

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Implementación de un brazo robótico para aplicaciones de
soldadura por fusión**

Gustavo Andrés Tapia Imbaquingo

Edison Bonifaz, PhD. Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Febrero de 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Implementación de un brazo robótico para aplicaciones de soldadura por fusión

Gustavo Andrés Tapia Imbaquingo

Edison Bonifaz, PhD
Director de la Tesis y Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, PhD
Miembro del Comité de Tesis

Laurent Sass, PhD
Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, PhD
Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ximena Córdova, PhD
Decana del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, Febrero de 2013

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Gustavo Andrés Tapia Imbaquingo

C.I.: 171792822-8

Fecha: Febrero de 2013

Dedicatoria

Para mi papá y mi mamá.

Por todo lo que me han dado.

Resumen

La presente tesis consiste en la implementación, programación y control de un brazo robótico para aplicaciones de soldadura por fusión en la Universidad San Francisco de Quito. El robot será capaz de realizar automáticamente cordones de soldadura con las especificaciones dadas por el usuario.

El objetivo final es acoplar e implementar el brazo robótico Scorbot ER 9Pro del Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco de Quito para que realice cordones de soldadura mediante el proceso GMAW.

El proyecto se dividió en dos etapas. Primeramente, se realizó el acople y la implementación del sistema para que el robot sea capaz de realizar el proceso de soldadura. Una vez que el robot estuvo listo para trabajar, se desarrolló una investigación acerca de los parámetros óptimos para garantizar la calidad de la soldadura.

En la investigación se usaron varias técnicas para obtener datos experimentales, tales como medición de temperaturas mediante termocuplas, medición de corrientes y voltajes de arco mediante pinzas amperimétricas y multímetros, y microscopía para obtener metalografías de las muestras.

Finalmente, se realizaron comparaciones con datos de modelos teóricos válidos y usados en la industria de la soldadura.

Abstract

This thesis consists of the implementation, programming and control of a robotic arm for fusion welding applications at Universidad San Francisco de Quito. The robotic arm is capable of automatically make welding seams following the specifications given by the user.

The ultimate goal is to engage and implement the robotic arm Scorbot ER 9Pro of the Robotics and Manufacturing Laboratory at Universidad San Francisco de Quito to perform welds using the GMAW process.

The project was divided into two stages. Firstly, the coupling and system implementation were achieved for the robot to be able to perform the welding process. Once the robot was ready to work, research was carried out to achieve the optimal settings to ensure the quality of the weld.

The research used various techniques to obtain experimental data, such as temperature measurement using thermocouples, measuring arc voltage and current with clamp meters and multimeters, and microscopy for metallographic analysis from samples.

Finally, comparisons were made with valid theoretical models used in the welding industry.

Índice General

Dedicatoria	4
Resumen	5
Abstract	6
Nomenclatura	13
1. Información Preliminar del Proyecto	15
1.1. Introducción	15
1.2. Planteamiento del Proyecto y Justificación	16
1.3. Objetivos del Proyecto	17
1.3.1. Objetivo General	17
1.3.2. Objetivos Específicos	17
1.4. Soldadura por Fusión	18
1.4.1. Soldadura por Arco Eléctrico	18
1.4.2. Proceso GMAW, Variables y su Automatización	20
1.5. Sistemas Automáticos	25
1.5.1. Automatización	25
1.5.2. Robótica	28
1.5.3. Soldadura Robotizada	34
2. Descripción del Equipo usado en el Proyecto	37
2.1. Brazo Robótico Scorbot ER 9Pro	37
2.1.1. Requerimientos Necesarios del Robot	37
2.1.2. Principios de Control del Brazo Robótico	40
2.1.3. Análisis de Velocidades y Trayectorias	47
2.2. Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810	50
2.2.1. Electrodo	50
2.2.2. Gas de Protección	50
2.2.3. Control y Automatización	52
2.3. Software Scorbase	53
2.4. Controlador del robot USB-Pro	54
2.5. Equipo de Medición de Temperaturas	56
3. Desarrollo del Proyecto	57
3.1. Acople Mecánico entre Robot y Antorcha	57
3.2. Adecuación del Espacio Físico	61
3.3. Panel de Control	63
3.4. Programación del Robot	65
3.4.1. Explicación General del Programa	65

3.4.2.	Análisis y Cálculo de Posiciones	66
3.4.3.	Generación de Trayectorias y Análisis de Velocidades	72
3.4.4.	Programación en Scorbace y Visual Basic Script	76
3.4.5.	Versión 1	77
3.4.6.	Versión 2	78
3.4.7.	Versión 3	78
3.4.8.	Versión 4	79
3.4.9.	Versión 5	79
3.5.	Verificación y Pruebas del Sistema	80
3.5.1.	Placa de Pruebas 1	81
3.5.2.	Placa de Pruebas 2	82
3.5.3.	Placa de Pruebas 3	83
3.5.4.	Placa de Pruebas 4	83
3.6.	Comparación entre Soldadura Manual y Robótica	87
3.7.	Limitaciones y Restricciones	89
4.	Desarrollo de la Investigación	92
4.1.	Descripción de la Obtención de Datos Experimentales	92
4.2.	Preparación de Probetas	92
4.3.	Obtención de Ciclos Térmicos	94
4.3.1.	Ubicación de las Termocuplas	94
4.3.2.	Adaptación de la Programación del Robot	97
4.3.3.	Pruebas Realizadas	97
4.3.4.	Resultados de Datos Obtenidos	98
4.4.	Análisis Metalográfico	104
4.5.	Comparación con Modelos Teóricos	108
4.6.	Limitaciones y Restricciones	114
5.	Conclusiones y Recomendaciones	116
5.1.	Conclusiones	116
5.2.	Recomendaciones	118
	Apéndices	121
A.	Especificaciones Técnicas Scorbac ER 9Pro	122
A.1.	Especificaciones Generales	122
A.2.	Motores	123
A.3.	Sistema de Reducción Harmonic Drive	123
A.4.	Encoders	124
B.	Especificaciones Técnicas GALA MIG 1810	126
B.1.	Especificaciones Generales	126
B.2.	Mandos de Operación	126
C.	Especificaciones Técnicas Controlador USB-Pro	128
C.1.	Especificaciones Generales	128
C.2.	Paneles y Puertos de Conexión	129

C.3. Circuitos de Conexión	131
C.3.1. Entradas Digitales	131
C.3.2. Salidas Digitales	132
C.3.3. Entradas Análogas	133
D. Especificaciones Técnicas Equipo de Medición de Temperaturas	134
D.1. Especificaciones Generales Termómetro RDXL4SD	134
D.2. Especificaciones Generales de las Termocuplas	134
E. Panel y Circuito de Control	136
E.1. Introducción	136
E.2. Circuito de Control	137
E.3. PCB	140
E.4. Cableado	140
F. Programación del Robot	142
F.1. Introducción	142
F.2. Programación Scorbace	143
F.3. Programación VBS	150
Bibliografía	158

Índice de Figuras

1.1.	Circuito eléctrico básico para soldadura por arco eléctrico	19
1.2.	Esquematación del proceso de soldadura por arco eléctrico	20
1.3.	Influencia del gas en la calidad de la suelda	22
1.4.	Influencia del electrodo en la calidad de la suelda	24
1.5.	Niveles de automatización	26
1.6.	Componentes de un sistema automático	27
1.7.	Características de un robot manipulador industrial	29
1.8.	Celda de trabajo para soldadura por arco eléctrico robotizada	36
2.1.	Presentación, esquemas y componentes del Scorbot ER 9Pro	38
2.2.	Sistema de movimiento del robot	39
2.3.	Volumen de trabajo del robot	42
2.4.	Diferentes soluciones para un problema cinemático inverso	44
2.5.	Análisis geométrico del robot	44
2.6.	Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810 y sus componentes	51
2.7.	Modos de activación de la soldadora	52
2.8.	Sistemas de referencia	54
2.9.	Sistema de control del robot	55
2.10.	Componentes del equipo de medición de temperaturas	56
3.1.	Diseño y construcción de la abrazadera	58
3.2.	Esquema de la brida en el robot	59
3.3.	Diseño y construcción de la extensión para la brida	60
3.4.	Productos finales del sistema de acople	61
3.5.	Laboratorio de Robótica y Manufactura de la USFQ	62
3.6.	Protección de la cámara de soldadura	63
3.7.	Construcción del panel de control	64
3.8.	Producto final del panel de control	65
3.9.	Esquemas del efector final del robot	67
3.10.	Robot en posición de soldadura	69
3.11.	Trayectorias en coordenadas cartesianas	73
3.12.	Trayectorias en coordenadas de articulaciones	73
3.13.	Comprobación de las trayectorias	74
3.14.	Velocidades de articulación durante la trayectoria	75
3.15.	Trayectoria real del robot en coordenadas de articulaciones	76
3.16.	Montaje/Desmontaje de la antorcha	78
3.17.	Placas de pruebas	85
3.18.	Placa de cordones realizados por soldador humano	88
4.1.	Esquemas para el tratamiento térmico del acero	93
4.2.	Tratamiento térmico de las probetas	93

