron mencionados anteriormente en la Tabla 5. 28 y Tabla 5. 42. Se realizó una comparación de las soldaduras del primer diseño de experimentos con el segundo diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso. Las nuevas soldaduras mostraron una mejoría visual en la penetración y en la apariencia de la concavidad de la corona.

Se puede observar que al modificar algunos parámetros del proceso GMAW robotizado como voltaje, velocidad de alimentación del hilo y abertura de raíz da la posibilidad de obtener soldaduras con mejor penetración, con suficiente concavidad de la raíz, con mayor altura o anchura en la concavidad de la corona. Tales modificaciones en los parámetros mencionados anteriormente se discutirán a continuación.

El parámetro de la abertura de raíz tiene una relación con la altura y la penetración en los cordones de soldadura. En la primera experimentación, la abertura de raíz de las soldaduras 1, 21 y 30 fue de 0 mm. Se puede observar en la Figura 5. 51, Figura 5. 52 y Figura 5. 53 que en ninguna soldadura hubo penetración.



Figura 5. 51 Soldadura 1 empleando 24 volts, 350 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 1.5 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 52 Soldadura 21 empleando 30 volts, 250 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 53 Soldadura 30 empleando 24 volts, 250 velocidad de hilo, 0.6 velocidad de robot, 1.5 stick out y 0 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.

Por otra parte, en el segundo diseño de experimentos se modificó la abertura de raíz a 1 mm y se puede observar que en las figuras de Figura 5. 54, Figura 5. 55 y Figura 5. 56 hubo penetración. Por lo que, podemos inferir que al modificar la abertura de raíz de 0 mm a 1 mm mejora el acceso del micro alambre a la separación entre placas. Por consiguiente, se puede generar cordones de soldadura con penetración.



Figura 5. 54 Soldadura 1 empleando 33 volts, 359 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 1.5 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 55 Soldadura 21 empleando 39 volts, 258 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 56 Soldadura 30 empleando 33 volts, 258 velocidad de hilo, 0.6 velocidad de robot, 1.5 stick out y 1 abertura de raíz del segundo diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.

La velocidad de avance del robot para ambos diseños de experimentos permaneció igual. Esta variable puede implicar una mayor o menor cantidad de micro alambre fundido y además modificar el tamaño de la concavidad de la corona de la soldadura. Es decir que, al disminuir la velocidad de avance del robot habrá una mayor cantidad de micro alambre fundido, generando una mayor anchura en la concavidad de la corona. Al aumentar la velocidad de avance del robot habrá una menor cantidad de micro alambre, generando una menor anchura en la concavidad de la corona.

Las soldaduras 1, 21 y 30 (Figura 5. 51, Figura 5. 52 y Figura 5. 53) de la primera experimentación tienen una abertura de raíz de 0 mm , pero presentan cordones de soldadura más gruesos cuando la velocidad de soldadura del robot es de 0.4 m/min . Mientras que, con una velocidad de 0.6 m/min se presentan soldaduras más angostas.

En la segunda experimentación se puede apreciar en la soldadura 1 (Figura 5. 54) un cordón de soldadura más ancho con una velocidad de robot de 0.4 m/min . En la soldadura 21 (Figura 5. 55) se puede observar una soldadura con penetración y con concavidad al usar una velocidad de robot de 0.4 m/min . En la soldadura 30 (Figura

5. 56) se puede visualizar un cordón de soldadura con penetración al utilizar una velocidad de robot 0.6 m/min .

La velocidad de alimentación de hilo también tiene una relación con la altura y el ancho del cordón de soldadura. En el primer diseño de experimentos, en la soldadura 1 (Figura 5. 51) tiene una velocidad de alimentación de hilo de 350 m/min mientras que, en las soldaduras 21 y 30 (Figura 5. 52 y Figura 5. 53) tienen una velocidad de alimentación de hilo de 250 m/min . Estas tres soldaduras, con una abertura de raíz de 0 mm muestran cordones de soldadura con una concavidad de la corona y anchuras distintas.

En el segundo diseño de experimentos, las velocidades de alimentación de hilo sufrieron pocos cambios. Al tener una abertura de raíz de 1 mm , muestran concavidades de la corona más planas. Sin embargo, en la soldadura 1 (Figura 5. 54) se puede apreciar un exceso de micro alambre en la superficie.

En las soldaduras 16 y 33 (Figura 5. 57 y Figura 5. 58) del primer diseño de experimentos tienen una abertura de raíz de 5 mm . Al utilizar una velocidad de alimentación de hilo de 250 m/min en la soldadura 16, no es capaz de rellenar por completo la abertura de raíz. En la soldadura 33 hubo un mejor llenado de la abertura de raíz debido a que se utilizó una velocidad de hilo de 350 m/min .

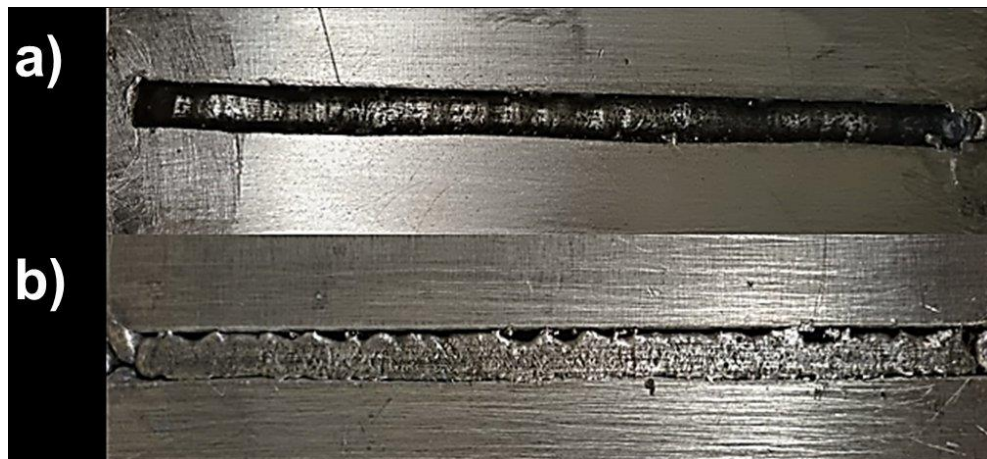


Figura 5. 57 Soldadura 16 empleando 30 volts, 250 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 5 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 58 Soldadura 33 empleando 30 volts, 350 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 5 abertura de raíz del primer diseño de experimentos. En donde a) vista superior y b) vista inferior.

En el segundo diseño de experimentos, se modificó la abertura de raíz a 3 *mm* de las soldaduras 16 y 33 (Figura 5. 59 y Figura 5. 60). Como se puede observar, hubo una mejor penetración y llenado de la abertura de raíz.



Figura 5. 59 Soldadura 16 empleando 39 volts, 258 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 3 abertura de raíz del diseño de experimentos actualizado. En donde a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 5. 60 Soldadura 33 empleando 39 volts, 359 velocidad de hilo, 0.4 velocidad de robot, 2 stick out y 3 abertura de raíz del diseño de experimentos actualizado. En donde a) vista superior y b) vista inferior.

Con respecto al parámetro del stick out, los expertos mencionan que durante la práctica de la soldadura es recomendable utilizar una distancia corta entre el metal base y la punta del micro alambre. La distancia corta tiene como finalidad asegurar un arco eléctrico estable. Recordando que el stick out es la distancia que existe entre la tobera y el extremo de la punta del micro alambre, actualmente no se conoce un valor apropiado del stick out para unir placas de aleación de aluminio 5052-H32. Esto es debido a la complejidad de esta variable que surgió al emplear un stick out de 1.5 *cm*.

Dicho todo esto se puede inferir que los parámetros del proceso de soldadura GMAW robotizado están relacionados entre sí. Al modificar cualquier parámetro se pueden obtener distintos resultados.

5.3 Pruebas metalográficas

5.3.1 Seccionamiento de las soldaduras

Para analizar la geometría de los cordones de soldadura, es necesario seccionar las soldaduras transversalmente en el centro de los cordones de soldadura. Esto es debido a la suposición de que, los parámetros de entrada alcanzan la mayor estabilidad en el centro del cordón de soldadura y por consiguiente se obtiene la mejor geometría. A continuación, se muestra en la Figura 5. 61 un ejemplo representativo de la sección transversal de la soldadura 19 que se desea analizar.

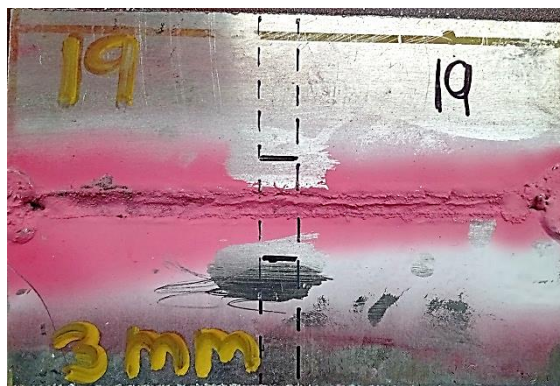


Figura 5. 61 Seccionamiento transversal de la soldadura 19 de aleación de aluminio 5052-H32 unido por el proceso GMAW robotizado.

Cabe mencionar que, todas las soldaduras fueron marcadas y seccionadas en la misma sección. Los cortes transversales fueron realizados en el Instituto Tecnológico de Saltillo con la máquina sierra cinta de la marca Forte. Al finalizar el

seccionamiento de las 72 soldaduras en la máquina sierra cinta de la marca Forte, se obtuvieron 72 tramos de soldadura. A continuación, se muestra en la Figura 5. 62 el ejemplo representativo del tramo de soldadura transversal obtenido de la máquina sierra cinta.



Figura 5. 62 Ejemplo representativo del tramo del cordón de soldadura.

Las dimensiones del tramo de soldadura son $0.6\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ($6\text{ mm} \times 100\text{ mm}$) aproximadamente. Cabe mencionar que, los 72 tramos de soldaduras tienen aproximadamente las mismas dimensiones. Se realizaron otros seccionamientos en los 72 tramos de las soldaduras de aproximadamente 2 cm (20 mm) en una máquina cortadora de la marca Samplmet-2 en el Instituto Tecnológico de Saltillo.

Se realizaron otros seccionamientos en una máquina cortadora más adecuada para piezas más pequeñas. Dicho esto, se realizaron los cortes en el Instituto Tecnológico de Saltillo con la máquina cortadora de la marca Samplmet-2. Como resultado se obtuvieron 72 piezas más pequeñas de aproximadamente 2 cm (20 mm) cuyo ejemplo representativo se muestra la Figura 5. 63.



Figura 5. 63 Ejemplo representativo de una muestra de 2 cm de largo.

5.3.2 Montaje en resina

Como se comentó anteriormente, se obtuvieron un total de 72 muestras con un tamaño de aproximadamente 20 mm. El tamaño de las muestras abarca adecuadamente el metal base y la soldadura. Debido a la cantidad de resina acrílica disponible en el laboratorio, se seleccionaron únicamente cinco soldaduras junto con su réplica debido que mostraron una unión de las placas de aleación de aluminio 5052-H32. Las cinco soldaduras seleccionadas junto con su réplica fueron la soldadura 12, 17, 21, 22 y 27.

El tiempo de curado de este tipo de resina acrílica, de acuerdo a las especificaciones del producto, es de aproximadamente 20 min. El tiempo de curado se refiere al periodo de tiempo durante el cual, la mezcla de resina y endurecedor (catalizador) permanece en estado líquido a una temperatura determinada, en este caso a una temperatura ambiente.

Para analizar las geometrías de los cordones de soldadura faltantes se realizó un montaje con una resina epóxica de montaje en frío de la marca PRESI, cuyo tiempo de curado es de aproximadamente 12 horas a temperatura ambiente.

Una vez montadas las piezas en resina acrílica y en resina epóxica, se procedió a realizar el proceso de desbaste y el pulido hasta obtener una superficie con acabado espejo. El proceso de desbaste y pulido se explicará a continuación.

5.3.3 Desbaste y pulido

Una vez montadas las muestras en resina acrílica y en resina epóxica, se inició el proceso de desbaste sobre una serie de papel lijas. Los papeles lija contienen partículas abrasivas de carburo de silicio (SiC). Se empleó el papel lija de SiC debido que es el consumible más empleado para el proceso de desbaste. El objetivo de este proceso es obtener una superficie plana y libre de marcas producidas por las máquinas de corte. Al finalizar el proceso de desbaste, se tienen como resultados muestras con rayas uniformes y finas en la superficie en un solo sentido.

Actualmente existen en el mercado papeles de SiC con diferentes numeraciones. El número perteneciente de este consumible indica la cantidad de partículas abrasivas por pulgada cuadrada. Dicho esto, un papel con un número bajo poseerá partículas abrasivas de mayor tamaño y viceversa. Los papeles lija de SiC utilizados en el proceso de desbaste para las soldaduras de aluminio 5052-H32 fueron 800, 1200, 2500 y 4000.

El proceso de desbaste puede realizarse manualmente o asistido por una máquina desbastadora. En esta investigación se realizó el proceso de desbaste, en el Instituto Tecnológico de Saltillo, asistido con una máquina desbastadora de la marca metkon. La máquina desbastadora tiene por defecto un sistema de enfriamiento por agua. El sistema de enfriamiento tiene dos objetivos, el cual es retirar los restos desprendidos de la muestra montada en el proceso de desbaste y evitar el calentamiento de la muestra.

Al finalizar el proceso de desbaste se procedió a la etapa de pulido. La etapa de pulido es el paso final para obtener una superficie libre de deformaciones, completamente plana y con acabado espejo. El pulido se realizó manualmente con pastas de diamante de 1 y 3 μm , con paños de pelo corto y con Silica coloidal de 3 μm . La selección del paño corto fue para evitar el desprendimiento de los precipitados y obtener un mejor acabado espejo.

A continuación, se mostrarán las primeras cinco soldaduras junto con su réplica las cuales fueron montadas en resina acrílica, después desbastadas y finalmente pulidas hasta un acabado espejo. Las cinco soldaduras junto con su réplica se muestran en la Figura 5. 64, Figura 5. 65, Figura 5. 66, Figura 5. 67 y Figura 5. 68.

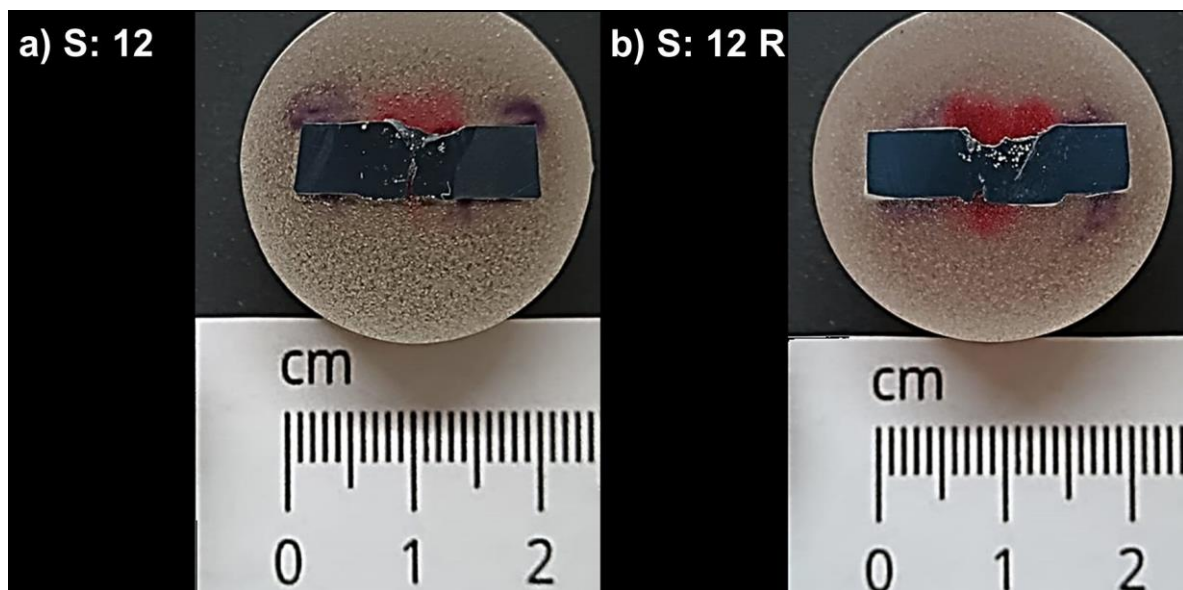


Figura 5. 64 Soldadura 12 y soldadura 12 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.