4.3.	Limpieza de las probetas	94
4.4.	Condiciones de apoyo	95
4.5.	Posiciones de las termocupas en Benchmark	95
4.6.	Posiciones de las termocupas para la investigación	96
4.7.	Corte transversal de un cordón de soldadura	96
4.8.	Placa de ensayo con el cordón de soldadura realizado	99
4.9.	Ciclos térmicos obtenidos del Benchmark	99
4.10.	Ciclos térmicos para posición T_1	100
4.11.	Ciclos térmicos a diferentes velocidades de avance	102
4.12.	Diagrama CCT para un acero eutectoide	103
4.13.	Ubicaciones de las micrografías dentro de la zona de fusión	104
4.14.	Micrografías a 50x	105
4.15.	Micrografías a 1000x	107
4.16.	Espaciamiento del Brazo Dendrítico Secundario	108
4.17.	Modelo matemático del flujo de calor en el proceso de soldadura	109
4.18.	Comparación entre datos experimentales y teóricos	111
A.1.	Sistema de reducción mecánica Harmonic Drive	124
A.2.	Esquematización del sistema de encoders	124
B.1.	Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810	127
C.1.	Controlador USB-Pro del robot	130
C.2.	Circuito para las entradas digitales	131
C.3.	Circuitos para las salidas digitales	132
C.4.	Circuito para las entradas análogas	133
E.1.	Conexión de los pulsadores de la caja de control	137
E.2.	Conexión de las salidas para la caja de control	138
E.3.	Relé de emergencia y luces piloto	139
E.4.	Circuito de activación de la soldadora	139
E.5.	Diseño de la PCB	140
E.6.	Conectores para el panel de control	141
E.7.	Conexión final entre la caja de control y el controlador	141
F.1.	Posiciones necesarias para la ejecución del programa	143

Índice de Tablas

1.1. Materiales de aporte para soldadura GMAW	23
1.2. Tipos de articulaciones	30
1.3. Componentes de un sistema robótico de soldadura	35
2.1. Movimientos de los ejes del robot	37
2.2. Radios de reducción mecánica en ejes	39
2.3. Parámetros de Denavit-Hartenberg	40
3.1. Análisis FODA	57
3.2. Variables de soldadura usadas en la Placa 1	81
3.3. Variables de soldadura usadas en la Placa 2	82
3.4. Variables de soldadura usadas en la Placa 3	83
3.5. Variables de soldadura usadas en la Placa 4	84
4.1. Variables de soldadura para los ensayos	98
4.2. Tiempos promedio de enfriamiento	103
4.3. Tamaño promedio de grano	104
4.4. Variables de soldadura usadas en las probetas	110
4.5. Resultados obtenidos mediante los modelos matemáticos	113
A.1. Especificaciones generales del Scrobot ER 9Pro	122
A.2. Especificaciones de los motores del robot	123
B.1. Especificaciones generales de la soldadora GALA MIG 1810	126
C.1. Especificaciones generales del controlador USB-Pro	128
D.1. Especificaciones generales del termómetro RDXL4SD	134

Nomenclatura

+COM	Terminal común positivo
-COM	Terminal común negativo
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (<i>American Welding Society</i>)
BM	Metal Base (<i>Base Metal</i>)
CAD	Diseño Asistido por Computadora (<i>Computer Aided Design</i>)
CAM	Manufactura Asistida por Computadora (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CCPD	Corriente Continua Polaridad Directa (similar a DCEN)
CCPI	Corriente Continua Polaridad Inversa (similar a DCEP)
CCT	Curvas de Transformación de Enfriamiento Continuo (<i>Continuous Cooling Transformation</i>)
cfh	Pies cúbicos por Hora (<i>Cubic Feet per Hour</i>)
CNC	Control Numérico Computarizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
DCEN	Electrodo Negativo en Corriente Directa (<i>Direct Current Electrode Negative</i>)
DCEP	Electrodo Positivo en Corriente Directa (<i>Direct Current Electrode Positive</i>)
DOF	Grados de Libertad (<i>Degrees of Freedom</i>)
EPP	Equipo de Protección Personal
FZ	Zona de Fusión (<i>Fusion Zone</i>)
GMAW	Soldadura de metal por arco eléctrico con protección de gas (<i>Gas-Metal Arc Welding</i>)
H	Matriz de Transformación Homogénea Total
HAZ	Zona Afectada por el Calor (<i>Heat Affected Zone</i>)
HI	Calor de entrada por unidad de longitud del material (<i>Heat Input</i>)
I/O	Entradas/Salidas (<i>Inputs/Outputs</i>)
I	Corriente

J	Matriz Jacobiana
MAG	Soldadura de metal por arco eléctrico con protección de gas activo (<i>Metal-Active Gas</i>)
MIG	Soldadura de metal por arco eléctrico con protección de gas inerte (<i>Metal-Inert Gas</i>)
η	Eficiencia del Proceso
NC	Contacto normalmente cerrado (<i>Normally Closed</i>)
NO	Contacto normalmente abierto (<i>Normally Open</i>)
o_i^j	Vector de Traslación desde la articulación j a la articulación i
PCB	Circuito Impreso (<i>Printed Circuit Board</i>)
PLC	Controlador Lógico Programable (<i>Programmable Logic Controller</i>)
q_i	Variable de movimiento de la articulación i
R_i^j	Matriz de Rotación desde la articulación j a la articulación i
$SCADA$	Supervisión, Control y Adquisición de Datos (<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>)
$SDAS$	Espaciamento del Brazo Dendrítico Secundario (<i>Secondary Dendritic Arm Spacing</i>)
T_i^j	Matriz de Transformación Homogénea desde la articulación j a la articulación i
V	Voltaje
v	Velocidad de Avance (en Soldadura) Vector Velocidad del Efecto Final (en Robótica)
VAC	Voltaje de corriente alterna
VBS	Visual Basic Script
VDC	Voltaje de corriente directa

1. Información Preliminar del Proyecto

1.1. Introducción

La capacidad intelectual de los seres humanos ha permitido desarrollos importantes en la Manufactura. Se han innovado nuevas formas y maneras de trabajo y producción que ha implicado un gran avance tecnológico en la mayoría de campos de la ciencia. La electrónica, la ciencia de materiales y la computación han crecido a un ritmo muy alto, que han traído consigo muchos nuevos descubrimientos y tecnologías para ayudar a la humanidad. Sin embargo, el mayor beneficio se obtiene cuando estos campos se fusionan y/o se integran.

Así pues, la manufactura moderna se ha beneficiado del gran avance tecnológico que se ha producido en los citados campos de la ciencia, y esto es demostrado por la alta y variada gama de tecnologías presentes en cualquier industria alrededor del mundo. Existen máquinas como taladros, prensas, tornos, fresadoras y soldadoras disponibles para todos los tamaños y aplicaciones, además de tecnologías como CNC, PLC, SCADA, etc., que ayudan a la producción diaria de millones de productos en miles de fábricas.

Sin embargo, los procesos de manufactura moderna enfrentan dos desafíos: 1) tener mejor calidad de producto a bajo precio, y 2) la necesidad de mejorar la productividad [1]. Además, las plantas y sistemas de manufactura actuales necesitan de rapidez, adaptabilidad y flexibilidad en los procesos, ya que necesitan responder a la demanda de un mercado extremadamente dinámico y cambiante, debido a las tendencias, modas comerciales y la competitividad mundial [1]. En consecuencia, las compañías necesitan procesos de fabricación y manufactura eficientes, controlados, automatizados e inteligentes; es por esto que la mayoría de la industria ha basado sus sistemas y procesos en la robótica, computadoras, inteligencia artificial y software.

En este proyecto, la integración robot-soldadura por arco eléctrico ha sido concebida para mantener constantes a los parámetros de soldadura y así garantizar la precisión y calidad de

los cordones de suelda.

1.2. Planteamiento del Proyecto y Justificación

Los procesos de manufactura moderna dependen mucho de equipos automáticos o de automatización, tales como los robots manipuladores que se caracterizan por su flexibilidad, programabilidad y precisión. Estos robots pueden realizar tareas semejantes a las que realizan los seres humanos, con una calidad similar (en algunos casos relativamente mejor) y durante largos períodos de tiempo. También, estos robots manipuladores mantienen una buena relación entre costo y volumen de producción. Finalmente, un robot manipulador es una máquina muy flexible y de fácil programación, por lo que puede ser adaptado y ajustado para ejecutar diferentes tareas.

Un robot soldador pertenece al grupo de los robots manipuladores, ya que realiza tareas repetitivas, se lo puede programar por el tipo de suelda, el tipo de material que se quiere soldar, y por el procedimiento a seguir.

En la industria ecuatoriana, casi todos los procesos de soldadura se efectúan de forma manual, desaprovechándose las ventajas que ofrecen los procesos de soldadura automatizados, tales como: precisión, calidad, flexibilidad y operación continua. Asimismo, existen más ventajas relacionadas con la seguridad y la salud de los operadores que son expuestos a condiciones de trabajo extremas (gases tóxicos, radiación, altas temperaturas, etc.).

Por todo lo arriba expuesto, automatizar y robotizar los procesos de soldadura tiene muchas ventajas y beneficios, no obstante, existen también algunas desventajas al aplicar la automatización. La principal es que una máquina no puede actuar, pensar, ni razonar como un ser humano. Por otro lado, la inversión inicial que una industria necesita para adquirir y poner en funcionamiento estos robots es relativamente alta, aunque el período de recuperación de capital es muy corto.

En conclusión, los procesos de manufactura actuales necesitan ser rápidos, precisos, eficientes y baratos, ya que así se consigue una producción en masa y con un costo de operación bajo. Por esta razón, la automatización y la robótica son las opciones más adecuadas para

un mercado económico tan dinámico como el actual. Así se asegura la competitividad y el liderazgo frente a otras empresas de la misma industria.

Este proyecto demuestra como el proceso de soldadura automatizado garantiza la calidad de los cordones de suelda, superando ampliamente a aquellos producidos por un soldador humano. Se pretende asimismo, que las empresas ecuatorianas que utilizan soldadura se beneficien del estudio aquí realizado.

Por otra parte, el control de los parámetros de soldadura va a permitir que la investigación relacionada con historial térmico y evolución microestructural sea factible. Las primeras mediciones experimentales de ciclos térmicos serán comparadas con predicciones analíticas de algunos autores.

1.3. Objetivos del Proyecto

1.3.1. Objetivo General

Implementación, programación, control y acoplamiento entre la máquina soldadora GALA MIG 1810 y el brazo robótico SCORBOT ER 9Pro de la Universidad San Francisco de Quito, para aplicaciones de soldadura por fusión.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Acoplar y conectar la máquina soldadora al brazo robótico Scorbot ER 9Pro.
- Programar al robot para que realice los movimientos deseados.
- Establecer el tiempo de encendido de la soldadora en las posiciones deseadas.
- Realizar cordones de soldadura sobre placas de acero mediante el brazo robótico acoplado.
- Obtener muestras de soldadura para realizar análisis metalográfico.
- Obtener datos de temperatura y tiempo de forma experimental para realizar análisis de ciclos térmicos (T vs. t) en los puntos de interés de las muestras.
- Comparación de resultados experimentales con ecuaciones teóricas.

1.4. Soldadura por Fusión

La soldadura es uno de los procesos más importantes en la manufactura moderna. “Soldadura es un proceso de unión, en el cual dos o más partes son fusionadas en sus superficies donde hay contacto, mediante la aplicación de calor y/o presión, y con difusión de material de aporte (si existe), para formar una junta fuerte” [2]. El proceso de soldadura por fusión es el más utilizado para unir partes y materiales, debido a sus características técnicas y económicas. En este proceso se logra una junta permanente con propiedades mecánicas similares al material base. La organización que se dedica a la regulación y normalización de procesos de soldadura es la American Welding Society (AWS), la cual tiene más de 90 procesos de soldadura especificados [3].

1.4.1. Soldadura por Arco Eléctrico

La soldadura por arco eléctrico es el proceso de soldadura por fusión más utilizado en el mundo. En este proceso, se utiliza una fuente de poder eléctrica para producir un arco eléctrico que entregue el calor intenso que es necesario para fundir el metal. El arco es formado entre la pieza de trabajo y el electrodo, el cual puede ser de varios tipos dependiendo el proceso. Existen electrodos de carbono o tungsteno, cuyo propósito únicamente es conducir la corriente eléctrica y mantener el arco entre su punta y la pieza de trabajo, por lo tanto no son consumibles. Por otro lado, existen varas o alambres especialmente preparados, que aparte de conducir la corriente y mantener el arco eléctrico, se funden y sirven de material de aporte para las juntas [4].

La fuente de poder de una soldadora por arco eléctrico convierte la energía suministrada por la red eléctrica a energía con bajo voltaje y alta corriente (AC o DC dependiendo del proceso). Esta fuente de poder energiza un electrodo para transmitir la corriente eléctrica, mientras que la pieza de trabajo esta conectada al otro polo, que normalmente es llamado “masa” o “cable de masa” (*work* en inglés). La Figura 1.1 muestra el circuito básico para la soldadura por arco. El arco eléctrico puede llegar a producir temperaturas de alrededor de 3600°C, lo que resulta en energía más que suficiente para poder fundir cualquier metal.

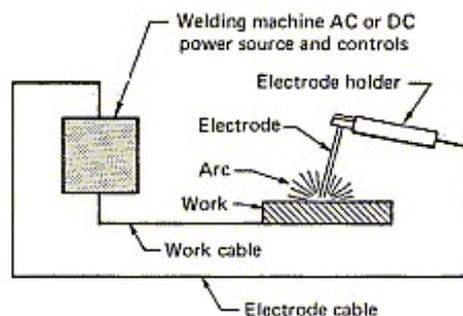


Figura 1.1. Circuito eléctrico básico para soldadura por arco eléctrico. Fuente [4].

Finalmente, para que el arco eléctrico pueda mantenerse estable y la calidad de la suelda sea buena es necesario una buena protección del arco. Cuando los metales se encuentran a temperaturas elevadas, se vuelven químicamente reactivos, especialmente con el oxígeno y nitrógeno del aire atmosférico. Por esta razón, pueden formarse óxidos y nitruros dentro del material fundido, que van a afectar las propiedades mecánicas de la junta cuando el material se ha solidificado. Este problema ha sido solucionado con la protección del arco mediante gases, vapor o escoria¹ [4].

Existen varios tipos de soldadura por arco eléctrico, sin embargo, en este proyecto solo se va a estudiar el proceso de soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa, llamado GMAW por sus siglas en inglés (*Gas Metal-Arc Welding*). En el proceso de soldadura GMAW (Figura 1.2a), se tiene un electrodo consumible que es alimentado automáticamente hacia la antorcha mientras el arco eléctrico se encuentra encendido. A este proceso también se lo denomina MIG (Soldadura con Protección de Gas Inerte) o MAG (Soldadura con Protección de Gas Activo), debido a que es necesaria la protección del arco mediante un gas proporcionado externamente [5].

Asimismo, el tipo de corriente eléctrica tiene una gran influencia sobre los resultados de la soldadura (ver Figura 1.2b). La corriente directa (DC) y en polaridad inversa (CCPI, en inglés DCEP), es decir, con el electrodo en el polo positivo, y la pieza de trabajo en el negativo, es la configuración que mejores resultados brinda. Por otro lado, el trabajo con polaridad directa (CCPD, en inglés DCEN), en otras palabras, con el electrodo en polaridad negativa,

¹Escoria es una mezcla de productos químicos que reaccionan al fundirse en el arco y protegen al cordón de soldadura.

da cordones muy anchos y de pequeña penetración debido a que el calor se concentra en el electrodo, y por lo tanto, la transferencia de material se realiza de manera globular y errática [6].

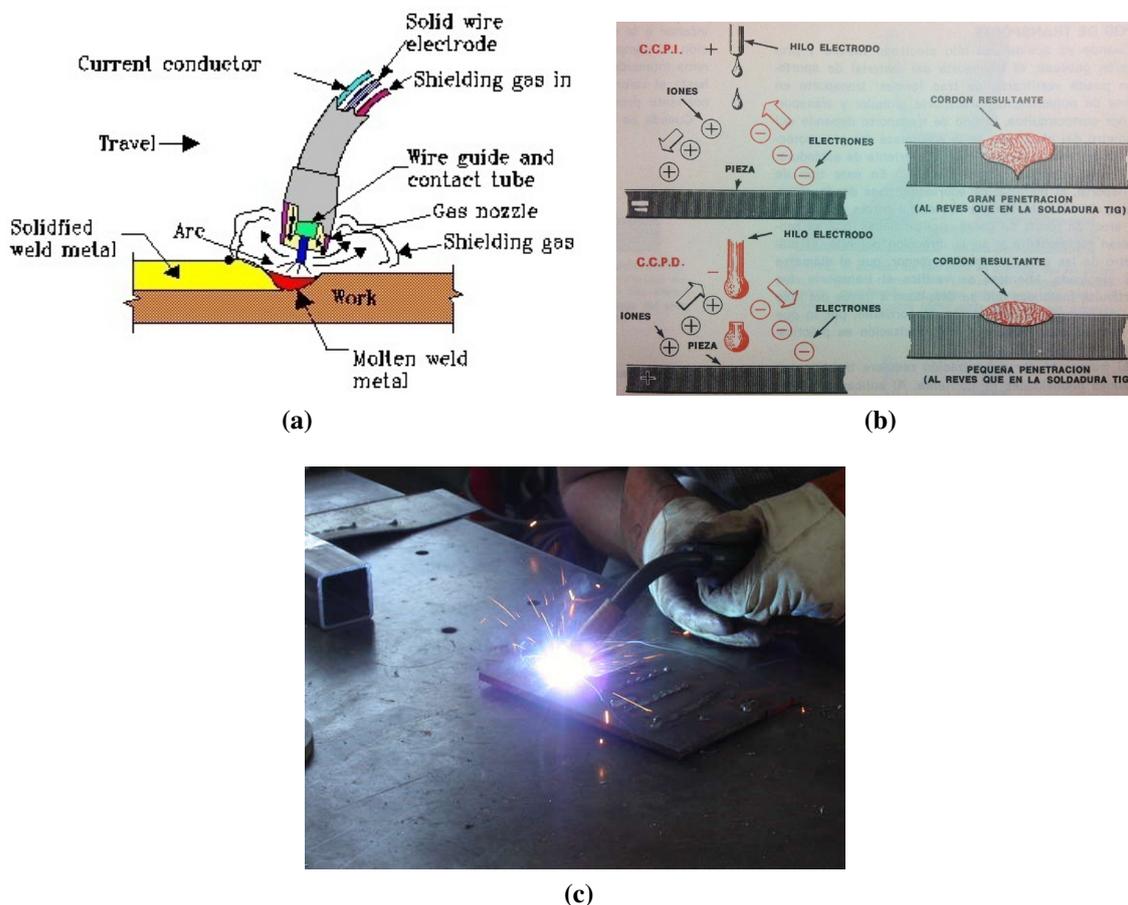


Figura 1.2. Esquematación del proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW. **a)** Principio de trabajo del proceso GMAW. Fuente [7]. **b)** Influencia de la polaridad en la soldadura GMAW. Fuente [6]. **c)** Proceso GMAW real. Fuente [8].