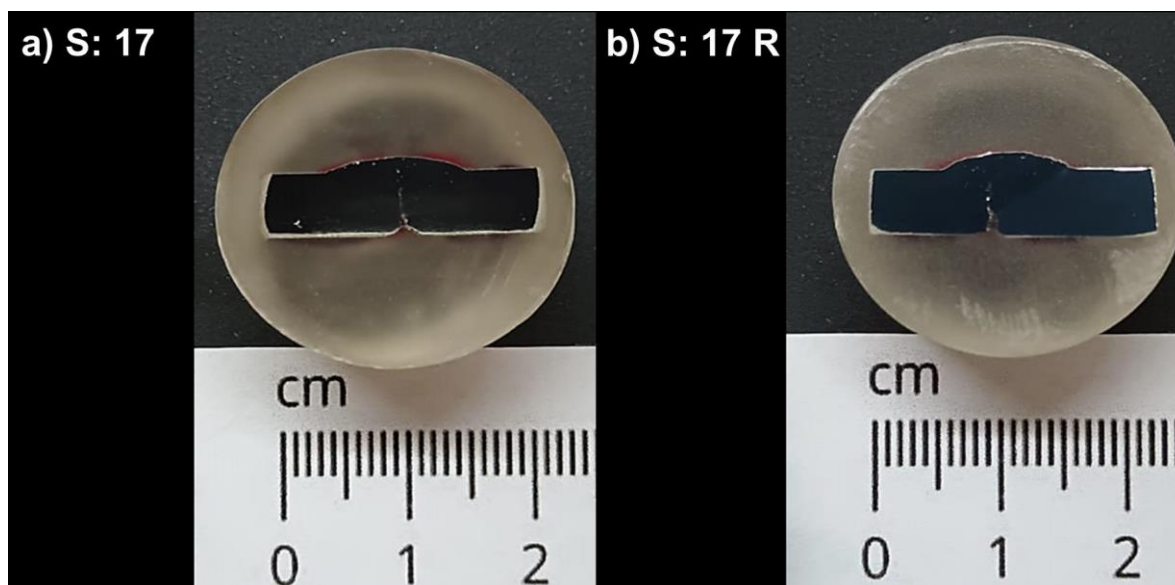


Figura 5. 65 Soldadura 17 y soldadura 17 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.

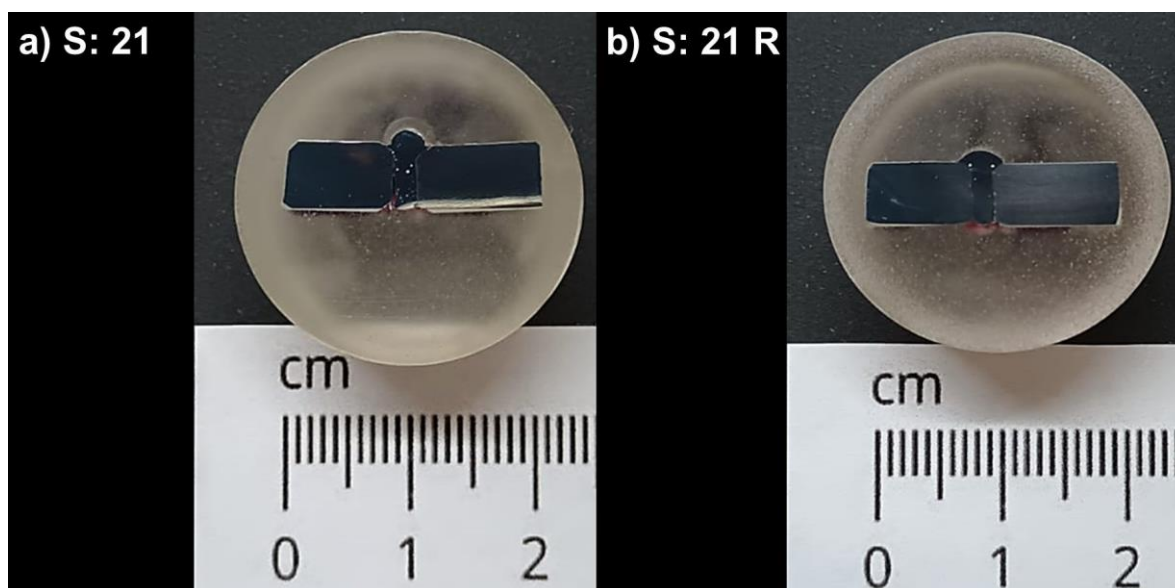


Figura 5. 66 Soldadura 21 y soldadura 21 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.

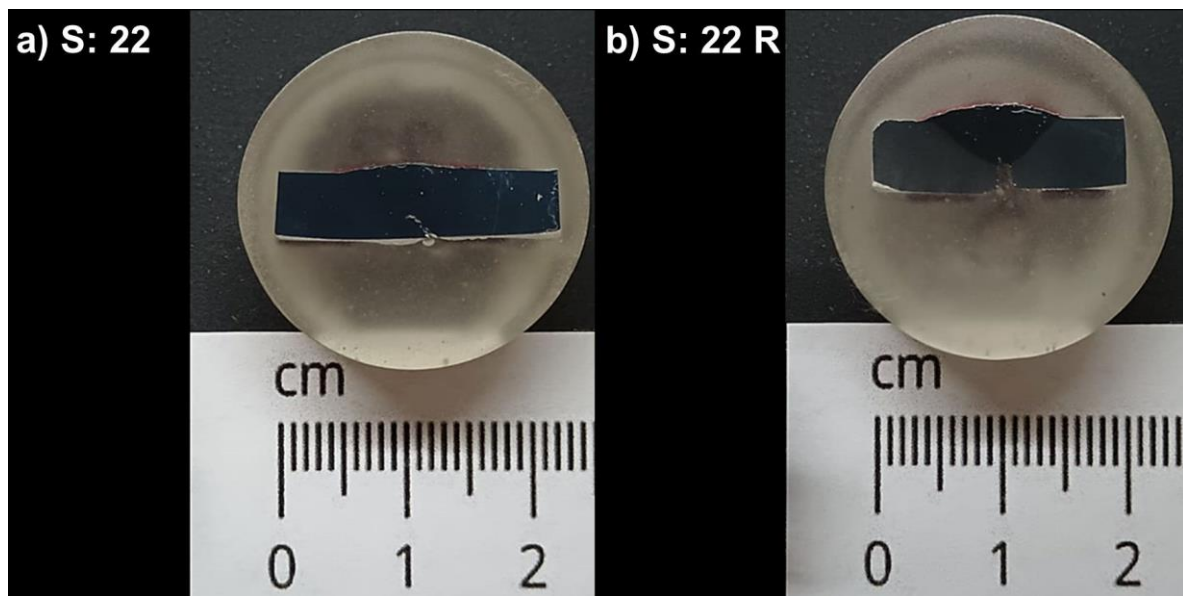


Figura 5. 67 Soldadura 22 y soldadura 22 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.

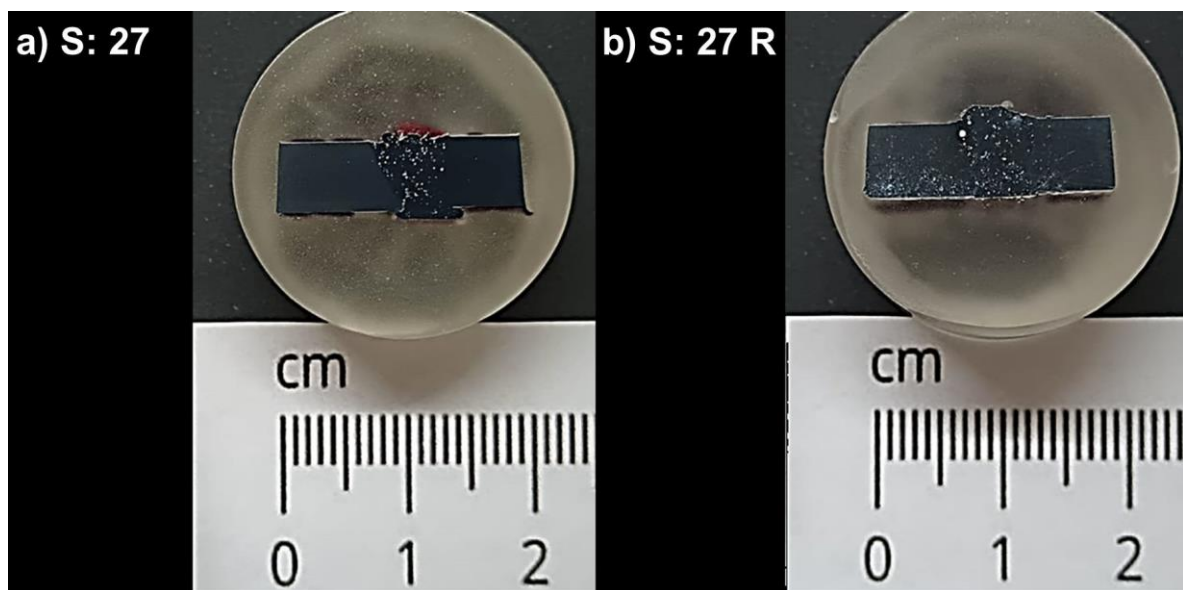


Figura 5. 68 Soldadura 27 y soldadura 27 R montadas en resina acrílica con acabado espejo.

Como se puede observar en las soldaduras montadas en resina acrílica, es complicado visualizar la geometría de los cordones de soldadura únicamente con el acabado espejo. Las muestras con acabado espejo solo pueden mostrar aspectos superficiales tales como porosidad, grietas, falta de penetración, falta de fusión, etc.

Debido a esto, se optó por realizar un ataque químico con el objetivo de resaltar las geometrías de los cordones de soldadura a nivel macro. Las soldaduras restantes fueron montadas en resina epóxica, en donde solo se mostrarán las geometrías más representativas en la siguiente sección.

5.3.4 Ataque químico

Actualmente existen varios reactivos químicos para realizar el ataque químico en los materiales metálicos. El objetivo del ataque químico es el de revelar y de diferenciar, ya sea por corrosión o por coloración, los distintos componentes de una estructura metalográfica. La selección del reactivo químico se basa en lo que se quiere analizar, por lo que distintos investigadores seleccionan el reactivo químico que mejor pueda mostrar la microestructura, los límites de grano, la zona de fusión, la zona afectada por el calor, la soldadura, etc. A continuación, se mencionarán algunos investigadores que emplearon en su metodología un reactivo químico en las soldaduras, para revelar la microestructura o las zonas de soldadura.

Ramaphoko et al [66], emplearon el reactivo Nital al 3 % (3 % HNO_3 , 97 % alcohol etílico) para exponer la microestructura y romper los límites de grano en soldaduras mixtas de aleación de aluminio de la serie 6000 con acero galvanizado. Naumov et al [67], emplearon el reactivo Weck (1 g NaOH, 4 g KMnO_4 y 100 mL H_2O) por 10 s para revelar las delgadas líneas de las zonas delimitantes del metal base, zona afectada por el calor y la soldadura de aleación de aluminio 6082 unido por FSW (Friction Stir Welding).

Vyskoc et al [68], emplearon un ataque electrolítico de 90 s con el reactivo Barker (5 mL HBF_4 + 200 mL H_2O) con un voltaje de 23.7 V para colorear la zona afectada por el calor de la aleación de aluminio 5083 unido por una soldadura laser. Cooke et al [69]. emplearon un ataque químico con HNO_3 al 2 % en metanol y HF al 1 % en agua destilada para observar las soldaduras mixtas de aleación de aluminio

(Al5754) y aleación de magnesio (AZ31B) unidos por la soldadura por puntos de resistencia (RSW).

Wan et al [70] emplearon 2 tipos de ataque químico en las soldaduras mixtas de aluminio y acero unidos por la soldadura FSW; para el lado del acero utilizaron una solución compuesta por 2.5 *mL* de ácido nítrico + 97.5 *mL* de etanol mientras que en el lado del aluminio utilizaron el reactivo Keller (1 *mL* HF + 1.5 *mL* HCl + 2.5 *mL* HNO₃ + 95 *mL* de H₂O) con el objetivo de visualizar a simple vista el metal base, la zona afectada por el calor y la soldadura.

Como se mencionó anteriormente, existen diversos reactivos químicos para corroer o colorear la microestructura para diferenciar los límites de grano, el tamaño del grano, la porosidad, etc. En esta investigación se optó por utilizar el reactivo Keller con composición de 5 *mL* de ácido nítrico (HNO₃) + 3 *mL* de ácido clorhídrico (HCl) + 2 *mL* de ácido fluorhídrico HF + 190 *mL* de agua (H₂O) debido a su amplio uso de revelar los límites, orientaciones de granos en las aleaciones de aluminio y visualizar a simple vista el metal base y la soldadura.

A continuación, se presentarán las soldaduras 12, 17, 21, 22 y 27 junto con sus réplicas montadas en resina acrílica, desbastadas, pulidas y atacadas con el reactivo Keller en la Figura 5. 69, Figura 5. 70, Figura 5. 71, Figura 5. 72 y Figura 5. 73 respectivamente.

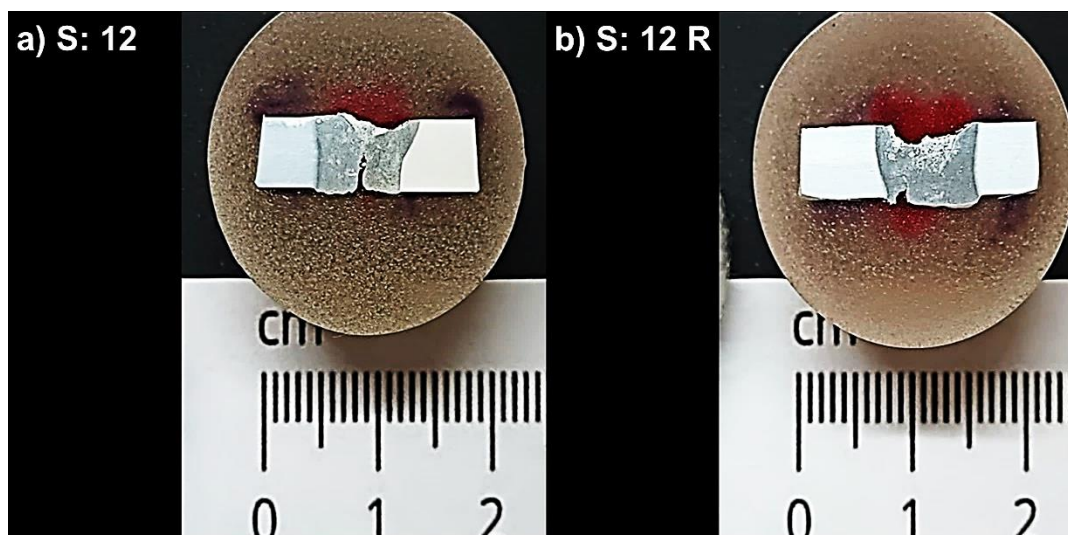


Figura 5. 69 Soldadura 12 y soldadura 12 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

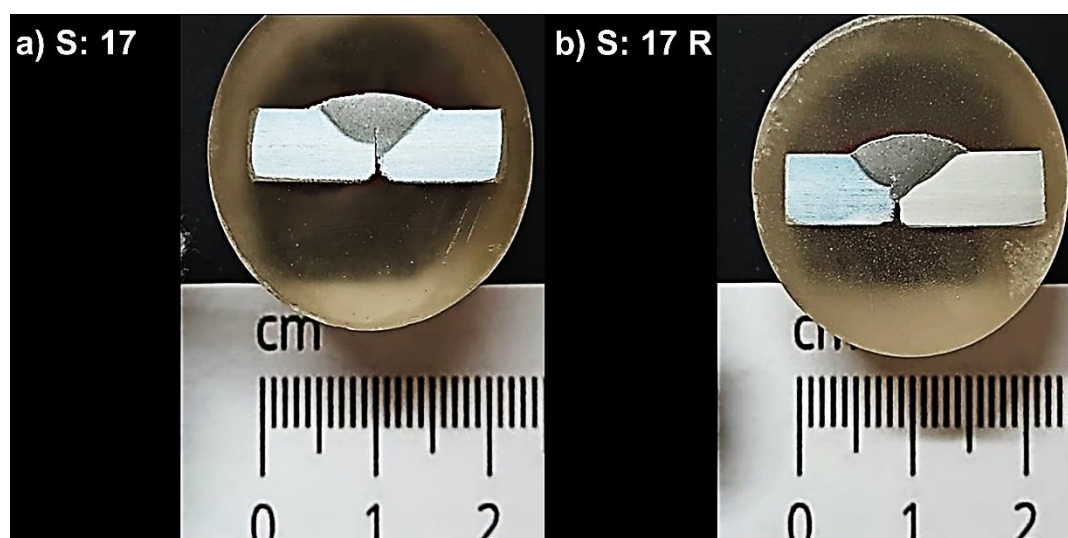


Figura 5. 70 Soldadura 17 y soldadura 17 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

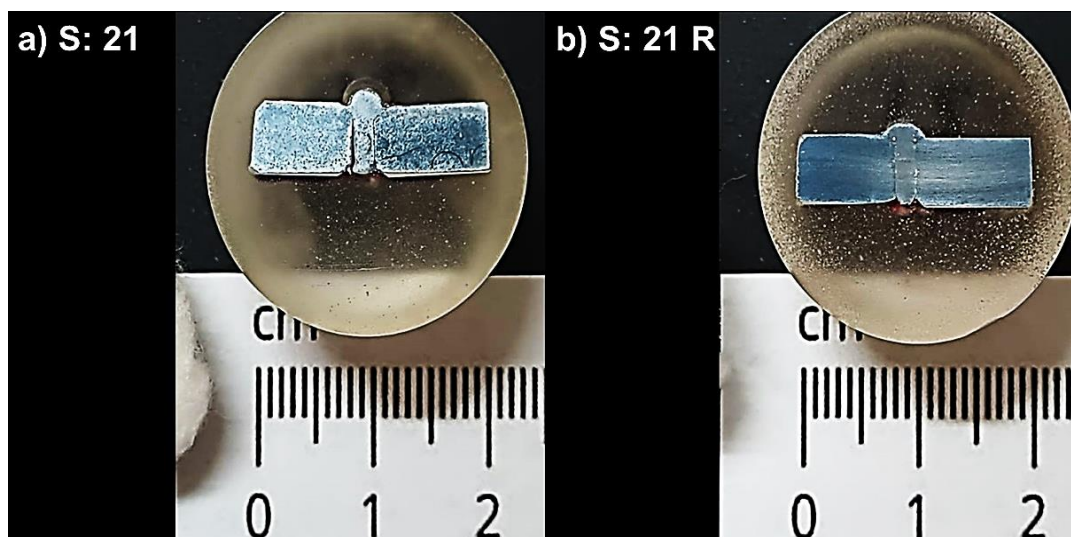


Figura 5. 71 Soldadura 21 y soldadura 21 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

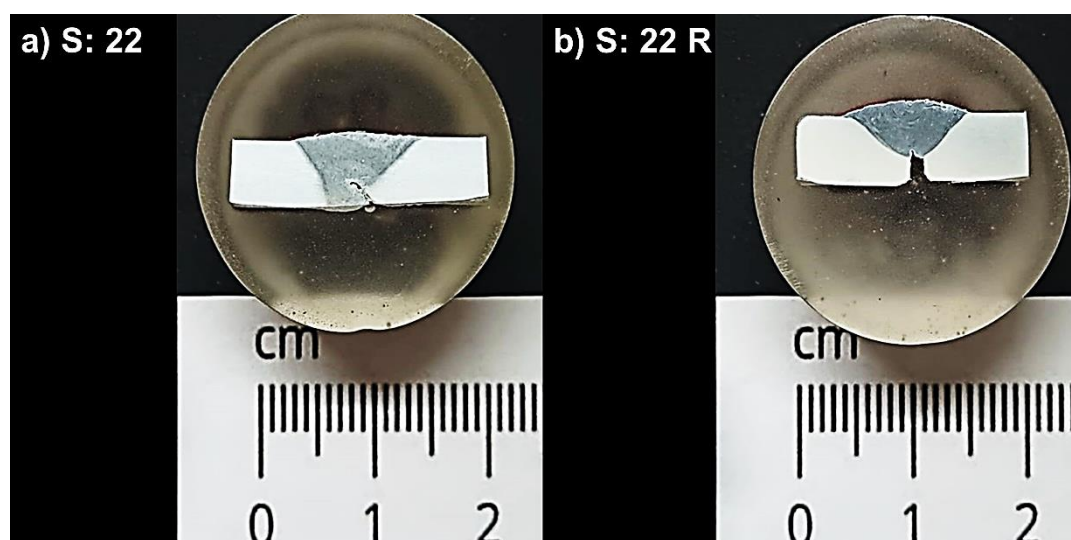


Figura 5. 72 Soldadura 22 y soldadura 22 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

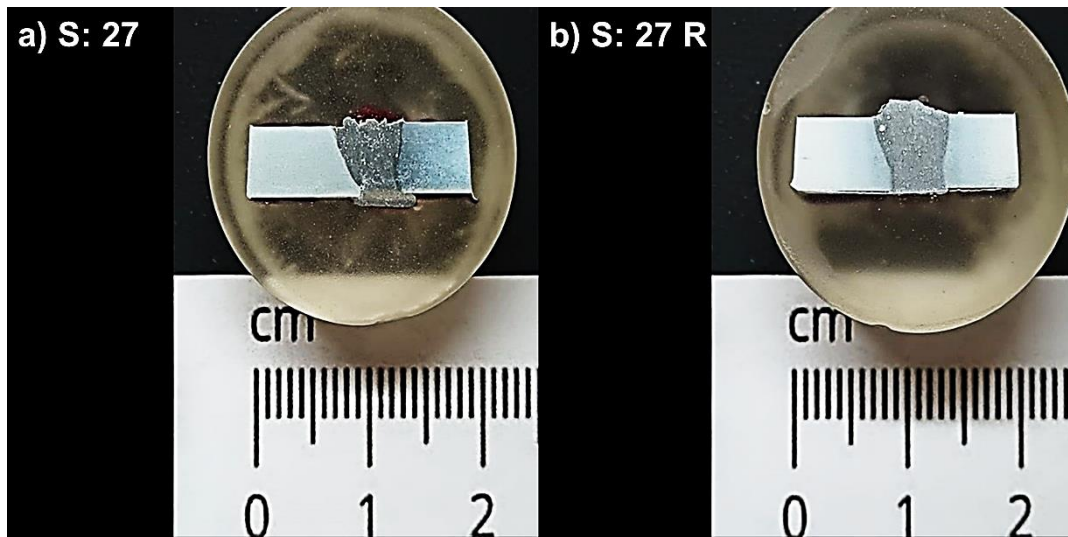


Figura 5. 73 Soldadura 27 y soldadura 27 R montadas en resina acrílica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

A continuación, se presentarán las soldaduras 4, 14, 26 y 33 junto con sus réplicas montadas en resina epóxica, desbastadas, pulidas y atacadas con el reactivo Keller en la Figura 5. 74, Figura 5. 75, Figura 5. 76 y Figura 5. 77 respectivamente.

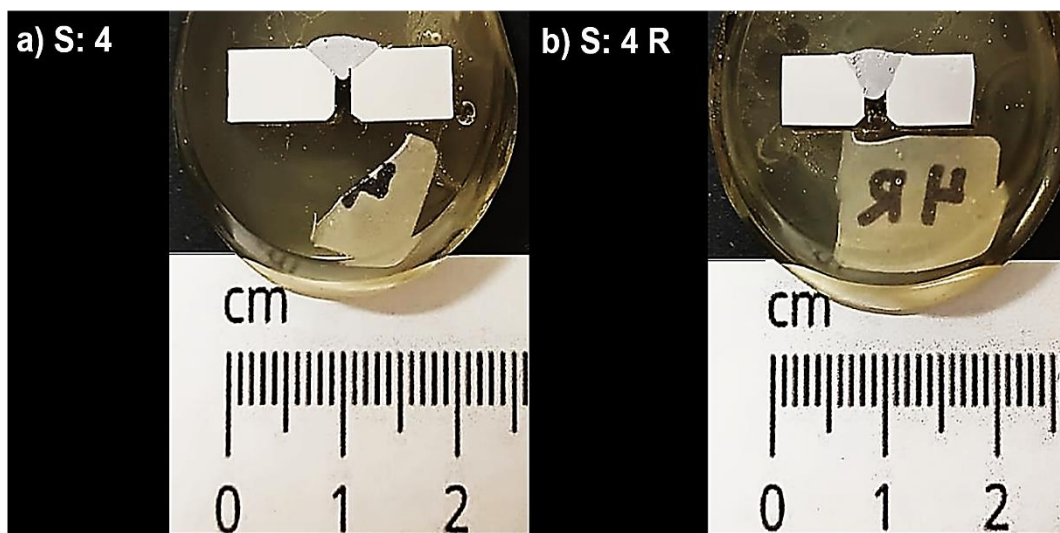


Figura 5. 74 Soldadura 4 y soldadura 4 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

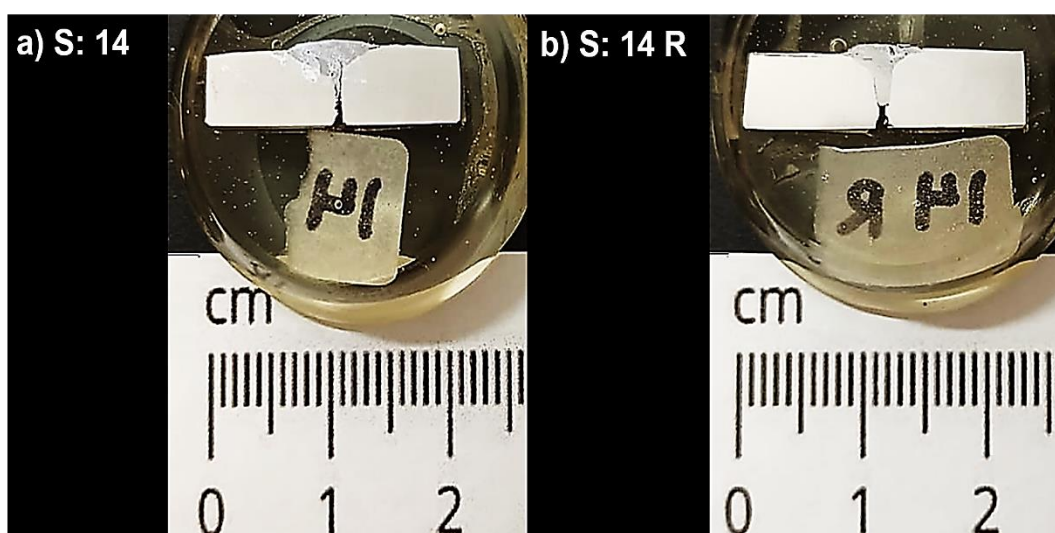


Figura 5. 75 Soldadura 14 y soldadura 14 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

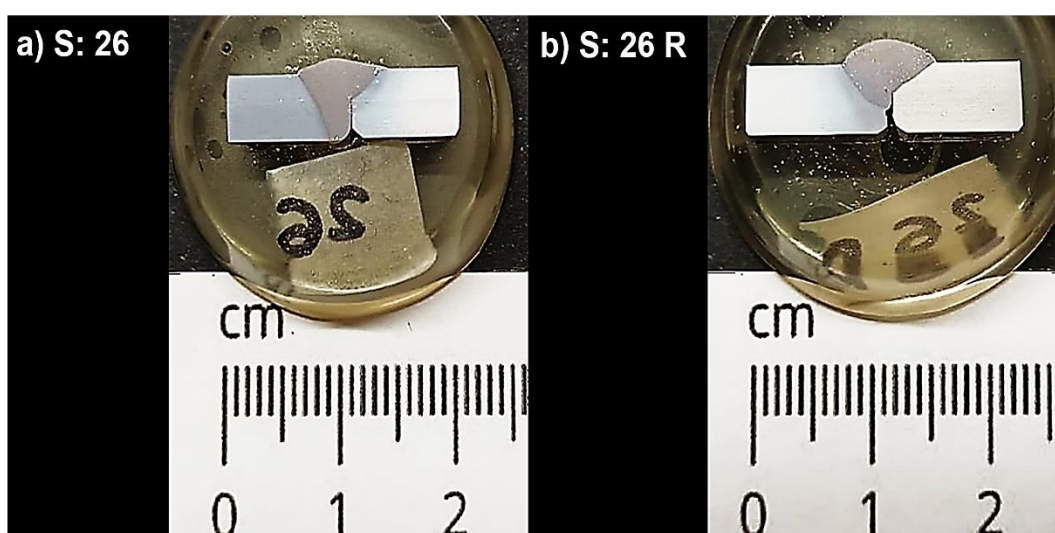


Figura 5. 76 Soldadura 26 y soldadura 26 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

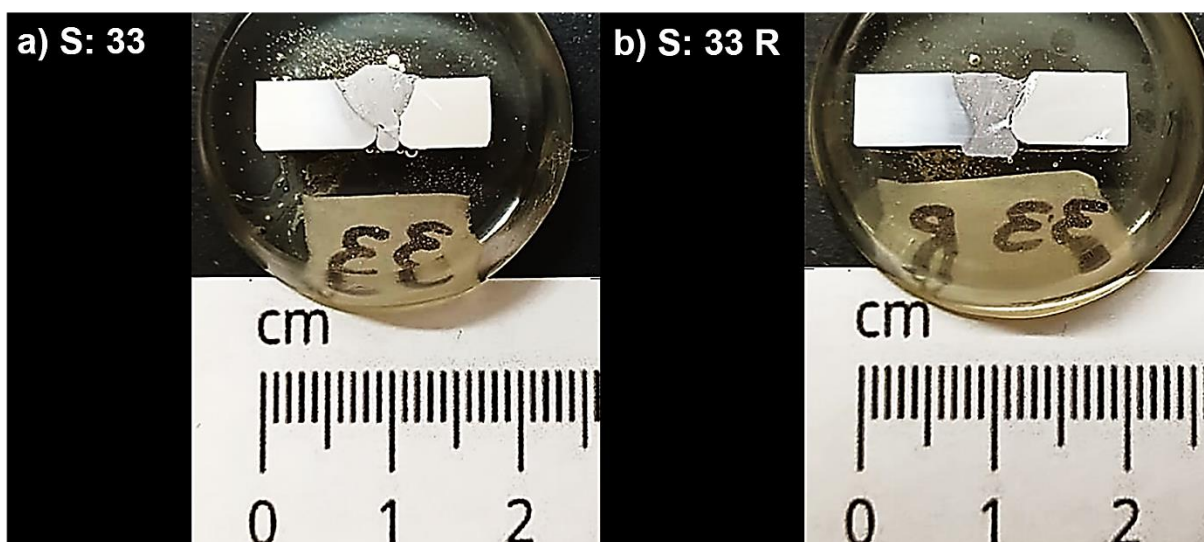


Figura 5. 77 Soldadura 33 y soldadura 33 R montadas en resina epóxica con acabado espejo y atacadas con reactivo Keller.

A continuación, se mostrarán los resultados y la interpretación del análisis de la macroestructura de las geometrías más representativas. Las geometrías más representativas serán aquellas en donde hubo una unión entre las placas de aleación de aluminio 5052-H32 con el microalambre.

5.3.5 Análisis macroestructural

Se analizaron las geometrías de las soldaduras 12, 17, 21, 22 y 27 montadas en resina acrílica y las soldaduras 4, 14, 26 y 33 montadas en resina epóxica con sus respectivas réplicas con el programa ImageJ. La geometría de la soldadura está conformada por la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración. Se emplearon los parámetros de la Tabla 5. 42 para realizar las soldaduras.

En la Figura 5. 78 y Figura 5. 79, los cuales representan la soldadura 21 y su réplica, se utilizó los parámetros de entrada de 39 V voltaje, 258 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 cm stick out y 1 mm de abertura de raíz. En la soldadura 21 se puede observar una soldadura libre de

grietas y de porosidad. En la réplica se puede apreciar una soldadura con porosidad. Las dimensiones de la soldadura 21 que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 1.23 mm de concavidad de la corona, 5.81 mm de penetración, 0 mm de concavidad de la raíz y 3.70 mm de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 1.15 mm de concavidad de la corona, 5.92 mm de penetración, 0 mm de concavidad de la raíz y 3.99 mm de ancho del cordón de soldadura.