1.4.2. Proceso GMAW, Variables y su Automatización

En el proceso GMAW se tiene una fuente eléctrica que brinda la energía necesaria para crear el arco eléctrico y proveer el calor suficiente para alcanzar temperaturas considerablemente altas para poder fundir materiales como acero, aluminio, hierro, etc. [9]

El calor proporcionado al material es representado por la Ecuación 1.1.

$$HI = \frac{V \cdot I}{v} \times \eta \quad (1.1)$$

donde

HI = Calor de entrada por unidad de longitud de material [J/mm]

V = Voltaje de Arco [V]

I = Corriente de Arco [A]

v = Velocidad de Avance [mm/s]

η = Eficiencia del Proceso

Debido a los mecanismos de transferencia de calor entre el arco eléctrico y el material de trabajo, no toda la energía entregada por la fuente es utilizada. Por esta razón, la eficiencia del proceso depende de varios factores, que incluyen a las pérdidas de calor en conducción, convección y radiación hacia el ambiente (*heat transfer factor*), y por la cantidad real de calor utilizado para fundir el metal (*melting efficiency*) [2; 10]. A pesar de que la eficiencia depende de estos factores, existe muy poca información acerca del valor numérico o de ecuaciones para obtenerlos, y por lo tanto, solamente se han obtenido eficiencias globales del proceso, que para el caso GMAW usualmente se aproxima al 90%.

Además de los parámetros de la Ecuación 1.1, las siguientes variables influyen drásticamente en la calidad de los cordones de soldadura realizados con el proceso GMAW.

1.4.2.1. Gas de Protección

El gas de protección tiene una gran influencia en la calidad final de la suelta. Sin un gas de protección, o sin un flujo adecuado de éste, el arco eléctrico no sería suficientemente estable e impurezas del medio contaminarían el material mientras se encuentra fundido, por lo tanto, podrían existir porosidades o grietas dentro del cordón de soldadura que dañan la calidad y propiedades mecánicas (ver Figura 1.3a) [11].

El aire atmosférico está compuesto en su mayoría por oxígeno y nitrógeno; estos elementos, además del hidrógeno, son los más nocivos para los procesos de soldadura.

El oxígeno es un elemento muy activo y se combina fácilmente con los metales formando óxidos, que pueden quedar dentro del cordón de soldadura y afectar las propiedades. Asimismo, el oxígeno puede combinarse con el carbono del acero, formando Monóxido de

Carbono (CO), que puede quedar atrapado en el material después de solidificarse, y formar porosidades [6].

Por su lado, el nitrógeno representa mayores dificultades ya que a temperaturas elevadas, se disuelve y asocia fácilmente con el hierro formando nitruros, los cuales disminuyen la ductilidad del material, y causan grietas y fisuras [12].

Finalmente, el hidrógeno reacciona de la misma manera que el nitrógeno, sin embargo, este elemento produce presiones y tensiones internas debido a que se queda acumulado en diferentes zonas de la red cristalina, que en consecuencia producen grietas y fisuras [6; 13].

Para evitar estos problemas, el aire en la zona de soldadura se ve desplazado por el flujo del gas protector, y por lo tanto, el arco y el material fundido se mantienen en el interior de una atmósfera protectora.

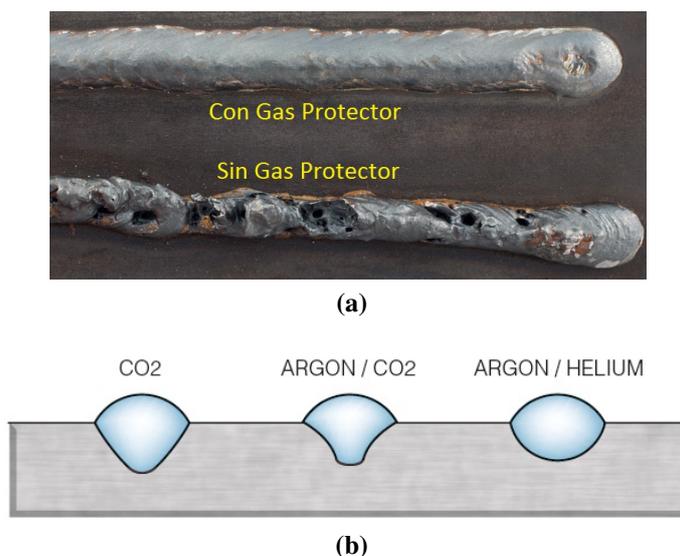


Figura 1.3. Influencia del gas de protección en la calidad del cordón de soldadura. **a)** Porosidades por ausencia de gas protector. Fuente [14]. **b)** Diferentes perfiles y penetraciones que se obtienen dependiendo del gas usado. Fuente [15].

El tipo de gas y su flujo afectan las siguientes propiedades [15]:

- La penetración y el perfil del cordón de soldadura (Figura 1.3b)
- El ancho de la soldadura
- La estabilidad del arco eléctrico
- Las propiedades mecánicas finales del metal soldado

- La eficiencia del proceso

Un flujo de gas insuficiente causa que el metal sea frágil y tenga porosidades, y de la misma manera, un flujo excesivo causará porosidades debido a turbulencias creadas en el gas que lo fuerzan a entrar entre las moléculas de material fundido.

Para el proceso GMAW, los gases que predominan en las diferentes aplicaciones son el Argón (Ar), Helio (He) y Dióxido de Carbono (CO₂), o también se puede usar una mezcla entre ellos [16].

1.4.2.2. Electrodo y Velocidad de Alimentación

La segunda variable a controlar en el proceso GMAW es el tipo de electrodo y su velocidad de alimentación. Para elegir el tipo de electrodo, se deben considerar tanto la compatibilidad con el material base, sus propiedades mecánicas, la tasa de deposición y el diámetro de electrodo deseado, que depende del espesor del material a soldar [15].

La AWS tiene una clasificación de electrodos para soldadura de aceros con el proceso GMAW en su especificación A5.18, para acero inoxidable es la A5.9, y para aluminio se tiene la A5.10; la norma A5.18 puede ser interpretada en la Figura 1.4a. En la Tabla 1.1 se muestran los tipos de electrodos y sus composiciones más usadas para la soldadura de aceros al carbono [4].

Tabla 1.1. Materiales de aporte para soldadura GMAW en aceros al carbono según AWS A5.18. Fuente [4].

Composición en % de masa	C	Mn	Si	Al
ER70S-2	0.07	0.9 - 1.4	0.40 - 0.70	0.05 - 0.15
ER70S-3	0.06 - 0.15	0.9 - 1.4	0.45 - 0.70	-
ER70S-4	0.07 - 0.15	1.00 - 1.50	0.65 - 0.85	-
ER70S-5	0.07 - 0.19	0.90 - 1.40	0.30 - 0.60	0.50 - 0.90
ER70S-6	0.07 - 0.15	1.40 - 1.85	0.80 - 1.15	-
ER70S-7	0.07 - 0.15	1.50 - 2.00	0.50 - 0.80	-

Mientras se está realizando el cordón de soldadura, se requiere una velocidad de alimentación del electrodo correcta, a fin de mantener el arco eléctrico estable y conservar un adecuado

volumen de deposición de material de aporte. Si esta velocidad es muy baja, el arco se vería interrumpido frecuentemente, por lo tanto el cordón sería de mala calidad con saltos pronunciados. Por otro lado, si la velocidad de alimentación es muy alta, el cordón resultaría muy grueso e implicaría un gasto innecesario de material y energía [11]. Estos casos se pueden apreciar respectivamente en los cordones de la Figura 1.4b [5].

AWS Classification of Solid Steel Electrodes		
ER70S-X		
ER	=	Electrode rod
70	=	Minimum tensile strength $\times 1000$
S	=	Solid electrode wire
X	=	Chemical composition and shielding gas

(a)



(b)

Figura 1.4. Influencia del electrodo y su alimentación en la calidad de un cordón de soldadura. a) Clasificación AWS de electrodos para proceso GMAW según especificación A5.18. Fuente [15]. b) Efectos de la velocidad de alimentación de alambre. Fuente Foto Propia.