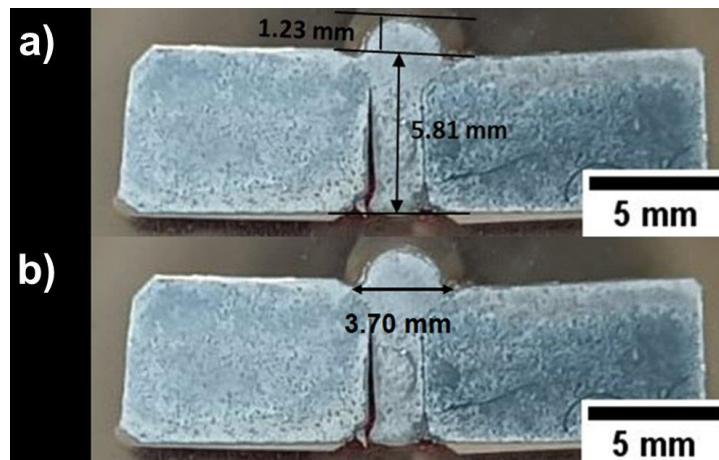


Figura 5. 78 Geometría del cordón de soldadura número 21, cuyos valores son a) 1.23 mm de concavidad de la corona y 5.81 mm de penetración y b) 3.70 mm de ancho del cordón de soldadura.

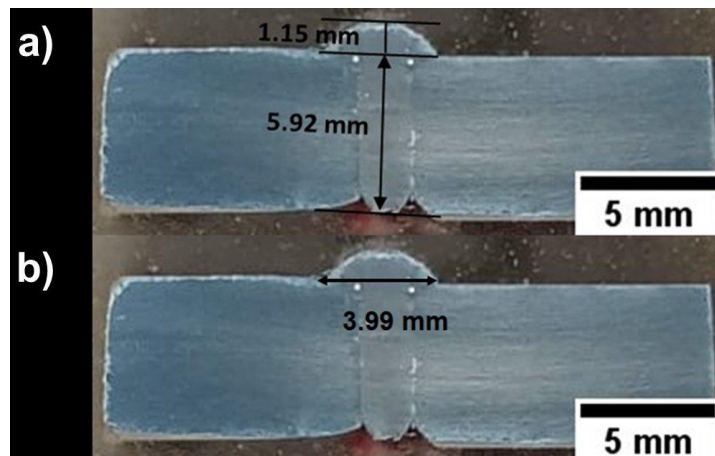


Figura 5. 79 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 21, cuyos valores son a) 1.15 mm de concavidad de la corona y 5.92 mm de penetración y b) 3.99 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la Figura 5. 80 y Figura 5. 81, lo cuales representan la soldadura 27 y su réplica, se emplearon los parámetros de entrada de 33 *V* volts, 258 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* de abertura de raíz. En la soldadura 27 se puede observar una soldadura libre de grietas, pero con porosidad. En la réplica se puede apreciar una soldadura libre de grietas, pero con porosidad. Las dimensiones que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 0.77 *mm* de concavidad de la corona, 5.79 *mm* de penetración, 1.18 *mm* de concavidad de la raíz y 7 *mm* de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 1.37 *mm* de concavidad de la corona, 5.80 *mm* de penetración, 0.53 *mm* de concavidad de la raíz y 6.88 *mm* de ancho del cordón de soldadura

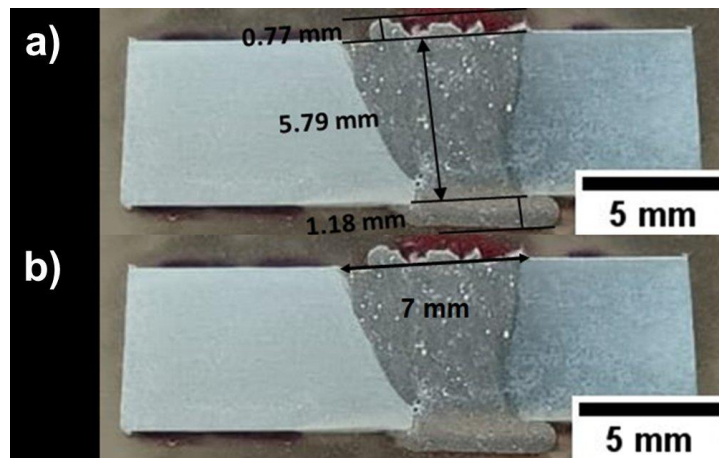


Figura 5. 80 Geometría del cordón de soldadura número 27, cuyos valores son a) 0.77 *mm* de concavidad de la corona, 5.79 *mm* de penetración y 1.18 *mm* de concavidad de la raíz y b) 7 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

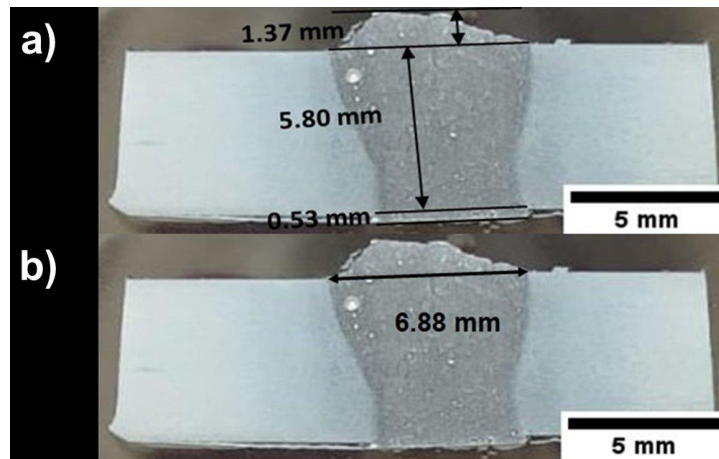


Figura 5. 81 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 27, cuyos valores son a) 1.37 mm de concavidad de la corona, 5.80 mm de penetración y 0.53 mm de concavidad de la raíz y b) 6.88 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la soldadura 17 se emplearon los parámetros de entrada de 33 V volts, 359 m/min velocidad de alimentación de hilo, 0.4 m/min velocidad de avance del robot, 2 cm stick out con 1 mm de abertura de raíz. La soldadura 17 se muestra en la Figura 5. 82. Se puede observar una soldadura con falta de fusión, con penetración incompleta, pero sin porosidad a simple vista. Las dimensiones que se obtuvieron con el programa ImageJ fueron 1.37 mm de concavidad de la corona, 3.87 mm de penetración, 0 mm de concavidad de la raíz y 11.62 mm del ancho del cordón de soldadura.

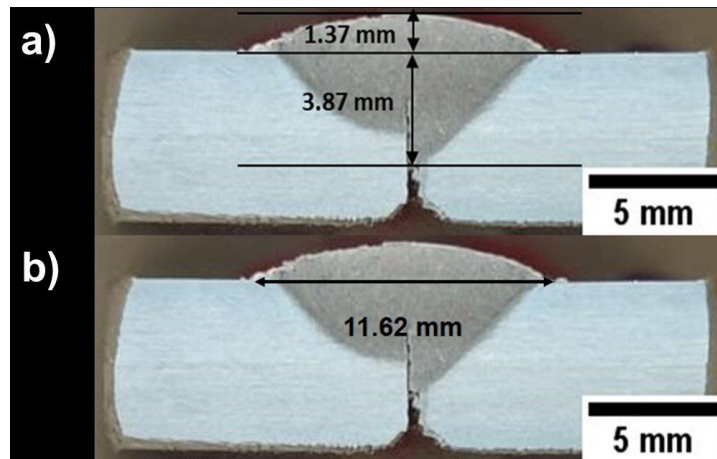


Figura 5. 82 Geometría del cordón de soldadura número 17, cuyos valores son a) 1.37 mm de concavidad de la corona y 3.87 mm de penetración y b) 11.62 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la réplica de la soldadura 17 se emplearon los mismos parámetros de entrada y se puede apreciar una soldadura con penetración incompleta, libre de grietas y sin porosidad a simple vista. La réplica de la soldadura 17 se puede observar en la Figura 5. 83. Las dimensiones que se obtuvieron del programa ImageJ fueron 1.65 mm de concavidad de la corona, 4.20 mm de penetración, 0 mm de concavidad de la raíz y 11.01 mm de ancho del cordón de soldadura.

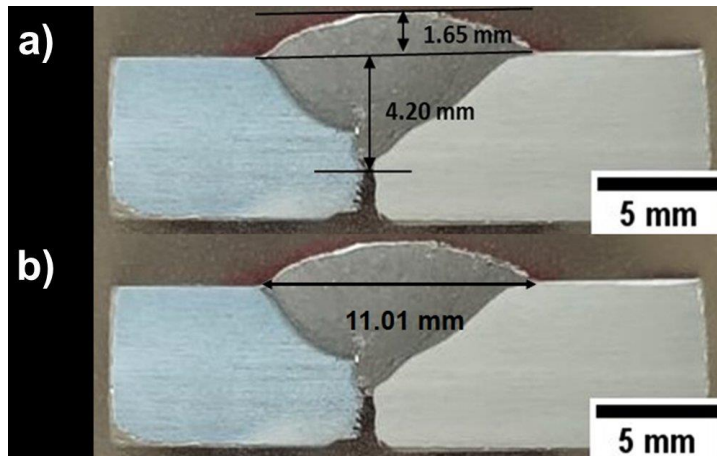


Figura 5. 83 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 17, cuyos valores son a) 1.65 mm de concavidad de la corona y 4.20 mm de penetración y b) 11.01 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la soldadura 22 se emplearon los parámetros de entrada de 39 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out con 1 *mm* de abertura de raíz. La soldadura 22 se puede observar en la Figura 5. 84. Se puede apreciar una soldadura con falta de fusión, con penetración incompleta y sin porosidad a simple vista. Las dimensiones que se obtuvieron con el programa ImageJ fueron 0.66 *mm* de concavidad de la corona, 5.79 *mm* de penetración, 0 *mm* de la concavidad de la raíz y 12.58 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

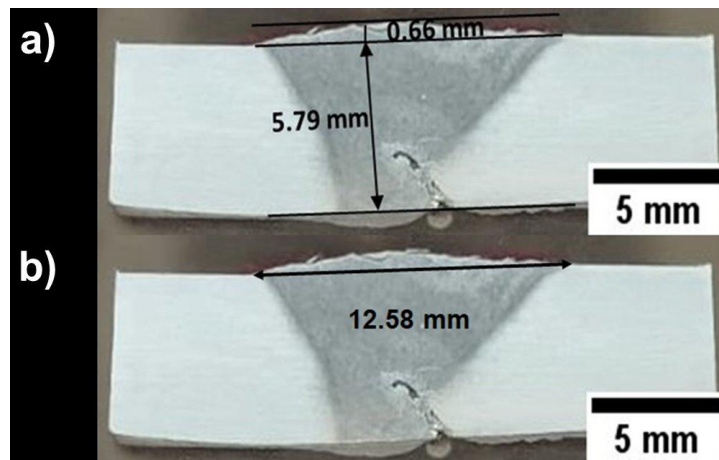


Figura 5. 84 Geometría del cordón de soldadura número 22, cuyos valores son a) 0.66 *mm* de concavidad de la corona y 5.79 *mm* de penetración y b) 12.58 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

En la réplica de la soldadura 22 se emplearon los mismos parámetros de entrada y se puede apreciar una soldadura con falta de penetración. La réplica de la soldadura 22 se muestra en la Figura 5. 85. Las dimensiones que se obtuvieron del programa ImageJ fueron 1.31 *mm* de concavidad de la corona, 3.75 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 11.39 *mm* del ancho del cordón de soldadura.

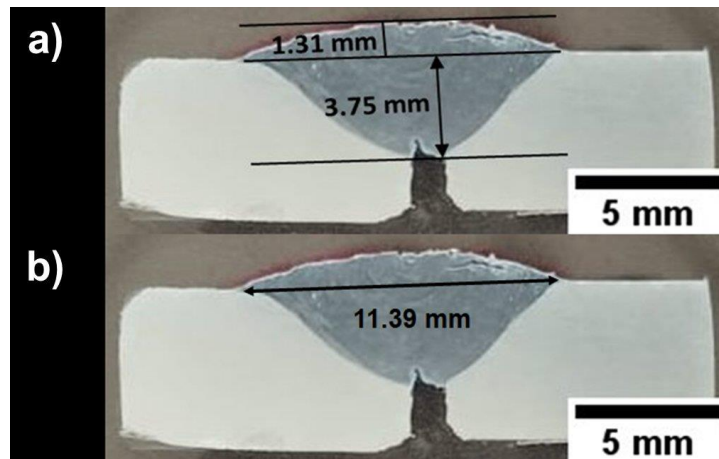


Figura 5. 85 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 22, cuyos valores son a) 1.31 mm de concavidad de la corona y 3.75 mm de penetración y b) 11.39 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la Figura 5. 86 se muestra la soldadura 14 y su réplica. Se utilizó los parámetros de entrada de 39 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.6 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* de abertura de raíz. En la soldadura 14 y su réplica se puede observar una soldadura libre de grietas y con falta de penetración. Las dimensiones de la soldadura 4 que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 0.68 *mm* de concavidad de la corona, 3.50 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 8.31 *mm* de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 0.69 *mm* de concavidad de la corona, 4.20 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 6.90 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

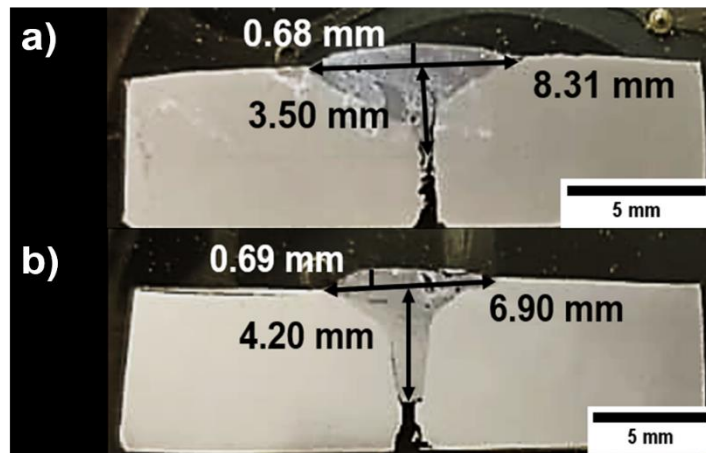


Figura 5. 86 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 14 y b) réplica de la soldadura 14.

En la Figura 5. 87 se muestra la soldadura 26 y su réplica. Se utilizó los parámetros de entrada de 33 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.6 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* de abertura de raíz. En la soldadura 26 y su réplica se puede observar una soldadura libre de grietas, con falta de penetración y porosidad. Las dimensiones de la soldadura 26 que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 1.23 *mm* de concavidad de la corona, 5.82 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 7.98 *mm* de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 2.02 *mm* de concavidad de la corona, 3.94 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 8.41 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

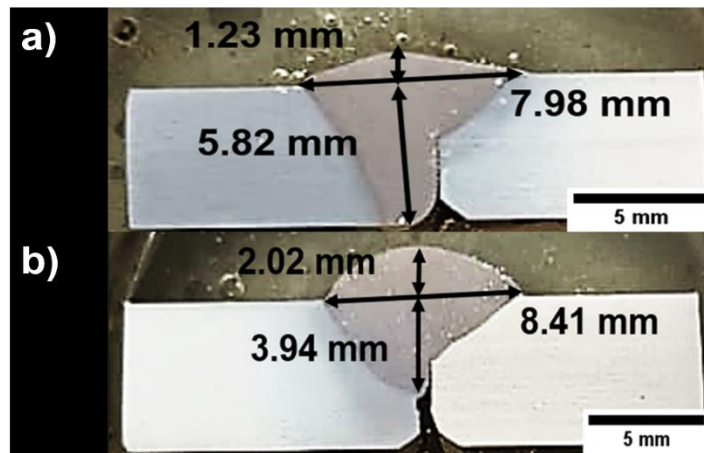


Figura 5. 87 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 26 y b) réplica de la soldadura 26.

Es conocido que al aumentar el voltaje y manteniendo constante todas las demás variables se incrementa el calor de entrada, permitiendo fundir más rápido el metal de aporte y el metal base. Por lo que, se espera obtener una penetración completa en la soldadura cuando el voltaje es alto. Sin embargo, el proceso de soldadura es complejo y las variables de entrada tienen un efecto con la geometría del cordón de soldadura.