1.4.2.3. Longitud de Arco

La última variable que necesita ser controlada es la longitud de arco. Esta longitud es la distancia medida desde la punta del alambre-electrodo hasta el material a soldar. Si esta distancia es muy grande, el arco eléctrico será inestable y el cordón resultará con porosidades debido a que el gas protector tendería a disiparse hacia todas las direcciones. Por otro lado, si la distancia es muy pequeña, la antorcha podría llegar a dañarse e incluso a fundirse debido a las altas temperaturas del arco eléctrico [11]. Un rango moderado para esta longitud es de 5 mm hasta cerca de 12 mm ($1/2$ in) [13].

1.4.2.4. Aplicación en el Proyecto

Todas estas variables hacen que el proceso GMAW sea muy flexible para la automatización,

debido a la facilidad de controlar mediante computadoras y robots al voltaje, corriente, velocidad de avance, flujo de gas de protección, salida del alambre y longitud de arco.

En este trabajo se ha escogido el proceso MIG/MAG por varias razones: 1) Disponibilidad del equipo y sus accesorios en el Taller Mecánico de la Universidad San Francisco de Quito, 2) flexibilidad y fácil adaptabilidad de esta tecnología para ser instalada y automatizada en el Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco de Quito, y 3) este tipo de soldadura es uno de los procesos más usados en las aplicaciones reales de soldadura automática en la mayoría de industrias en el mundo, y este proyecto pretende tener condiciones aproximadas a las reales.

1.5. Sistemas Automáticos

1.5.1. Automatización

1.5.1.1. Definición

“La automatización es la habilidad de hacer que una máquina lleve a cabo una operación específica con mínima o ninguna intervención humana” [17]. La automatización como ciencia es relativamente nueva; su masificación y popularidad ha crecido con los avances en tecnologías de la información, computación, electrónica, materiales y manufactura. Sin embargo, existen muchos registros antiguos de máquinas o sistemas “inteligentes” o “automáticos” de alguna manera, cuyas aplicaciones era el amplificar las habilidades físicas de las personas. Por mencionar algunos, el descubrimiento de la rueda y los polipastos en civilizaciones antiguas, y el Regulador de Watt en la Revolución Industrial [17].

1.5.1.2. Niveles de Automatización

El uso de automatización en las industrias actuales no implica una fácil decisión, sino una conclusión de una gran cantidad de estudios de factores de producción, costos, utilidades y proyecciones.

De manera resumida, en la industria moderna existen tres niveles de producción (ver Figura 1.5) [1]. La “producción manual” (“*Manual Work*”), en la cual todo el trabajo es realizado

por personas, es atractiva cuando el volumen de producción es relativamente bajo, ya que el costo de producción unitario para cualquier volumen de producción se va a mantener constante. Por ejemplo, si una persona produce 1000 artículos con un sueldo de \$1000, el costo unitario es de \$1. Asimismo, si se necesita producir 1'000.000 de artículos, se debería contratar 1000 personas, que produzcan 1000 artículos a un sueldo de \$1000 cada una, a fin de mantener el costo unitario a \$1.

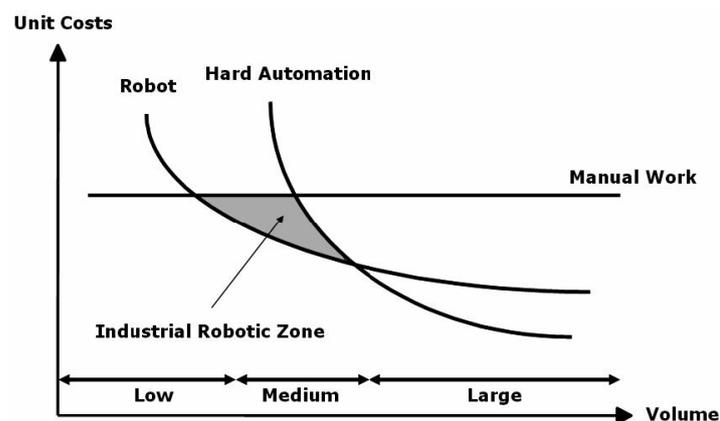


Figura 1.5. Niveles de automatización. Fuente [1].

El segundo nivel de producción en las industrias es la “automatización flexible” o basada en robots (“*Robot*”). Este nivel resulta atractivo económicamente cuando el volumen de producción es medio y variado. Como los costos de adquisición, instalación, programación y mantenimiento del sistema son elevados, se puede programar y disponer de robots que realicen diferentes tareas repetitivas, dependiendo del producto y trabajando las 24 horas. Este nivel de producción reduce el costo de producción unitario en cuanto mayor sea el volumen de producción y la diversidad de los productos [1].

Sin embargo, cuando la producción es considerablemente alta y limitada a pocas tareas, el tercer nivel de producción es el que predomina. Este nivel es la “automatización fija” (“*Hard Automation*”), y como su nombre lo indica, conlleva a adecuar instalaciones y sistemas para que realicen una sola tarea o un producto final pero con altos volúmenes de producción, lo que implica trabajar con velocidades muy altas. Para este nivel, es necesario diseñar la maquinaria, los procesos y sistemas para que realicen exclusivamente la tarea necesaria a una velocidad muy alta, lo cual implica costos muy elevados, aún más altos que los de automa-

tización flexible. Es por esta razón, que económicamente, la automatización fija es llamativa solo cuando se tiene altos volúmenes de producción (Figura 1.5) [1].

1.5.1.3. Sistemas Automáticos y sus componentes

“El centro de cualquier sistema automático es la idea de retroalimentación” [17]. La retroalimentación está en todos los lugares de la naturaleza en los que se necesita un proceso de regulación. Por ejemplo, el cuerpo humano siempre debe mantener una temperatura corporal adecuada. Esta temperatura es controlada y retroalimentada permanentemente para determinar si se necesita eliminar calor (mediante el sudor), o aumentar calor (mediante el temblor natural en todos los músculos). El mismo mecanismo de retroalimentación ocurre en la presión sanguínea, el equilibrio, o el movimiento, en otras palabras, en todo el mundo natural [17].

Para poder lograr esta retroalimentación, todo sistema automático posee cuatro componentes que ayudan a llevar a cabo todas las acciones necesarias. Estos componentes son los Actuadores, Sensores, Controladores, y la Estructura Mecánica o Física [18].

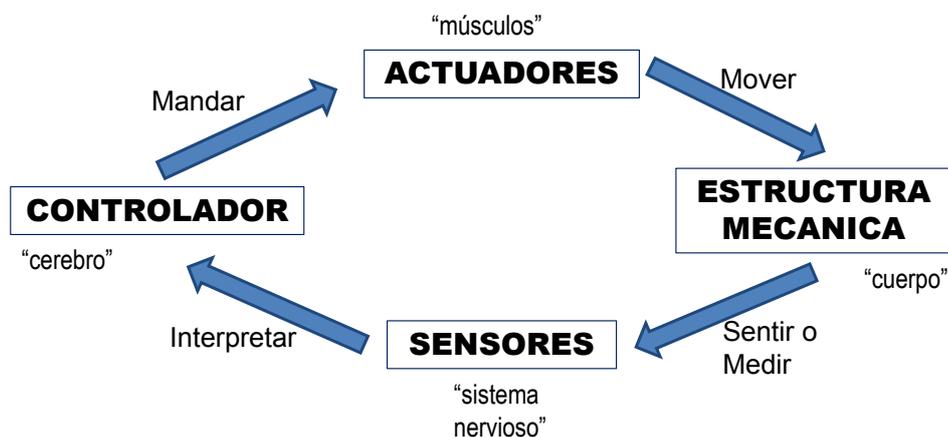


Figura 1.6. Componentes de un sistema automático. Fuente [18].

El ciclo de funcionamiento se detalla en la Figura 1.6. Los sensores registran o miden las variables necesarias dependiendo el sistema, estas pueden ser voltaje, temperatura, presión, presencia de un objeto, final de carrera, etc. Los datos son enviados al o los controladores, los cuales, dependiendo del valor de los datos recibidos, interpretan y ejecutan alguna tarea

cumpliendo con el software que ha sido programado y guardado en su memoria. Aquí se da el proceso de retroalimentación o “*feedback*” en el sistema, ya que se miden las variables, y se cumplen ciertas tareas para rectificar o ejecutar determinadas acciones. El controlador envía las órdenes de las tareas ha ser ejecutadas a los actuadores, los cuales son los que cumplen con la ejecución de las diferentes actividades. Estos pueden ser motores eléctricos, pistones neumáticos o hidráulicos, luces, etc. Finalmente, los actuadores realizan cambios en la estructura mecánica o física del sistema para llevar a cabo la tarea y llegar al resultado esperado o posición final necesaria. Así entonces, empieza nuevamente el ciclo, con los sensores midiendo los nuevos valores de las variables.

1.5.2. Robótica

1.5.2.1. Definición

La robótica es una rama de la ciencia y tecnología que incluye el trabajo con robots para realizar tareas específicas. El término “robot” viene de la palabra eslovena “*robota*” que significa “trabajo forzado”, y fue usado por primera vez por el escritor checo Karel Čapek en su obra “Rossum’s Universal Robots” [19].

La robótica como ciencia es relativamente nueva, sin embargo, al igual que con la automatización, existen registros históricos antiguos de personas que crearon robots, tales como Arquitas de Tarento (año 420 a.C.), Al-Jazari (año 1206), Leonardo Da Vinci (año 1495) y Nicola Tesla (año 1898) [17].

El desarrollo de la robótica ha sido notablemente grande en el último siglo. Esto se debe al desarrollo y a la invención de nuevas tecnologías, especialmente en la electrónica, la computación y el control numérico.

1.5.2.2. Características de un Robot Manipulador Industrial

Un robot industrial es definido como un manipulador controlado automáticamente, reprogramable, de uso múltiple y con tres o más ejes de movimiento [20]. Estos robots son basados mucho en la naturaleza y en el ser humano.

El funcionamiento de un brazo robótico como Robot Manipulador Industrial es basado en el brazo humano. En la Figura 1.7a se puede apreciar la similitud en la forma y funcionamiento de un brazo humano natural y un brazo robótico.

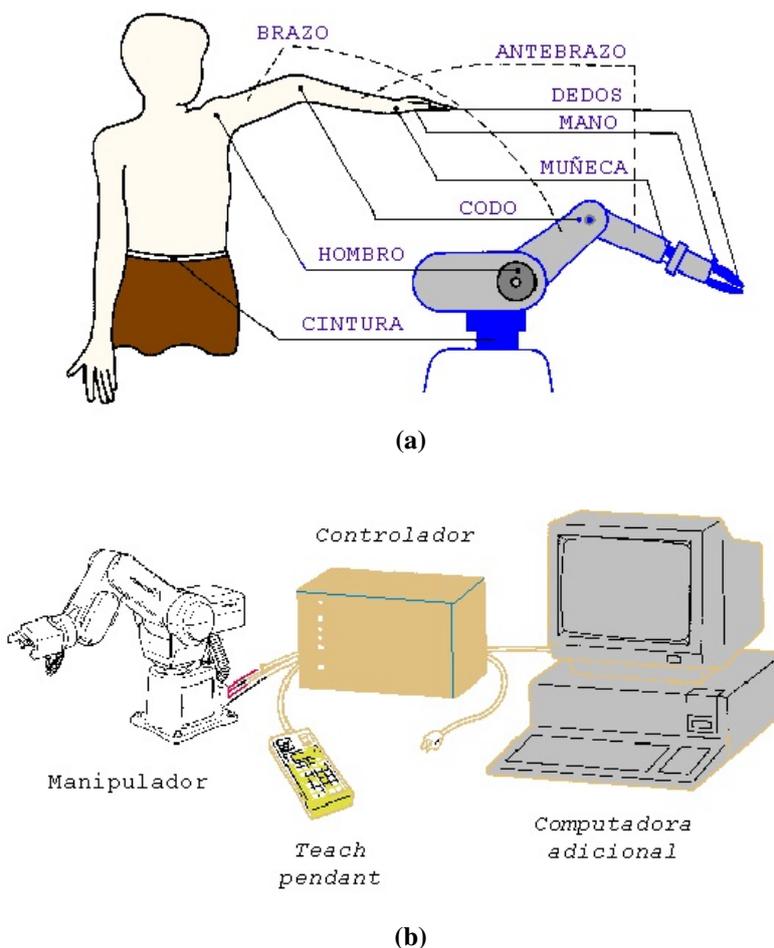


Figura 1.7. Características de un robot manipulador industrial. **a)** Semejanza en morfologías entre el brazo humano y el brazo robótico. Fuente [21]. **b)** Componentes de un sistema robótico. Fuente [21].

Debido a que la robótica es una rama de la automatización, todo robot es un sistema automatizado, en consecuencia, tiene los cuatro componentes de un sistema automático (Actuadores, Sensores, Controladores y Estructura Mecánica). En un robot manipulador (Figura 1.7b), los Actuadores son los motores eléctricos y los pistones del efector final; los Sensores son los encoders de los motores, los finales de carrera en cada articulación, y en algunos casos sensores de presencia y pulsadores; el Controlador es un circuito electrónico de control conectado y ejecutado mediante un software de computación; y la estructura mecánica son los eslabones

y efector final del robot.

1.5.2.3. Tipos de Articulaciones

Para que exista un movimiento entre las diferentes partes que forman un robot, todas estas deben estar unidas mediante articulaciones. Es necesario reconocer el tipo de movimiento que cada articulación puede realizar, para poder asignar parámetros o variables. Para obtener estos parámetros de movimiento, se introduce el concepto de Grados de Libertad o DOF por sus siglas en inglés (*Degrees of Freedom*), muy usado en la mecánica general. “Los grados de libertad de un sistema mecánico es el número de parámetros independientes que definen tal configuración” [22].

Existen muchos tipos de articulaciones, sin embargo, las más usadas se muestran en la Tabla 1.2 junto con su número de grados de libertad.

Tabla 1.2. Tipos de articulaciones. Fuente [23].

Nombre	Esquema	Grados de Libertad	Variable
Rotación		1	$\Delta\theta$
Prismática		1	Δs
Cilíndrica		2	$\Delta\theta$ y Δs
Planar		2	Δx , Δy y $\Delta\theta$
Esférica o Rótula		3	$\Delta\theta$, $\Delta\phi$ y $\Delta\psi$

Es necesario tener bien claro el tipo de articulación, sus grados de libertad y sus variables,

ya que son la base para el control y modelamiento matemático del robot.

1.5.2.4. Modelos Matemáticos

Un modelo matemático es una descripción de un sistema o un fenómeno mediante términos y cálculos matemáticos. Este sistema o fenómeno puede ser de cualquier tipo de origen, tanto científico, físico, químico, e ingenieril, así como económico, político, estadístico o social [24].

Las principales razones para que sean usados los modelos matemáticos en la comprensión de sistemas y fenómenos es que la matemática es un lenguaje universal, preciso, que ayuda a formular ideas, suponer o asumir condiciones, evitar mal interpretaciones, y sobre todo, el trabajo de cálculos largos y difíciles lo pueden realizar las computadoras [25].

Desde que la robótica se popularizó en la industria se han desarrollado varios modelos matemáticos. Los principales son el Modelo Cinemático Directo, el Modelo Cinemático Inverso, y la Dinámica de Cuerpos Rígidos [23; 26].

“La cinemática es el estudio del movimiento, sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen. En otras palabras, cinemática es el estudio de la posición, desplazamiento, rotación, velocidad y aceleración” [23]. Así entonces, el Modelo Cinemático Directo se centra en la determinación de la posición y orientación del efector final de un robot manipulador, conociendo los variables independientes en las articulaciones (DOF), tales como el ángulo entre componentes para una articulación de rotación, o la distancia entre componentes para una articulación prismática.

El problema inverso, es decir la determinación de variables de las articulaciones para una posición y orientación establecida para el efector final del robot se llama Modelo Cinemático Inverso para un robot manipulador [27].

El procedimiento más aceptado y usado en los modelos matemáticos para robots manipuladores es la Representación de Denavit-Hartenberg. En esta representación, se calcula una matriz de transformación homogénea para cada eslabón del robot. Esta matriz de transformación homogénea A_i es representada como el producto de cuatro transformaciones básicas:

dos rotaciones (Rot_{z,θ_i} y Rot_{x,α_i}) y dos traslaciones ($Trans_{z,d_i}$ y $Trans_{x,a_i}$) – presentadas en la Ecuación 1.2, en la cual se usan los cuatro parámetros establecidos ($\alpha_i, \theta_i, a_i, d_i$) para cada eslabón i y su articulación i correspondiente² [28].

$$A_i = T_i^{i-1} = Rot_{z,\theta_i} \cdot Trans_{z,d_i} \cdot Trans_{x,a_i} \cdot Rot_{x,\alpha_i} \quad (1.2)$$

$$A_i = T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Para calcular la matriz total de transformación homogénea H , se debe multiplicar las matrices de cada eslabón (Ecuación 1.4), tomando en cuenta la variable q_i de cada matriz A_i , que es θ si es una articulación de rotación, o d si es una articulación prismática.

$$H = T_n^0 = A_1(q_1) \cdots A_n(q_n) \quad (1.4)$$

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & o_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Esta matriz H sigue la forma de la Ecuación 1.5, donde o_n^0 es un vector de tres componentes y expresa las coordenadas cartesianas del efector final con respecto al origen de la base del robot, y R_n^0 es la matriz de rotación del sistema de referencia del efector final con respecto al de la base del robot. En conclusión, la matriz de transformación homogénea es única para cada valor de las variables de articulaciones (q_i) y entrega información sobre la posición y orientación del efector final [28].