La soldadura 21 y 27 tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando el voltaje. Los parámetros son 39 *V* volts, 258 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* abertura de raíz. Como se puede observar en la Figura 5. 78 se tiene un cordón de soldadura más estrecho, mientras que en la Figura 5. 80 un cordón de soldadura más ancho. En ambos casos se obtuvo una penetración completa.

Las soldaduras 17 y 22 también tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando el voltaje. Los parámetros son 33 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* abertura de raíz. La diferencia entre las soldaduras 21 y 27 es en la velocidad de hilo. Se puede observar que, al tener diferentes valores de voltaje, pero con una velocidad

de hilo de 359 m/min , los cordones de soldadura 17 y 22 serán anchos, pero con una penetración incompleta.

Las soldaduras 14 y 26 también tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando el voltaje. Los parámetros son 39 V volts, 359 m/min velocidad de alimentación de hilo, 0.6 m/min velocidad de avance del robot, 2 cm stick out y 1 mm abertura de raíz. La diferencia entre las soldaduras 21 y 27 es en la velocidad de hilo y en la velocidad de robot. Se puede observar que, al tener diferentes valores de voltaje, pero con una velocidad de hilo de 359 m/min y velocidad de robot de 0.6 m/min , los cordones de soldadura 14 y 26 también serán anchos, pero sin penetración completa.

Con respecto a la velocidad del robot, es conocido que al incrementar la velocidad de avance del robot y que las demás variables de entrada permanezcan constantes, existe menos calor de entrada. Al tener menor calor de entrada, la deposición del metal de aporte para una abertura de raíz grande tiene como efecto una falta de fusión, falta de llenado y porosidad.

La soldadura 17 y 26 tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando la velocidad de avance del robot. Los parámetros son 33 V volts, 359 m/min velocidad de alimentación de hilo, 0.4 m/min velocidad de avance del robot, 2 cm stick out y 1 mm abertura de raíz. Como se puede observar en la Figura 5. 82 se tiene un cordón de soldadura más ancho. Mientras que en la Figura 5. 87 un cordón de soldadura menos ancho. En ambos casos se obtuvo una penetración incompleta.

La soldadura 14 y 22 tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando la velocidad de avance del robot. Los parámetros son 39 V volts, 359 m/min velocidad de alimentación de hilo, 0.6 m/min velocidad de avance del robot, 2 cm stick out y 1 mm abertura de raíz. La diferencia entre las soldaduras 17 y 26 es en el voltaje de 39 V volts. Como se puede observar en la Figura 5. 86 se tiene un cordón de soldadura

menos ancho. Mientras que en la Figura 5. 84 se tiene un cordón de soldadura más ancho. En ambos casos se obtuvo una penetración incompleta.

El efecto de la velocidad de alimentación de hilo dependerá de la velocidad de robot. Aumentará o disminuirá la altura de la concavidad de la corona cuando se tiene una velocidad de robot alta o baja. También aumentará o disminuirá la anchura cuando se tiene una velocidad de alimentación de hilo alto o bajo.

La soldadura 21 y 22 tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando la velocidad de alimentación de hilo. Los parámetros son 39 *V* volts, 258 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* abertura de raíz. Como se puede observar en la Figura 5. 78 se tiene un cordón de soldadura con altura, menos ancho y con penetración. Mientras que en la Figura 5. 84 se tiene un cordón de soldadura con altura, más ancho y penetración.

La soldadura 17 y 27 tienen los mismos parámetros de entrada exceptuando la velocidad de alimentación de hilo. Los parámetros de entrada son 33 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 1 *mm* abertura de raíz. La diferencia entre las soldaduras 21 y 22 es en el voltaje de 33 volts. Como se puede observar en la Figura 5. 82 se tiene un cordón de soldadura con altura, más ancho y sin penetración. Mientras que en la Figura 5. 80 se tiene un cordón de soldadura con altura, ancho y penetración.

En la soldadura 12 se emplearon los parámetros de entrada de 33 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.6 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out con 3 *mm* de abertura de raíz. La soldadura 12 se puede observar en la Figura 5. 88. Se puede apreciar una soldadura con falta de fusión, con porosidad y falta de llenado de soldadura a simple vista. Las dimensiones que se obtuvieron del programa ImageJ fueron 0.46 *mm* de concavidad de la corona, 5.78 *mm* de penetración y 0.52 *mm* de concavidad de la raíz.

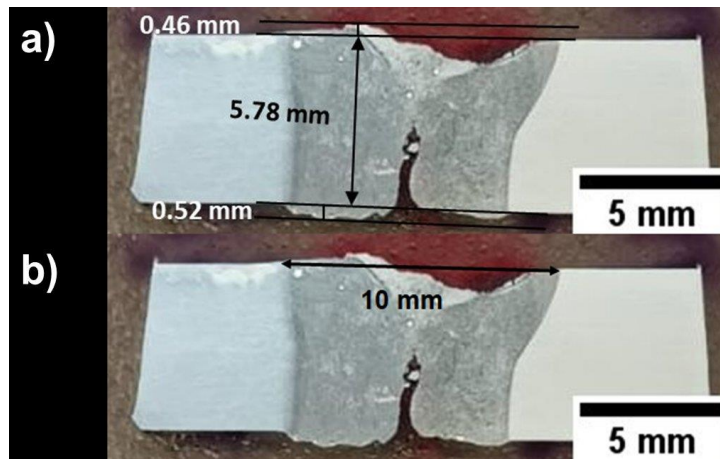


Figura 5. 88 Geometría del cordón de soldadura número 12, cuyos valores son a) 0.46 mm de concavidad de la corona, 5.78 mm de penetración y 0.52 mm de concavidad de la raíz y b) 10 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la réplica se emplearon los mismos parámetros de entrada y se puede apreciar una soldadura con falta de fusión, con porosidad y falta de llenado de soldadura a simple vista. Se puede ver la soldadura 12 en la Figura 5. 89. Las dimensiones que se obtuvieron del programa ImageJ fueron 0 mm de concavidad de la corona, 5.10 mm de penetración, 0.82 mm de concavidad de la raíz y 9.25 mm del ancho del cordón de soldadura.

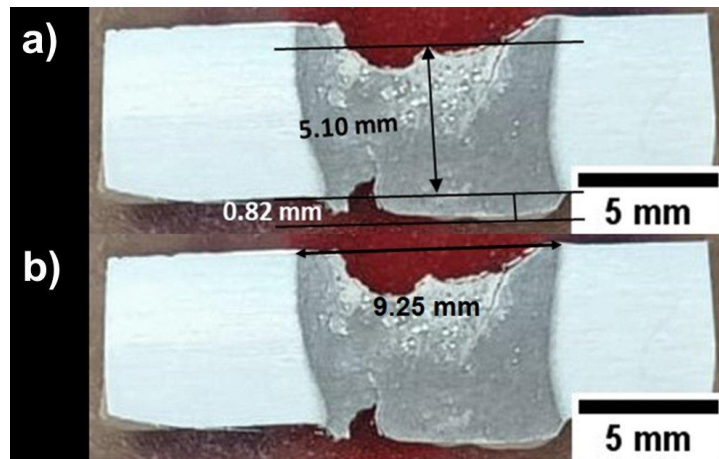


Figura 5. 89 Geometría de la réplica del cordón de soldadura número 12, cuyos valores son a) 5.10 mm de penetración y 0.82 mm de concavidad de la raíz y b) 9.25 mm de ancho del cordón de soldadura.

En la Figura 5. 90 se muestra la soldadura 33 y su réplica. Se utilizó los parámetros de entrada de 39 *V* volts, 359 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 *cm* stick out y 3 *mm* de abertura de raíz. En la soldadura 33 y su réplica se puede observar una soldadura libre de grietas y porosidad. Las dimensiones de la soldadura 33 que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 1.17 *mm* de concavidad de la corona, 6 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 7.03 *mm* de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 0 *mm* de concavidad de la corona, 5.88 *mm* de penetración, 1.09 *mm* de concavidad de la raíz y 0 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

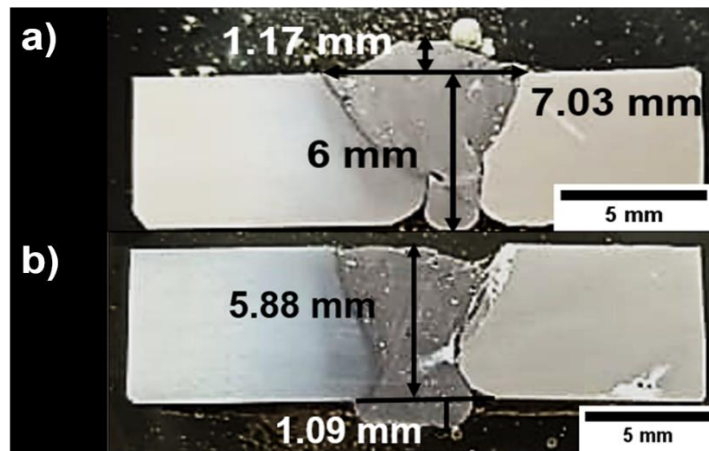


Figura 5. 90 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 33 y b) réplica de la soldadura 33.

En la Figura 5. 91 se muestra la soldadura 4 y su réplica. Se utilizó los parámetros de entrada de 36 *V* volts, 308 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.5 *m/min* velocidad de avance del robot, 1.7 *cm* stick out y 2 *mm* de abertura de raíz los cuales son los valores medios de los parámetros de entrada. En la soldadura 4 y su réplica se puede observar una soldadura libre de grietas, con falta de penetración y con porosidad. Las dimensiones de la soldadura 4 que se obtuvieron en el programa ImageJ fueron 0.96 *mm* de concavidad de la corona, 2.50 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 7.05 *mm* de ancho del cordón de soldadura. Las dimensiones de la réplica fueron 0.50 *mm* de concavidad de la corona, 3.67 *mm* de penetración, 0 *mm* de concavidad de la raíz y 6.23 *mm* de ancho del cordón de soldadura.

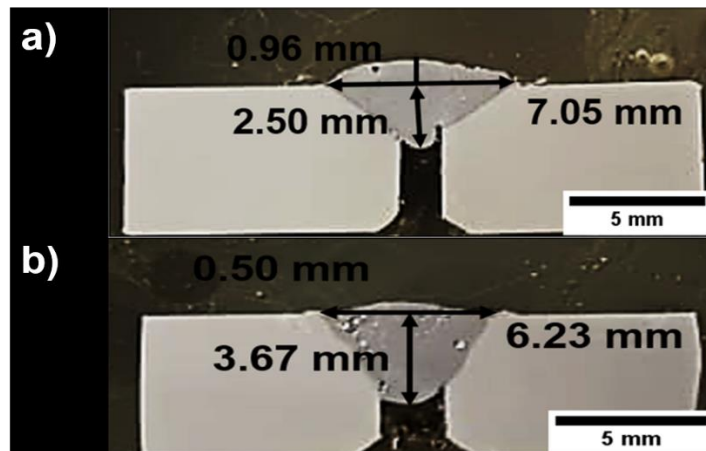


Figura 5. 91 Unión de las placas de aleación de aluminio a) Soldadura 4 y b) réplica de la soldadura 4.

Se puede inferir que, al utilizar los valores medios de las variables de entrada no genera un cordón de soldadura adecuado debido que no hay una penetración completa.

A continuación, se mostrarán en la Tabla 5. 43 las mediciones de las geometrías de los cordones de soldadura de la aleación de aluminio 5052-H32 unido por el proceso GMAW robotizado. Las mediciones de las geometrías se realizaron con el programa ImageJ.

Tabla 5. 43 Mediciones de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 con el programa ImageJ.

Soldadura	Corona	Raíz	Penetración
1	0	0	0
2*	0	0	0
3*	0	0	0
4	0.96	0	2.5
5*	0	0	0
6*	0	0	0
7*	0	0	0
8*	0	0	0
9*	0	0	0
10*	0	0	0
11*	0	0	0
12	0.46	0.52	5.78
13*	0	0	0
14	0.68	0	3.5
15*	0	0	0
16*	0	0	0
17	1.37	0	3.87
18*	0	0	0
19*	0	0	0
20*	0	0	0
21	1.23	0	5.81
22	0.66	0	5.79
23*	0	0	0
24*	0	0	0
25*	0	0	0
26	1.23	0	5.82
27	0.77	1.18	5.79
28*	0	0	0
29*	0	0	0
30*	0	0	0
31*	0	0	0
32*	0	0	0
33	1.17	0	6
34*	0	0	0
35*	0	0	0
36*	0	0	0

Nota: * indica aquellas soldaduras que no hubo una unión entre las placas de aleación de aluminio 5052-H32. Por lo que, las mediciones de las geometrías de soldadura con este indicativo son de cero.

De acuerdo a los resultados, se puede inferir que la soldadura 27 con los parámetros de entrada de 33 V volts, 258 *m/min* velocidad de alimentación de hilo, 0.4 *m/min* velocidad de avance del robot, 2 cm stick out y 1 mm abertura de raíz son adecuados para generar cordones de soldadura con calidad geométrica. La calidad de la geometría está regida por el código estructural del aluminio D1.2.

En base a la inferencia anterior, se realizó el cálculo de los errores de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 unidos por el proceso GMAW robotizado de nueve soldaduras. Se seleccionó la soldadura 4, 12, 14, 17, 21, 22, 26, 27 y 33 debido que fueron las únicas soldaduras que tuvieron una unión entre dos placas de aleación de aluminio. Por lo que, las soldaduras distintas a las nueve mencionadas anteriormente son consideradas como aquellas soldaduras que tienen una concavidad en la corona, raíz, penetración y calidad de cero.

Dicho todo lo anterior, se calculó del error es cual es la diferencia entre el valor real y el cálculo aproximado de la geometría. Además, se calculó el error cuadrático medio para conocer el error total de las 9 soldaduras que obtuvieron una unión entre las placas de aleación de aluminio 5052-H32. La medición real de la salida, el cálculo de la salida, el error de la salida y el error cuadrático medio de la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad se exponen en la Tabla 5. 44, Tabla 5. 45, Tabla 5. 46 y Tabla 5. 47.

Tabla 5. 44 Concavidad de la corona. Salida real, salida calculada y error calculado.

Soldadura	Medición real de la corona	Cálculo de la corona	Error de la corona	Error cuadrático medio
4	0.96	0.90263714	0.05736286	0.170819
12	0.46	0.38149174	0.07850826	
14	0.68	1.25	-0.57	
17	1.37	1.25	0.12	
21	1.23	0.39670807	0.83329193	
22	0.66	1.25	-0.59	
26	1.23	1.25	-0.02	
27	0.77	0.39670807	0.37329193	
33	1.17	1.25	-0.08	

Tabla 5. 45 Concavidad de la raíz. Salida real, salida calculada y error calculado.

Soldadura	Medición real de la raíz	Cálculo de la raíz	Error de la raíz	Error cuadrático medio
4	0	0.0004	-0.0004	0.140311
12	0.52	1	-0.48	
14	0	0.00020408	-0.00020408	
17	0	0.00020408	-0.00020408	
21	0	1	-1	
22	0	0.00020408	-0.00020408	
26	0	0.00020408	-0.00020408	
27	1.18	1	0.18	
33	0	0.00020408	-0.00020408	

Tabla 5. 46 Penetración. Salida real, salida calculada y error calculado.

Soldadura	Medición real de la penetración	Cálculo de la penetración	Error de la penetración	Error cuadrático medio
4	2.5	2.50070566	-0.00070566	1.22060
12	5.78	5.99941176	-0.21941176	
14	3.5	5.99941176	-2.49941176	
17	3.87	5.99941176	-2.12941176	
21	5.81	5.99948276	-0.18948276	
22	5.79	5.99941176	-0.20941176	
26	5.82	5.99941176	-0.17941176	
27	5.79	5.99948276	-0.20948276	
33	6	5.99941176	0.00058824	

Tabla 5. 47 Calidad. Salida real, salida calculada y error calculado.

Soldadura	Medición real de la calidad	Cálculo de la calidad	Error de la calidad	Error cuadrático medio
4	0.26779333	0.2742343	-0.00644097	0.08347
12	0.90829437	0.99972769	-0.09143332	
14	0.39994175	0.99972457	-0.59978283	
17	0.39995272	0.99972457	-0.59977185	
21	0.93313988	0.99975613	-0.06661625	
22	0.92251693	0.99972457	-0.07720764	
26	0.93639305	0.99972457	-0.06333153	
27	0.90507936	0.99975613	-0.09467677	
33	0.99996507	0.99972457	0.00024049	

5.4 Complejidad en el proceso de soldadura GMAW robotizado

Como se mencionó anteriormente, en los procesos de soldadura actúan al mismo tiempo los tres tipos de transmisión térmica. Recordando que en esta investigación se utilizó la aleación de aluminio 5052-H32, cuya superficie tiene la propiedad o característica de ser reflectante. La propiedad reflectante genera la problemática de reflejar el calor hacia la antorcha produciendo que el micro alambre ER5356 se funda internamente en la punta de contacto.

Durante la experimentación, se presentó la problemática de emplear un stick out de 1.5 *cm*. Se observó que, al finalizar el recorrido de la soldadura el metal fundido del micro alambre se solidifica internamente en la punta de contacto. Por lo que, es imposible recuperar el consumible como se puede ver en la Figura 5. 92. Al aumentar el stick out sin sobrepasar los 2 *cm*, se puede llegar a evitar el desperdicio de este consumible. Este tipo de problemática es común durante la soldadura en aluminio y sus aleaciones.



Figura 5. 92 Puntas de contacto en donde el microalambre fundido se solidifico internamente.

Otra problemática que se encontró durante la soldadura fue el microalambre. Al realizar las soldaduras, el microalambre ER5356 puede enredarse o doblarse internamente en el liner como se muestra en la Figura 5. 93. Esto es debido a la

maleabilidad de este tipo de material, por consiguiente, es fácil que ocurra este tipo de incidente.



Figura 5. 93 Microalambre enredado internamente.

Las problemáticas que se presentaron durante las soldaduras de placas de aleación de aluminio 5052-H32 unidos por el proceso GMAW robotizado, no se han mencionado en ningún texto o artículo revisado durante la elaboración de la tesis.

6. CONCLUSIÓN

De acuerdo al estado del arte y al marco teórico, actualmente existen modelos matemáticos para calcular la transferencia de calor, el espesor relativo del metal base, predecir parte de la geometría del cordón de soldadura, la dureza o la resistencia de tensión. Tales predicciones o cálculos son realizados con técnicas estadísticas o por el método de elemento finito con un análisis de las ecuaciones de Rosenthal bidimensional o tridimensional.

Las investigaciones realizadas que emplean estas técnicas llegan a la suposición de que cumplen con los supuestos de normalidad, los supuestos de Rosenthal o que las variables a analizar no están correlacionadas entre sí pero que en la práctica o en la realidad no ocurre.

En esta investigación, se realizaron diferentes métodos estadísticos para determinar el comportamiento normal y la correlación de las variables del proceso GMAW semiautomatizado y robotizado. Para el proceso GMAW semiautomatizado y robotizado, se realizó la prueba de normalidad Anderson-Darling para conocer el comportamiento normal de las variables a estudiar. Se pudo afirmar que, las variables del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado y robotizado no tienen un comportamiento normal a pesar que, varios investigadores que emplean los procesos de soldadura en sus estudios suponen que si tienen un comportamiento normal.

Con respecto a la correlación entre las variables del proceso GMAW semiautomatizado, se pudo concluir que las variables de voltaje, corriente, velocidad y penetración tienen alguna dependencia entre sí. Por lo que, al incrementar o disminuir los parámetros de entrada del proceso GMAW semiautomatizado, afectarán de manera positiva o negativa a la penetración.

Por otra parte, las variables de entrada de voltaje, velocidad de hilo, velocidad de robot, stick out y abertura de raíz del proceso GMAW robotizado no están correlacionadas entre sí. Sin embargo, las variables de entrada con respecto a las salidas de concavidad de la corona, concavidad de la raíz y penetración si están correlacionadas entre sí. Además, se observó que la variable de entrada con mayor dependencia en las salidas del proceso GMAW robotizado es la abertura de raíz.

De acuerdo a los resultados de los métodos de regresión lineal simple y múltiple, se concluyó que las técnicas estadísticas no son adecuadas o suficientes para generar modelos matemáticos que puedan aproximar, predecir o estimar las salidas de interés con un error residual cercano a cero.

Se desarrolló una red neuronal perceptrón multicapa para clasificar o aproximar la penetración en el proceso GMAW semiautomatizado en el programa MATLAB R2020b. Se observó que la combinación de las funciones de activación lineal-sigmoidal, sigmoidal-sigmoidal y tangencial-sigmoidal con una arquitectura de $3 - S - 1$ lograron calcular una aproximación/clasificación del 90 % de la penetración. Este resultado se obtuvo a pesar del número limitado de soldaduras obtenidas en el proceso GMAW semiautomatizado. Recordando que “S” es el número de neuronas en la capa oculta de la arquitectura, en donde mínimo fueron 3 hasta un máximo de 10 neuronas en la capa oculta.

Se observó que, la mejor combinación para aproximar la penetración con la red neuronal perceptrón multicapa fue la lineal-sigmoidal. Esto es debido a que mostró el mejor tiempo de finalización de todo el procesamiento matemático, el menor número de épocas y el número de iteraciones necesarios para alcanzar un error menor o igual al permitido.

Se desarrollaron dos variantes del sistema triple difuso para el proceso GMAW semiautomatizado en el programa MATLAB R2020b. La primera variante logró

aproximar hasta un 70 % de las salidas, mientras que la segunda variante mostró una mejor aproximación de un 80 %. Por lo que, en base al porcentaje de aproximación se seleccionó la segunda variante del sistema triple difuso, para aproximar la calidad de la geometría del cordón de soldadura en el proceso GMAW semiautomatizado. Con la segunda variante se realizó una prueba de hasta 5 iteraciones, en donde se calculó el error en cada iteración. Se observó que en la tercera iteración alcanzó la mejor aproximación de las salidas de interés en un 90 %. Se percató que, al modificar los valores de entrada de la corriente y la velocidad disminuyen o incrementan el error en cada iteración.

Debido que el sistema triple difuso desarrollado para el proceso semiautomatizado demostró ser un excelente aproximador de las salidas de interés en un 90 %, se seleccionó este método para aproximar la concavidad de la corona, concavidad de la raíz, penetración y calidad de las soldaduras de aleación de aluminio 5052-H32 unidos por el proceso GMAW robotizado.

De acuerdo a los cálculos internos del sistema triple difuso del proceso GMAW robotizado los datos de entrada de voltaje, velocidad de alimentación de hilo, velocidad de avance del robot, stick out y abertura de raíz fueron modificados por la fusificación, inferencia y defusificación.

Los valores de entrada modificados por el sistema triple difuso, para el proceso GMAW robotizado mostraron una mejoría en la aproximación de la penetración de las soldaduras al modificar la abertura de raíz, el voltaje y la velocidad de alimentación del hilo. Sin embargo, se percató que al intentar soldar las placas de aleación de aluminio con un stick out de 1.5 *cm*, con una velocidad de alimentación de hilo de 359 *m/min*, con una velocidad de avance del robot de 0.4 o 0.6 *m/min* y una abertura de raíz de 1 *mm* es más probable que el microalambre se funda internamente en la punta de contacto y se solidifique internamente al finalizar la soldadura.

Esta problemática se le puede atribuir a que las aleaciones de aluminio tienen una superficie reflectante. Esta característica es la responsable de que las ondas de calor producidas por el calor de entrada reflejen de la superficie del material hacia la tobera. Las ondas de calor reflejadas aumentan la temperatura de la punta de contacto y por consiguiente funden más rápido el microalambre. Dicho lo anterior, no se ha encontrado algún registro en ningún texto o artículo referente a las problemáticas presentadas en esta investigación.

Se determinó que, el mejor conjunto de datos de entrada para el proceso GMAW robotizado que puede generar una geometría adecuada fue la soldadura 27. Los parámetros de la soldadura 27 son 33 *V* volts, 258 *m/min* de velocidad de hilo, 0.4 *m/min* de velocidad de robot, 2 *mm* de stick out y 1 *mm* de abertura de raíz.

Bibliografía

- [1] M. C. d. B. Payares, P. Muñoz de Escalona y Z. Cassier , «Modelo para la determinación del área del cordón en soldadura a tope de aluminio 6063-T5,» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 17, nº 1, 1997.
- [2] P. E. Murray y A. Scotti, Depth of penetration in gas metal arc welding, vol. 4, Science and Technology of welding and Joining, 1999.
- [3] V. Dey, D. Pratihari, M. N. Jha y A. V. Bapat, Optimization and prediction of weldment profile in bead-on-plate welding of Al 1100 plates using electron beam, Mumbai, 2010.
- [4] M. Dorta Almenara, J. Vidal, A. Mateo, G. Fargas y F. Camejo, «Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205,» *DYNA*, vol. 78, nº 169, pp. 206-215, 2011.
- [5] G. Rajkumar y D. N. Murugan, «Prediction of weld bead geometry using artificial neural networks on 2205 duplex stainless steel,» *European Journal of Scientific Research*, pp. 85-92, 2012.
- [6] M. Aghakhani, M. Mahdipour Jalilian y A. Karami, «Prediction of weld bead dilution in GMAW process using fuzzy logic,» *Applied Mechanics and Materials*, pp. 3171-3175, 2012.
- [7] P. A. Ruíz Rojas, Calidad en la soldadura: Inspección y detección con ensayos no destructivos.
- [8] G. A. Carpenter, S. Grossberg y J. H. Reynolds, «ARTMAP: Supervised Real-Time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-Organizing Neural Network,» *Neural Networks*, vol. 4, pp. 565-588, 1991.
- [9] G. A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon, J. H. Reynolds y D. B. Rosen, «Fuzzy ARTMAP: A Neural Network Architecture for Incremental Supervised

- Learning of Analog Multidimensional Maps,» *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, vol. 3, pp. 698-713, 1992.
- [10] R. J. Williamson, «Gaussian ARTMAP: A Neural Network for Fast Incremental Learning of Noisy Multidimensional Maps,» *Neural Networks*, vol. 9, nº 5, pp. 881-897, 1996.
- [11] O. Martín, M. López y F. Martín, «Redes neuronales artificiales para la predicción de la calidad en soldadura por resistencia por puntos,» *Revista de metalurgia*, pp. 345-353, 2006.
- [12] A. Al-Faruk, M. A. Hasib y N. Ahmed, «Prediction of Weld Bead Geometry and Penetration in Electric Arc Welding using Artificial Neural Networks,» *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 10, nº 04, pp. 19-24, 2010.
- [13] S. Penttilä, P. Kahkonen, J. Ratava y H. Eskelinen, «Artificial Neural Network Controlled GMAW System: Penetration and Quality Assurance in a Multi-Pass Butt Weld Application,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, nº 105, pp. 3369-3385, 2019.
- [14] D. Ramos, I. López Juárez y P. Perez, «Effect of process parameters on robotic GMAW bead area estimation,» *Procedia Technology*, vol. 7, pp. 398-405, 2013.
- [15] C. S. WU, T. Polte y D. Rehfeldt, A fuzzy logic system for process monitoring and quality evaluation in GMAW, Jinan, China, 2001.
- [16] I. S. Kim, J. S. Son, C. E. Park, I. J. Kim y H. H. Kim, «An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process,» *Journal of Materials Processing Technology*, nº 159, pp. 113-118, 2005.
- [17] K. Manikya y P. Srinivasa, «Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network,» *Journal of materials processing technology*, nº 200, pp. 300-305, 2008.

- [18] R. Sikora, T. Chady, P. Baniukiewicz y B. Piekarczyk, «Automatic classification of welding FLAWS using artificial intelligence algorithms,» *AIP Publishing*, vol. 28, nº 1096, pp. 1182-1189, 23 Marzo 2009.
- [19] N. D. Ghetiya y K. M. Patel, «Prediction of tensile strength in friction stir welded aluminium alloy using artificial neural network,» *Procedia technology*, nº 14, pp. 274-281, 2014.
- [20] V. Miguel, E. J. Martínez-Conesa, F. Segura, M. C. Manjabacas y E. Abellán, «Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura,» *Revista de Metalurgia*, vol. 48, nº 5, pp. 333-350, Octubre 2012.
- [21] J. M. Gómez de Salazar, A. Ureña, E. Villauriz, S. Manzanedo y I. Barrena, «Soldadura TIG y MIG de las aleaciones de aluminio 6061 y 7020. Estudios microestructurales y de propiedades mecánicas,» *Revista de metalurgia*, vol. 34, pp. 276-280, Mayo 1998.
- [22] S. B.N, D. K. T y P. Aravind, «Process Optimization of GMAW over AA6351 Aluminium Alloy using ANN,» *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, vol. 8, pp. 208-2018, September 2017.
- [23] F. Kolahan y M. Heidari, «A new approach for predicting and optimizing weld bead geometry in GMAW,» *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*, pp. 138-142, 2010.
- [24] Pedapati, Shasidaran, Kamal y Rani, «Optimum welding parameter for GMAW welding using soft computing techniques,» *AIP Publishing*, 2017.
- [25] V. Singh, M. Chandrasekaran, S. Samanta y M. Thirugnanasambandam, «Artificial neural network modelling of weld bead characteristics during GMAW of nitrogen strengthened austenitic stainless steel,» *AIP Publishing*, 2019.

- [26] B. Choudhury y M. Chandrasekaran, «Electron beam welding of aerospace alloy (Inconel 825): A comparative study of RSM and ANN modeling to predict weld bead area,» *Optik*, nº 219, pp. 1-15, 7 Julio 2020.
- [27] S. Vijila, S. Ananthalakshmi, M. Kalaiselvi, P. Vijayan y V. Esther, «Development of fuzzy rule based system for prediction of weld bead geometry,» *AIP Publishing*, 26 Marzo 2021.
- [28] F. Ramos Morales, A. Duffus Scott, M. Rodríguez Pérez, E. Díaz Cedré y J. Pozo Morejón, «Influence of temperature dependent physical properties of steel in finite element simulation of welding process,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, nº 48, pp. 87-96, Junio 2009.
- [29] W. G. Mojica Bustos, Determinación del flujo de calor de entrada mediante la técnica de termografía para un material base ASTM A-36 de diferentes espesores con el proceso SMAW, 2014.
- [30] J. L. Pacheco, M. Olmos M., R. Chamorro C. y J. Unfried, «Modelado de ciclos térmicos durante la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido en juntas disímiles de aceros inoxidable usando una aproximación teórico-experimental,» *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, vol. 30, nº 3, pp. 111-118, 2015.
- [31] M. E. Pérez Mauricio, Estudio de las herramientas de simulación para análisis térmicos en soldaduras de aceros inoxidable y AHSS empleados en la industria automotriz, Saltillo, 2015.
- [32] K. Weman, *Welding Processes handbook*, second ed., Woodhead, 2012.
- [33] H. Horwitz, *Soldadura: Aplicaciones y práctica*.
- [34] M. Turner, T.-A. Bayarsaikhan, H.-U. Hong y J.-H. Lee, «Influence of gas metal arc welding parameters on the bead properties in automatic cladding,» *Journal of welding and joining*, 2017.
- [35] R. Escalona García, *Manual de soldadura*, Octava ed., Naucalpan: R. L. O' Brien, 1996.
- [36] G. Mathers, *The welding of aluminum and its alloys*, Woodhead, 2002.

- [37] A3.0, AWS, Standard Welding Terms and Definitions, 12th ed., American National Standard, 2010.
- [38] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer y R. Aracil, Fundamentos de Robótica, segunda ed., McGraw-Hill, 1997.
- [39] Aluminum, Handbook, Physical Metallurgy and Processes, vol. 1, G. E. Totten, Ed., Marcel Decker, 2003.
- [40] ASM International, Handbook properties and selection: Nonferrous alloys and special-prupose materials, vol. 2, ASM International, 1990.
- [41] J. R. Kisell y R. L. Ferry, Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design, Second ed., Nwe York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [42] G. E. Totten y D. S. MacKenzie, Edits., Handbook of Aluminum: Alloy Production and Materials Manufacturing, vol. 2, New York, New York: Marcel Dekker, Inc..
- [43] P. Ponce Cruz, Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería, Primera ed., Alfaomega, 2010.
- [44] J. F. Castro García, Fundamentos para la implementación de red neuronal perceptrón multicapa mediante software, Guatemala, 2006.
- [45] S. Skansi, Introduction to deep learning, Springer, 2018.
- [46] C. Aggarwal, Neural network and deep learning, Springer, 2018.
- [47] A. Zilouchian y M. Jamshidi, Edits., Intelligent control systems using soft compting methodologies, CRC, 2001.
- [48] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Hudson Beale y O. De Jesús, Neural Network Design, second ed., eBook.
- [49] D. Wackerly, W. Mendenhall y R. Scheaffer, Estadística matemática con aplicaciones, Séptima ed., CENGAGE Learning, 2010.
- [50] D. Montgomery, Diseño y análisis de experimentos, Segunda ed., Limusa Wiley, 2004.