Para el cálculo de velocidades cinemáticas y fuerzas estáticas se usan las matrices Jacobianas, las cuales relacionan las velocidades de cada articulación con la velocidad total del efector final, es decir, se sigue la Ecuación 1.6. [29]

$$v = J(q) \dot{q} \quad (1.6)$$

en donde v es el vector de velocidad del efector final con respecto al origen del sistema de referencia del robot, e indica tanto velocidad lineal como angular (Ecuación 1.7), $J(q)$ es la

²Más detalles acerca obtención de parámetros en referencia [28].

matriz jacobiana que depende de cada configuración q que tome el robot, y \dot{q} es el vector de velocidades de cada articulación (Ecuación 1.8).

$$v = \begin{bmatrix} v_n^0 \\ \omega_n^0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

La matriz Jacobiana se divide igualmente en dos partes, el jacobiano lineal J_v y el angular J_ω , y se calcula para cada articulación i .

$$J_{v_i} = \begin{cases} z_{i-1}^0 \times (o_n^0 - o_{i-1}^0) & \text{para articulación de revolución} \\ z_{i-1}^0 & \text{para articulación prismática} \end{cases} \quad (1.9)$$

$$J_{\omega_i} = \begin{cases} z_{i-1}^0 & \text{para articulación de revolución} \\ 0 & \text{para articulación prismática} \end{cases} \quad (1.10)$$

donde o_j^i es el vector de posición cartesiana que se calcula con la cinemática directa en la Ecuación 1.5, y $z_j^i = R_j^i k$, donde la matriz de rotación R_j^i es calculada de la Ecuación 1.5 y k es el vector unitario que define la dirección del movimiento de cada articulación, y usualmente es $k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ debido a las reglas de asignación de ejes de Denavit-Hartenberg [28].

Entonces se ensambla el vector de cada articulación, y finalmente se completa la matriz jacobiana de la Ecuación 1.12. [28]

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{v_i} \\ J_{\omega_i} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad \cdots \quad J_n] \quad (1.12)$$

Finalmente, la Dinámica de Cuerpos Rígidos se enfoca principalmente en el estudio de fuerzas, torques y aceleraciones que producen el movimiento. En este modelamiento matemático, se toman en cuenta las masas, momentos de inercias y pesos de los diferentes eslabones o componentes del robot, ya que influyen en las fuerzas y torques necesarios para el adecuado funcionamiento. Para este modelo, existen muchas representaciones y maneras en cómo se

enfoca el problema. Los análisis más usados son los de estática y cinética mediante la Segunda Ley de Newton, el Método del Trabajo Virtual y ecuaciones diferenciales parciales de Lagrange, etc. [23; 27; 30].

En conclusión, estos modelos matemáticos ayudan principalmente a controlar movimientos, posiciones, trayectorias y velocidades del robot, las cuales permiten el funcionamiento necesario según la aplicación.

1.5.3. Soldadura Robotizada

Un proceso de soldadura que contiene tareas repetitivas en piezas similares es conveniente y adecuado para automatizar. En las últimas décadas, la industria de la soldadura se ha visto beneficiada con la robótica debido a que un robot industrial es apto para trabajar en ambientes peligrosos, hacer tareas repetitivas, tiene consistencia y exactitud, es flexible, puede ser reprogramado, y puede comunicarse con interfaces u otros sistemas computacionales.

“La soldadura robotizada es una aplicación relativamente nueva de la Robótica. El uso de robots en soldadura no despuntó sino hasta la década de los 1980, cuando la industria del automóvil comenzó a usar robots masivamente para la soldadura por puntos” [31]. En un principio, el crecimiento quedó limitado por el elevado costo del equipamiento, implicando una restringida aplicación en la producción a gran escala. La soldadura robotizada de arco ha crecido con mucha rapidez y ya domina alrededor del 25% de las aplicaciones industriales con robots [1].

La soldadura robotizada presenta grandes ventajas de precisión y productividad. Las sueldas van a resultar precisas y uniformes debido a que es un proceso repetitivo, y la calidad dependerá de los parámetros de soldadura seleccionados. Además, al automatizar se acelera la producción porque el trabajo se lo puede hacer de manera continua, optimizando tiempo y recursos.

Actualmente, este tipo de soldadura está normada por la AWS, en su sección D16, que describe procedimientos, guías, especificaciones y certificaciones para realizar el proceso, e igualmente rigen las normas y códigos ya existentes individualmente para cada tipo y aplicación

de soldadura.

1.5.3.1. Celda de Trabajo de un Sistema de Soldadura Robotizada

Un sistema básico automatizado de soldadura, es decir, una celda o cámara de trabajo consta de los componentes descritos en la Tabla 1.3 [4], y se lo puede ver de forma gráfica en la Figura 1.8.

Tabla 1.3. Componentes básicos de un sistema robótico de soldadura por arco eléctrico. Fuente [4].

Componente	Necesidades de Trabajo
Robot Manipulador	Configuración, grados de libertad, volumen de trabajo, repetitividad, exactitud, capacidad de carga, velocidad de trabajo.
Controlador del Robot	Tipo de programación, control por retroalimentación, capacidad de memoria, interfaz de comunicaciones con el robot y demás equipos, software de trabajo.
Sensores	Tipo de trabajo, necesidades, tipo de control.
Fuente de Poder de Soldadura	Capacidad para altos ciclos de trabajo, conectividad y adaptabilidad con el robot, precisión.
Equipo de Soldadura por Arco	Control de alimentación de alambre, control en flujo de gas de protección, control y precisión en antorchas.
Equipo de Juntas	Fácil acceso, montaje y desmontaje de piezas de trabajo, exactitud y precisión en posicionamiento de juntas.

1.5.3.2. Control de Trayectoria

Los requerimientos de un robot industrial son generalmente mucho más complejos que los de una máquina CNC, debido a que se toma en cuenta los movimientos lineales y de rotación de los eslabones, los cambios de velocidades y aceleraciones en el efector final, y la interacción con los demás equipos de la celda de trabajo. Por esta razón se utilizan microprocesadores o minicomputadores para que realicen el control de trayectoria [4].

Existen cuatro tipos principales de control para los robots industriales manipuladores. El más antiguo es el control “**Punto a Punto**”, en el cual no existe una definición de trayectoria del robot, sino que éste solo cumple con partir de un punto y llegar al otro sin importar el

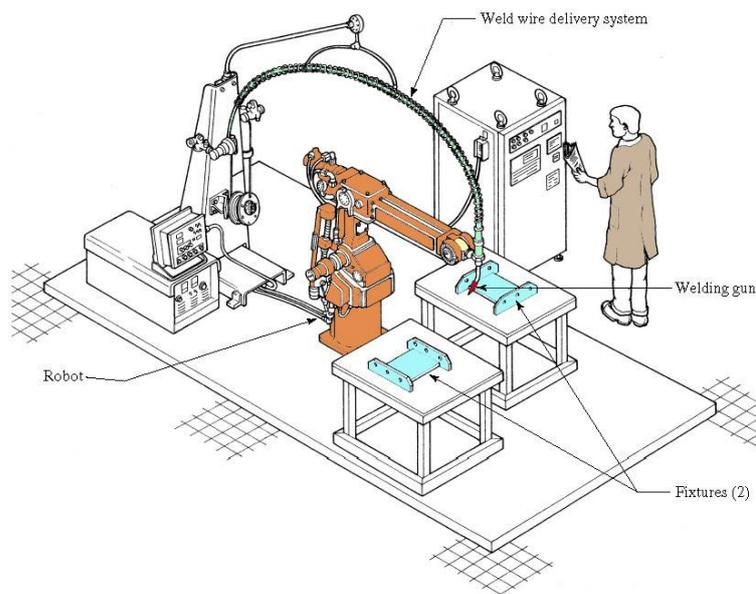


Figura 1.8. Celda de trabajo para soldadura por arco eléctrico robotizada. Fuente [32].

camino. Después se desarrolló el control de “**Trayectoria Continua**” que es capaz de seguir una trayectoria definida entre puntos previamente grabados, sin embargo aún no se tenía un control robusto sobre la trayectoria.

El control de “**Trayectoria Controlada**” solamente necesita de los puntos de inicio y fin de la trayectoria para realizar una interpolación lineal o circular, y seguir el camino exactamente como se calculó. Este es el tipo de control que se usan en el controlador y el software de este proyecto.

Finalmente, existe el “**Control Adaptivo**” (*Adaptive Control*) y “**Seguimiento de Juntas**” (*Seam Tracking*), que es la nueva tecnología que se está desarrollando y usando en las industrias. En este tipo de control, el comportamiento y movimiento del robot se adapta a las diferentes condiciones que se presentan en cada ciclo de trabajo, y responde según sea necesario. Igualmente, ya no se requiere de la grabación de posiciones ya que mediante varios sistemas de sensores (visión, corriente, voltaje, finales de carrera, etc.), se calculará la trayectoria y el robot se moverá a lo largo de la junta a soldar, en cualquier posición que se encuentre.

2. Descripción del Equipo usado en el Proyecto

2.1. Brazo Robótico Scorbot ER 9Pro

El brazo robótico Scorbot ER 9Pro (Figura 2.1a) es un robot manipulador con fines educativos, diseñado y fabricado por la empresa Intelitek. Es propiedad del Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco de Quito. Este robot tiene 5 ejes que cumplen las funciones descritas en la Tabla 2.1 que se lo puede apreciar esquemáticamente en las Figuras 2.1b y 2.1c. Las especificaciones técnicas del robot se presentan en el Apéndice A.