- [51] R. Walpole, R. Myers, S. Myers y K. Ye, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Novena ed., Pearson, 2012.
- [52] D. Montgomery, Design and analysis of experiments, Ninth ed., Wiley, 2017.
- [53] M. Deshpande, J. M. Kshirsagar y H. M. Dharmadhikari, Optimization of GMAW process parameters to improve the length of penetration in EN 10025 S 235 grade, vol. 35, Maharashtra, 2016, pp. 74-78.
- [54] A. Handbook, Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, vol. 2, ASM International.
- [55] D. R. Askeland, P. P. Fulay y J. W. Wendelin, Ciencia e ingeniería de los materiales, Sexta ed., CENGAGE Learning, 2011.
- [56] G. Lara, Estudio comparativo en un acero API 5L X70 al aplicarle soldadura empleando transferencias pulsadas y convencionales con el proceso GMAW, verificando su respuesta al HIC, Saltillo, 2009.
- [57] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, Cuarta ed., Mc Graw Hill, 2011.
- [58] S. Kou, Welding Metallurgy, Second ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [59] A. W. Society, AWS D1.1/D1.1 M Structural Welding Code-Steel, veinteaba ed., 2005.
- [60] American Welding Society, AWS D1.2/D1.2 M Structural Welding Code-Aluminum, Cuarta ed., 2003.
- [61] S. Bhattacharya, K. Pal y S. K. Pal, Multi-sensor based prediction of metal deposition in pulsed gas metal arc welding using various soft computing models, Kharagpur: El sevier, 2012.
- [62] P. Kumar Gupta y D. A. Kamboj, SMAW process parameters optimization using Taguchi & Fuzzy Logic, Jagadhri, 2017.
- [63] ASM International, Nondestructive Evaluation and Quality Control, vol. 17, 1989.
- [64] ASM International, E 165 Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination.

- [65] A. P. Guliáev, Metalografía Tomo I, Mir Moscú, 1978.
- [66] N. Ramaphoko, S. Skhosane y N. Maledi, «Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Laser Beam-Welded Dissimilar Joints between A6000 Aluminum Alloy and Galvanized Steel,» *materials*, vol. 15, nº 2, 12 January 2022.
- [67] A. Naumov, I. Morozova, E. Rylkov, A. Obrosoy, F. Isupov, V. Michailov y A. Rudskoy, «Metallurgical and Mechanical Characterization of High-Speed Friction Stir Welded AA 6082-T6 Aluminum Alloy,» *materials*, vol. 12, nº 24, 14 December 2019.
- [68] M. Vyskoc, M. Sahul, M. Dománkova y P. Jurci, «The Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AW5083 Aluminum Laser Weld Joints,» *metals*, vol. 10, nº 11, 2020.
- [69] K. Cooke y T. Khan, «Microstructure Development during Low-Current Resistance Spot Welding of Aluminum to Magnesium,» *Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, nº 2, 14 June 2019.
- [70] L. Wan y Y. Huang, «Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Friction Stir Lap Weld,» *metals*, vol. 7, nº 12, 5 December 2017.

Anexo A

Propiedades de conjuntos clásicos o nítidos

Conmutativa:

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

Asociativa:

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$$

Distributiva:

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

Idempotencia:

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

Identidad:

$$A \cup \phi = A$$

$$A \cap X = A$$

$$A \cap \phi = \phi$$

$$A \cup X = X$$

Anexo B

Infraestructura

Se tendrá acceso a los laboratorios del Tecnológico de Saltillo, COMIMSA y CINVESTAV como:

- El laboratorio de metalografía el cual se tendrá a disposición los equipos para la caracterización del material y de la soldadura tales como la máquina de corte, la máquina montadora, las máquinas desbastadoras, las máquinas pulidoras, agentes reactivos, el microscopio óptico con analizador de imágenes acoplado mediante una cámara y durómetros para determinar la dureza.
- El laboratorio de pruebas mecánicas el cuál se tendrá a disposición la máquina universal de tensión.
- Se contará con equipos para evaluar la calidad de la soldadura como el kit de líquidos penetrantes.
- Se tendrá acceso a las celdas de manufactura de dos centros de investigación para realizar la experimentación (ver Anexo B. 1 y Anexo B. 2).



Anexo B. 1 Robot soldador de la celda de manufactura COMIMSA.



Anexo B. 2 Robot soldador de la celda de manufactura CINVESTAV.

Anexo C

Reglas difusas del sistema difuso del proceso

	Entradas			Salidas		
	Voltaje (V)	Corriente (I)	Velocidad (Ve)	Concavidad de la corona (CC)	Concavidad de la raíz (CR)	Penetración (P)
	B= Bajo	B= Baja	B= Baja	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca
	M= Medio	M= Media	M= Media	P= Poca	P= Poca	P= Poca
	A= Alto	A= Alta	A= Alta	S= Suficiente	S= Suficiente	S= Suficiente
			MA= Muy alta	D= Demasiado		
Número de reglas difusas						
1	B	B	B	D	P	S
2			M	S	S	S
3			A	S	MP	P
4			MA	S	MP	P
5		M	B	D	P	S
6			M	S	P	S
7			A	S	MP	P
8			MA	S	MP	P
9		A	B	D	P	S
10			M	S	P	S
11			A	S	S	S
12			MA	S	S	S
13	M	B	B	D	P	S
14			M	S	P	S
15			A	S	MP	P
16			MA	S	MP	P
17		M	B	S	P	S

18			M	S	S	S
19			A	S	P	S
20			MA	S	P	S
21			B	D	P	S
22		A	M	S	P	S
23			A	S	MP	P
24			MA	S	MP	P
25			B	S	MP	P
26	A	B	M	S	MP	P
27			A	S	P	S
28			MA	S	P	S
29			B	D	P	S
30		M	M	S	P	S
31			A	S	MP	P
32			MA	S	MP	P
33			B	S	P	S
34		A	M	S	P	S
35			A	S	S	S
36			MA	S	MP	P

Anexo D

Reglas difusas del sistema difuso de calidad

	Entradas			Salida
	Concavidad de la corona (CC)	Concavidad de la raíz (CR)	Penetración (P)	Calidad (C)
	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca	N= Nula
	P= Poca	P= Poca	P= Poca	MP= Muy poca
	S= Suficiente	S= Suficiente	S= Suficiente	A= Adecuada
	D= Demasiado			E= Excelente
Número de reglas difusas				
1	MP	MP	MP	N
2			P	MP
3			S	E
4		P	MP	N
5			P	MP
6			S	E
7		S	MP	N
8			P	A
9			S	E
10	P	MP	MP	N
11			P	MP
12			S	E
13		P	MP	N
14			P	MP
15			S	E
16		S	MP	N
17			P	A
18			S	E

19	S	MP	MP	N
20			P	A
21			S	E
22		P	MP	N
23			P	A
24			S	E
25		S	MP	N
26			P	A
27			S	E
28	D	MP	MP	N
29			P	A
30			S	E
31		P	MP	N
32			P	A
33			S	E
34		S	MP	N
35			P	A
36			S	E

Anexo E

Reglas difusas del sistema difuso de ajuste

	Entradas				Salidas		
	Concavidad de la corona (CC)	Concavidad de la raíz (CR)	Penetración (P)	Error	Voltaje (V)	Corriente (I)	Velocidad (Ve)
	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca	MP= Muy Poca	P=Pequeño	CN= Cambio Negativo	CN= Cambio Negativo	CN= Cambio Negativo
	P= Poca	P= Poca	P= Poca	D=Deseado	SC= Sin cambio	SC= Sin cambio	SC= Sin cambio
	S= Suficiente	S= Suficiente	S= Suficiente	G=Grande	CP= Cambio Positivo	CP= Cambio Positivo	CP= Cambio Positivo
	D= Demasiado						
Número de reglas difusas							
1	MP	MP	MP	P	SC	SC	SC
2				D	SC	SC	SC
3				G	SC	SC	SC
4			P	P	SC	SC	SC
5				D	SC	SC	SC
6				G	SC	SC	SC
7			S	P	SC	SC	SC
8				D	SC	SC	SC
9				G	SC	SC	SC
10		P	MP	P	SC	SC	SC
11				D	SC	SC	SC
12				G	SC	SC	SC
13			P	P	SC	SC	SC
14				D	SC	SC	SC
15				G	SC	SC	SC
16			S	P	SC	SC	SC
17				D	SC	SC	SC
18				G	SC	SC	SC
19		S	MP	P	SC	SC	SC
20				D	SC	SC	SC
21				G	SC	SC	SC
22			P	P	SC	SC	SC
23				D	SC	SC	SC
24				G	SC	SC	SC
25			S	P	SC	SC	SC

26	P	MP	MP	D	SC	SC	SC
27				G	SC	SC	SC
28				P	SC	SC	SC
29				D	SC	SC	SC
30				G	SC	SC	SC
31				P	SC	SC	SC
32				D	SC	SC	SC
33				G	SC	SC	SC
34				P	SC	SC	SC
35				D	SC	SC	SC
36				G	SC	SC	SC
37				P	SC	SC	SC
38				D	SC	SC	SC
39				G	SC	SC	SC
40				P	SC	SC	SC
41				D	SC	SC	SC
42				G	SC	SC	SC
43				P	SC	SC	SC
44				D	SC	SC	SC
45				G	SC	SC	SC
46				P	SC	SC	SC
47				D	SC	SC	SC
48				G	SC	SC	SC
49				P	SC	SC	SC
50				D	SC	SC	SC
51				G	SC	SC	SC
52				P	SC	SC	SC
53				D	SC	SC	SC
54				G	SC	SC	SC
55	S	MP	MP	P	SC	SC	SC
56				D	SC	SC	SC
57				G	SC	SC	SC
58			P	P	SC	CP	CN
59				D	SC	SC	SC
60				G	SC	SC	SC
61			S	P	SC	SC	SC
62				D	SC	SC	SC
63				G	SC	SC	SC
64		P	MP	P	SC	SC	SC
65				D	SC	SC	SC

66				G	SC	SC	SC
67				P	SC	CP	CN
68				D	SC	CP	CN
69				G	SC	CP	CN
70			S	P	SC	SC	SC
71				D	SC	SC	SC
72				G	SC	SC	SC
73		S	MP	P	SC	SC	SC
74				D	SC	SC	SC
75				G	SC	SC	SC
76			P	P	SC	SC	SC
77				D	SC	SC	SC
78				G	SC	SC	SC
79			S	P	SC	SC	SC
80				D	SC	SC	SC
81				G	SC	SC	SC
82	D	MP	MP	P	SC	SC	SC
83				D	SC	SC	SC
84				G	SC	SC	SC
85			P	P	SC	SC	SC
86				D	SC	SC	SC
87				G	SC	SC	SC
88			S	P	SC	SC	SC
89				D	SC	SC	SC
90				G	SC	SC	SC
91		P	MP	P	SC	SC	SC
92				D	SC	SC	SC
93				G	SC	SC	SC
94			P	P	SC	SC	SC
95				D	SC	SC	SC
96				G	SC	SC	SC
97			S	P	SC	SC	SC
98				D	SC	SC	SC
99				G	SC	SC	SC
100		S	MP	P	SC	SC	SC
101				D	SC	SC	SC
102				G	SC	SC	SC
103			P	P	SC	SC	SC
104				D	SC	SC	SC
105				G	SC	SC	SC

106			S	P	SC	SC	SC
107				D	SC	SC	SC
108				G	SC	SC	SC

Anexo F

Código del diseño del sistema de control difuso para aproximar la geometría del cordón de soldadura y la calidad

```

clc
clear all

%% sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado
% PRIMERA ITERACIÓN
% A continuación, se muestra la matriz del diseño de experimento
% preliminar del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado con los
% datos de entrada de Voltaje, Corriente y Velocidad de soldadura.

tic

Entrada1=[26, 205, 9.39;
          28, 240, 11.17;
          28, 240, 12.7;
          24, 240, 11.68;
          24, 170, 11.43;
          24, 170, 8.46;
          28, 170, 9.14;
          24, 240, 10.16;
          26, 205, 9.65;
          28, 170, 7.15]

[m,n]=size(Entrada1);

% Para poder utilizar la primera parte del diseño del sistema de control
% difuso, se requiere que el código lea el archivo.fis, el cual contiene
% no solo la base de conocimientos sino también la fusificación,
% la inferencia y la defusificación del proceso.

Proceso=readfis('proceso3.fis')

% Una vez leído el archivo anterior, se evaluará la matriz de salida con
% respecto a los datos de entrada y al proceso, esta salida mostrará la
% geometría del cordón de soldadura (la concavidad de la corona,
% la concavidad de la raíz y la penetración).

salida_proceso1= evalfis(Proceso, Entrada1)

% Para poder hacer una comparación de la calidad de las salidas reales
% con respecto a los que el diseño del sistema de control difuso nos
% proporciona, se requiere de conocer la matriz de las salidas reales de
% la concavidad de la corona, concavidad de la raíz y la penetración,

```

```

% tales medidas se midieron en físico de manera aproximada.

Salidas_reales= [3, 0, 6;
                 2, 2, 6;
                 2, 0, 3.2;
                 2, 2, 6;
                 2, 0, 3;
                 2, 2, 6;
                 2, 0, 4.5;
                 2, 2, 6;
                 2.1, 2, 6;
                 2, 0, 5]

%% sistema difuso de calidad

% Recordando que las salidas del primer sistema difuso, que aproxima la
% geometría del cordón de soldadura, se convertirán en las entradas del
% segundo sistema difuso para poder aproximar la calidad.

Entrada2= salida_procesol

% Para poder utilizar la segunda parte del diseño del sistema de control
% difuso, se requiere que el código lea un segundo archivo.fis,
% el cual contiene la base de conocimientos, la fusificación,
% la inferencia y la defusificación, pero en este caso tendrá la
% información para aproximar la calidad.

Calidad=readfis('Calidad2.fis')

% Una vez leído el archivo anterior, se evaluará una nueva matriz
% de salida con respecto a los nuevos datos de entrada (Entrada2)
% esta salida mostrará la aproximación de la calidad en
% valores reales de cada cordón de soldadura.

salida_calculada_calidad1= evalfis(Calidad, Entrada2)

% Recordando que, se necesita de realizar una comparación de las salidas
% de la calidad que nos proporciona el sistema de control difuso,
% se necesita conocer la matriz de la calidad de las salidas reales.

salida_real_calidad= evalfis (Calidad, Salidas_reales)

% Se calcula el error con ayuda de la salida_real_calidad y
% la salida_calculada_calidad1. La salida_real_calidad representa la
% evaluación
% de la calidad con respecto a los valores reales medidos de la corona,
% la raíz y la penetración, mientras que la salida_calculada_calidad1
% representa
% la aproximación de la geometría y la calidad, utilizando los datos de
% entrada de voltaje, corriente y velocidad.

```

```

Error1= salida_real_calidad-salida_calculada_calidad1

%% Sistema difuso de ajuste

% El error es el dato más importante que se debe de conocer para
% desarrollar el tercer sistema difuso, llamado "AJUSTE".

% Para poder utilizar la tercera parte del diseño del sistema de control
% difuso, se requiere que el código lea un tercer archivo.fis,
% el cual contiene la base de conocimientos, la fusificación,
% la inferencia y la defusificación, pero en este caso tendrá la
% información para calcular los valores de ajuste necesarios para
% modificar los tres datos de entrada del proceso de soldadura.

Ajuste=readfis('Ajuste.fis')

% Se debe de crear una nueva matriz (Entrada3).
% La Entrada3 tiene como componentes los datos de entrada del segundo
% sistema difuso de calidad junto con el error calculado (Entrada2).

Entrada3= [2.0003    1.3062    5.9994    0.0002;
           2.0002    0.3233    4.1220    0.4142;
           2.0002    0.0002    3.9999   -0.0539;
           2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
           2.0002    0.0002    3.9999   -0.0822;
           2.0385    1.8380    5.9994    0.0002;
           2.0004    0.6585    4.5288   -0.3000;
           2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
           2.0002    1.3094    5.9993    0.0002;
           2.0002    0.0002    3.9999   -0.0002]

% Una vez leído el tercer archivo.fis y de crear la nueva matriz
% de entrada (Entrada3) se podrá calcular los datos de ajuste de
% salida de voltaje, corriente y velocidad.

Valores_ajuste1= evalfis(Ajuste, Entrada3)

% Los Valores_ajuste1 se ponderarán con los valores reales de voltaje,
% corriente y velocidad (Entrada), modificando sus valores iniciales y
% realizar (iterativamente) los calculos para observar si existe un
% cambio significativo en la calidad de las geometrías de los cordones
% de soldadura.

Entrada4= Entrada1+Valores_ajuste1

% La Entrada4 representa los nuevos datos de entrada que se usaran en el
% sistema difuso del proceso GMAW semiautomatizado. La Entrada4 se
% utilizará en la segunda iteración

%% SEGUNDA ITERACIÓN

```

```
% No hay necesidad de utilizar el comando readfis puesto que el código ya
% los leyó anteriormente, solo necesitamos utilizar las fórmulas para
% encontrar la salida del sistema difuso del proceso, la salida del sistema
% difuso de calidad y encontrar los valores de ajuste para ponderarlos
% junto con los valores de entrada anteriores.
```

```
salida_proceso2= evalfis(Proceso, Entrada4)
```

```
Entrada5=salida_proceso2
```

```
salida_calculada_calidad2= evalfis(Calidad, Entrada5)
```

```
Error2= salida_real_calidad-salida_calculada_calidad2
```

```
Entrada6= [2.0003    1.3061    5.9991    0.0002;
           2.0002    1.7154    5.5013    0.1112;
           2.0002    0.0002    3.9999   -0.0539;
           2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
           2.0003    0.0003    3.9999   -0.0822;
           2.0390    1.8360    5.9994    0.0002;
           2.0498    0.2029    4.0814   -0.1204;
           2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
           2.0002    1.3093    5.9990    0.0002;
           2.0002    0.0004    4.0000   -0.0004]
```

```
Valores_ajuste2=evalfis(Ajuste,Entrada6)
```

```
Entrada7= Entrada4+Valores_ajuste2
```

```
% Este paso se repetirá tantas veces sean necesario, hasta que el
% programador observe que los errores no sufren grandes cambios.
```

```
%% TERCERA ITERACIÓN
```

```
salida_proceso3= evalfis(Proceso, Entrada7)
```

```
Entrada8=salida_proceso3
```

```
salida_calculada_calidad3= evalfis(Calidad, Entrada8)
```

```
Error3= salida_real_calidad-salida_calculada_calidad3
```

```
Entrada9= [2.0003    1.3061    5.9987    0.0003;
           2.0002    1.2825    5.9989    0.0003;
           2.0002    0.0002    3.9999   -0.0539;
           2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
           2.0002    0.0002    4.0000   -0.0822;
           2.0396    1.8339    5.9994    0.0002;
```

```

2.0669    0.2589    4.1101   -0.1496;
2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
2.0002    1.3093    5.9986    0.0003;
2.0003    0.0007    4.0001   -0.0006]

```

```
Valores_ajuste3=evalfis(Ajuste,Entrada9)
```

```
Entrada10= Entrada7+Valores_ajuste3
```

```
%% Cuarta iteración
```

```
salida_proceso4= evalfis(Proceso, Entrada10)
```

```
Entrada11=salida_proceso4
```

```
salida_calculada_calidad4= evalfis(Calidad, Entrada11)
```

```
Error4= salida_real_calidad-salida_calculada_calidad4
```

```

Entrada12= [2.0003    1.3060    5.9981    0.0005;
            2.0002    1.2817    5.9989    0.0003;
            2.0002    0.0002    3.9999   -0.0539;
            2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
            2.0002    0.4524    4.1636   -0.3490;
            2.0401    1.8319    5.9994    0.0002;
            2.0882    0.3208    4.1471   -0.182;
            2.0002    1.9998    5.9994    0.0001;
            2.0002    1.3093    5.9981    0.0005;
            2.0004    0.0012    4.0003   -0.0010]

```

```
Valores_ajuste4=evalfis(Ajuste,Entrada12)
```

```
Entrada13= Entrada10+Valores_ajuste4
```

```
%% quinta iteración
```

```
salida_proceso5= evalfis(Proceso, Entrada13)
```

```
Entrada14=salida_proceso5
```

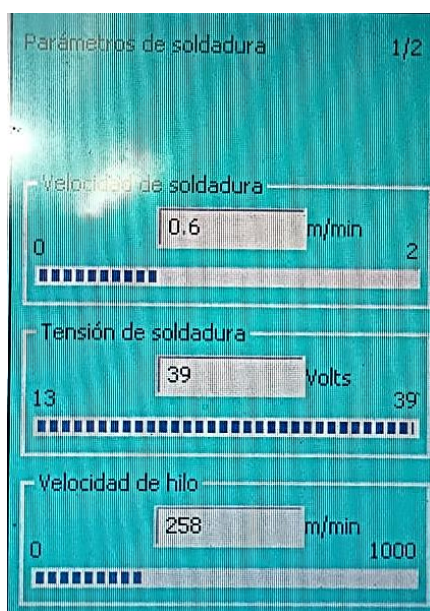
```
salida_calculada_calidad5= evalfis(Calidad, Entrada14)
```

```
Error5= salida_real_calidad-salida_calculada_calidad5
```

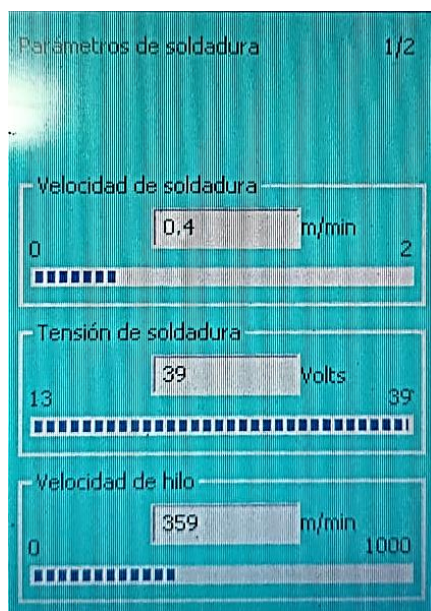
```
Toc
```

Anexo G

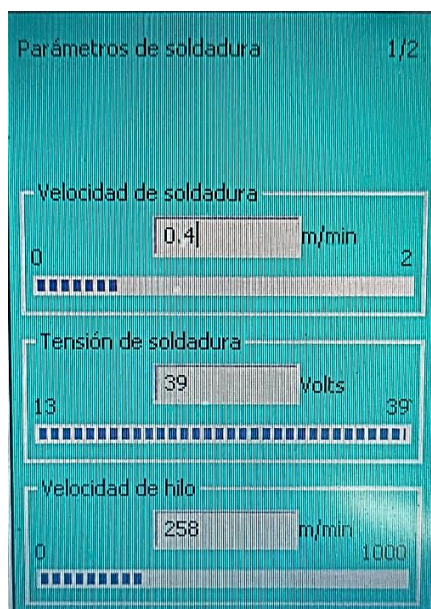
Parámetros establecidos en el proceso GMAW robotizado



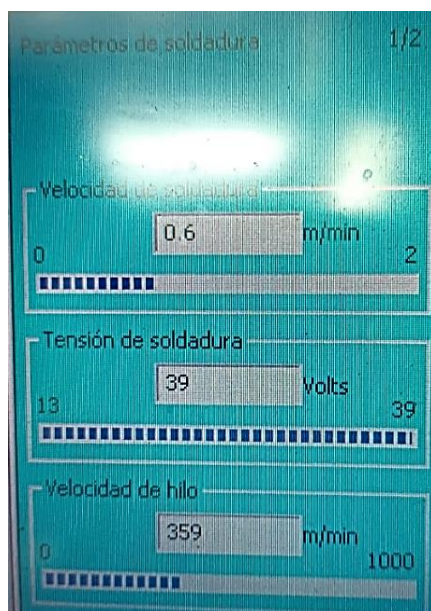
Anexo G 1 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 13, 15, 20 y 25



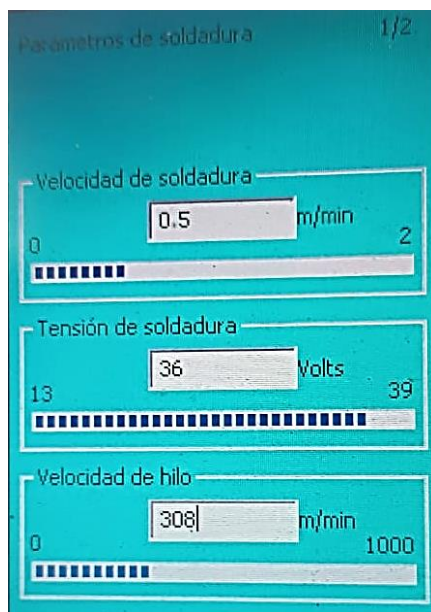
Anexo G 2 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 8, 10, 22 y 33



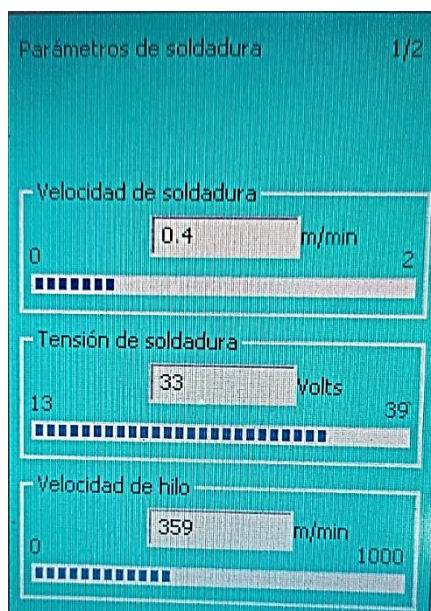
Anexo G 3 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 9, 16, 21 y 24



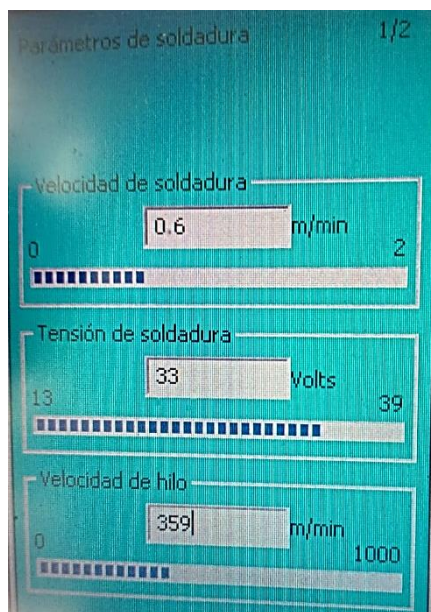
Anexo G 4 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 14, 23, 28 y 32



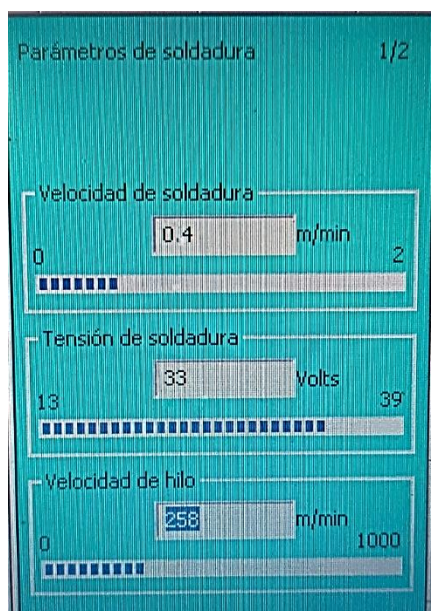
Anexo G 5 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 4, 11, 18 y 35



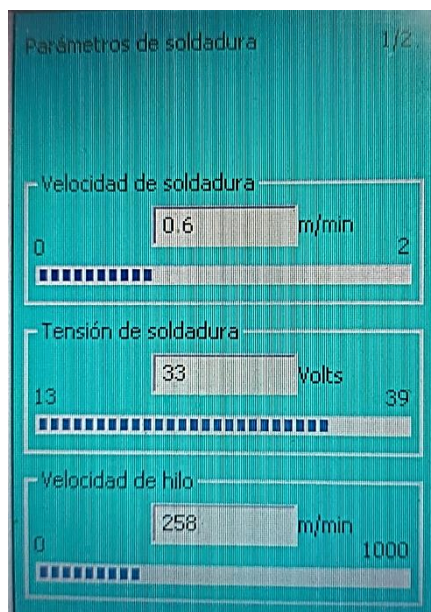
Anexo G 6 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 1, 3, 17 y 34



Anexo G 7 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 6, 12, 19 y 26



Anexo G 8 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 5, 27, 29 y 36



Anexo G 9 Parámetros de entrada del diseño de experimentos modificado por el sistema triple difuso para el proceso GMAW robotizado para las soldaduras 2, 7, 30 y 31

Anexo H

Productividad

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2023) 129:2011–2030
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12337-6>

ORIGINAL ARTICLE



Geometries and quality assesment of weld beads in 5052-H32 aluminum alloys joined by semiautomated GMAW through a double fuzzy system

Enrique Alejandro Cavazos Hernández¹ · Pamela Chiñas Sánchez¹ · José Luis Navarro González¹ · Ismael López Juárez²

Received: 28 April 2023 / Accepted: 14 September 2023 / Published online: 11 October 2023
 © The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2023

Abstract

In this research, a double fuzzy system is presented. This system is defined to approximate the geometry of the weld bead in a 5052-H32 aluminum alloy together with its quality regarding the parameters of voltage, current, and advance speed of a semiautomated GMAW (gas metal arc welding) process. These three welding process parameters affect crown concavity, root concavity, and penetration. That is, the welding parameters affect the weld bead geometries. This is relevant since the quality of the beads will be affected by the inappropriate selection of the welding parameter values. The main problem in any welding generated by the semi-automated GMAW process is the uncertainty in the quality of the weld beads; this occurs because the parameters have an inherent variation that affects the generation of the weld beads. Several researchers agree that welding processes have non-linear behavior, inherent variability, and non-normal conditions to satisfy the use of statistical techniques. In addition, these processes are complex due to thermal, electrical, and mechanical phenomena during welding. For this reason, this research proposes to use soft computing techniques, specifically fuzzy logic. This technique is defined for the analysis and inference of the geometry of the weld bead in the 5052-H32 aluminum alloy semi-automated GMAW process.

Keywords GMAW · Aluminum · Geometry · Quality · Fuzzy logic

1 Introduction

Semiautomated GMAW welding is an electric arc joining process between the base metal and an electrode. The GMAW

process is used in a wide range of industries, for manufacturing automobiles, containers, and pipes for food or hydrocarbon transportation. The GMAW process is known as MIG (metal inert gas) welding because this process uses inert gases such as argon, helium, or a combination of both. The inert gas is used as a shielding source during the welding process. The main application of the GMAW process is in aluminum welding, but it has also been applied to a wide range of materials such as carbon steels, high-strength low-alloy steels (HSLA), stainless steels, copper, titanium, and nickel alloys [1, 2].

Aluminum and its alloys are highly relevant in the aerospace, construction, and automotive industries. This is due to the properties they possess such as corrosion resistance, tensile strength, hardness, and ductility. The most widely used aluminum alloys in the industrial sector are those containing magnesium (5XXX series). This type of material is not heat treatable and implies energy/economic savings for industries [3].

Pamela Chiñas Sánchez, José Luis Navarro González, and Ismael López Juárez contributed equally to this work.

✉ Pamela Chiñas Sánchez
 pamela.cs@saltillo.tecnm.mx
 Enrique Alejandro Cavazos Hernández
 D06050809@saltillo.tecnm.mx
 José Luis Navarro González
 jose.ng@saltillo.tecnm.mx
 Ismael López Juárez
 ismael.lopez@cinvestav.edu.mx

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Saltillo, Blvd. Venustiano Carranza, Saltillo 25280, Coahuila, México

² CINVESTAV, S. A. de C. V., Av. Industrial Metalúrgica, Ramos Arizpe 1062, Coahuila, México