Tabla 2.1. Movimientos de los ejes del robot. Fuente [33].

Eje No.	Articulación	Movimiento	Motor No.
1	Base (<i>Base</i>)	Rota el cuerpo (<i>body</i>)	1
2	Hombro (<i>Shoulder</i>)	Sube y baja el brazo (<i>upper arm</i>)	2
3	Codo (<i>Elbow</i>)	Sube y baja el antebrazo (<i>forearm</i>)	3
4	Inclinación de la muñeca (<i>Wrist Pitch</i>)	Sube y baja el efector final	4
5	Rotación de la muñeca (<i>Wrist Roll</i>)	Rota el efector final	5

Al ser un robot manipulador, el brazo robótico viene con un gripper neumático montado y sujetado mediante pernos. En la figura 3.2 en la página 59 se muestra el esquema de la brida para el montaje del gripper o efector final para el robot. Para el proyecto, se decidió retirar todo el gripper y usar un acople con la brida para sostener la antorcha para soldar. En la Sección 3.1 se detalla el proceso.

2.1.1. Requerimientos Necesarios del Robot

Los requerimientos para un robot industrial son muy altos en términos de control de movimientos, posiciones, velocidades y aceleraciones. Los motores de un robot deben tener la

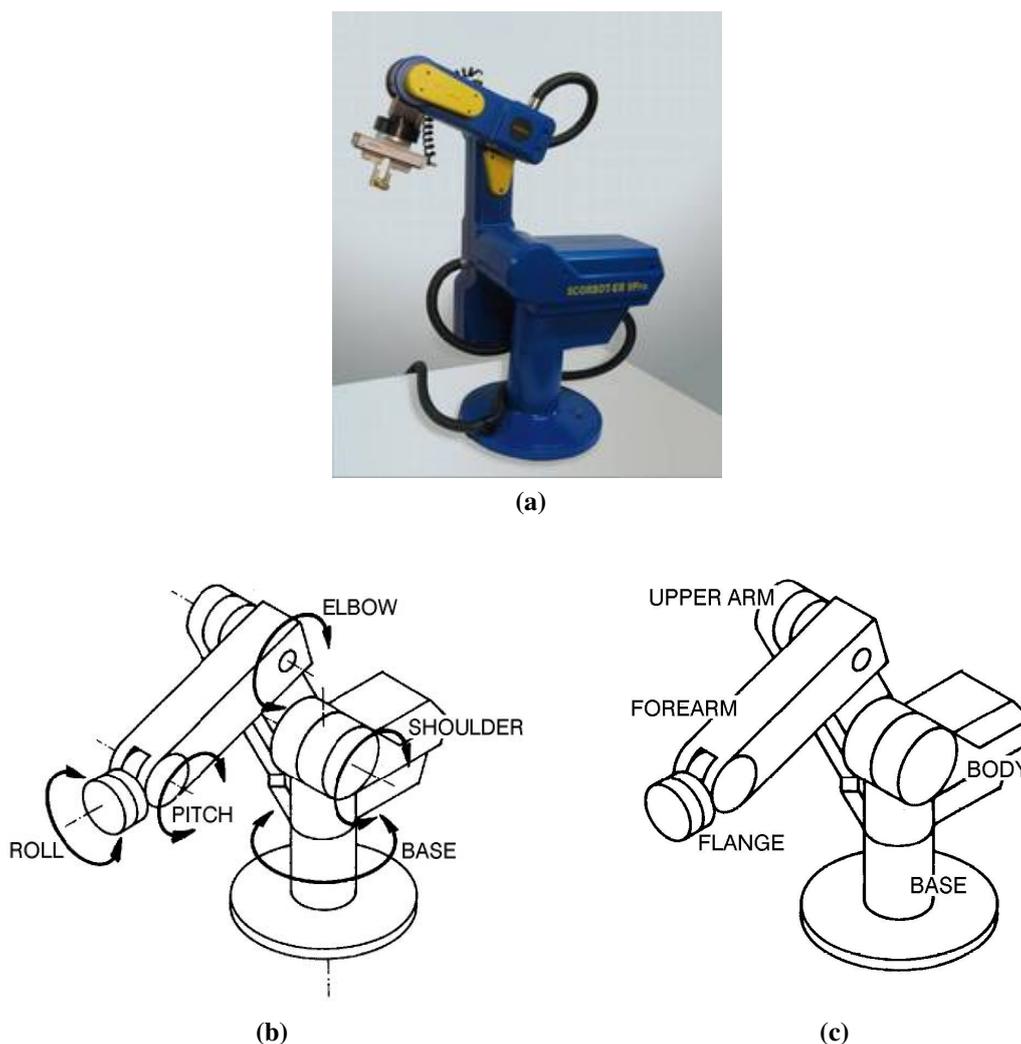


Figura 2.1. Presentación, esquemas y componentes del Scorbot ER 9Pro. **a)** Función original como robot manipulador. Fuente [33]. **b)** Articulaciones del robot. Fuente [33]. **c)** Eslabones del robot. Fuente [33].

capacidad de girar a diferentes velocidades y poder detenerse en cualquier instante, por lo que necesitan un amplio rango de velocidades de operación. Del mismo modo, los motores deben proveer el suficiente torque para cada velocidad del rango de funcionamiento y también para cuando el robot está detenido. Finalmente, los motores del robot deben ser capaces de prender, detener o cambiar la dirección del movimiento de forma rápida, manteniendo la precisión en los movimientos y llegando a las posiciones finales deseadas [33].

Para llegar a dichos niveles de precisión, el sistema de movimiento para cada articulación tiene tres elementos principales: un servomotor eléctrico DC, una caja de reducción Harmonic Drive, y una banda con poleas [33]. En la Figura 2.2 se presenta el sistema para cada

articulación y las posiciones en las que está ubicado cada sistema en el robot. Los valores de las reducciones para cada eje constan en la Tabla 2.2.

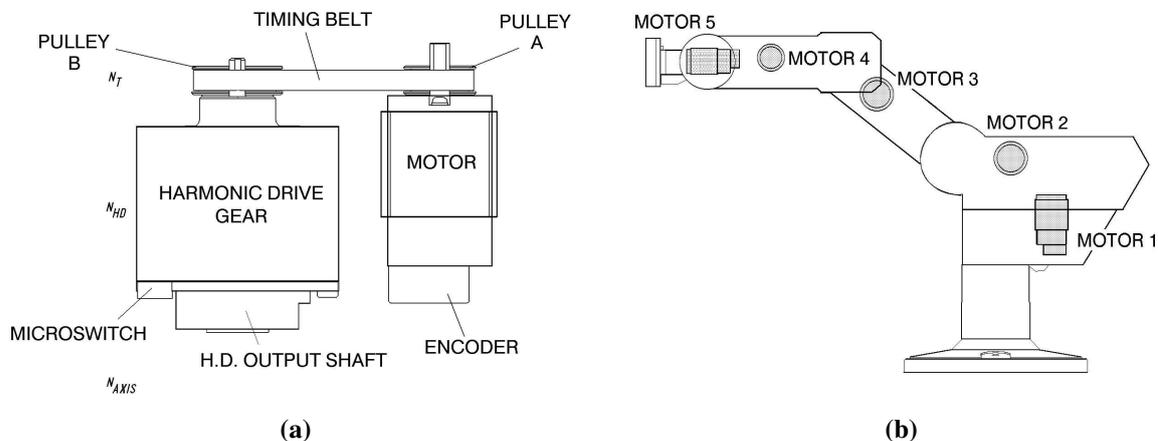


Figura 2.2. Sistema de actuadores de movimiento del robot. **a)** Esquema y componentes del sistema. Fuente [33]. **b)** Posición de motores para cada articulación del robot. Fuente [33].

Además, el último componente para llegar a la precisión deseada del robot son los encoders de cada motor. Los encoders son muy importantes puesto que ayudan a transmitir los pulsos eléctricos hacia el controlador y a verificar los movimientos de cada articulación. Cada encoder del robot trabaja con un LED, 4 foto-detectores y contiene un disco con 512 espacios para el paso de luz. Con este sistema de encoders se generan 2048 pulsos por cada revolución completa del eje, y por ende la resolución del encoder sigue la Ecuación 2.1 y es de 0.176° .

$$S_E = \frac{360^\circ}{n} = \frac{360^\circ}{512 \times 4} = 0.176^\circ \quad (2.1)$$

donde S_E es la resolución del encoder y n es el número de pulsos por revolución del encoder.

Tabla 2.2. Radios de reducción mecánica en ejes del robot. Fuente [33].

Eje	R. Bandas	R. Harmonic Drive	R. Total
1	1.33 : 1	160 : 1	213.33 : 1
2	1.52 : 1	160 : 1	243.8 : 1
3	1.33 : 1	160 : 1	213.33 : 1
4	1.8 : 1	100 : 1	180 : 1
5	-	100 : 1	100 : 1

Debido a que el encoder se encuentra montado en el eje de cada motor, la resolución de cada

articulación se calcula por la Ecuación 2.2.

$$S_{Joint} = \frac{S_E}{N_{axis}} \quad (2.2)$$

donde S_{Joint} es la resolución de la articulación, S_E es la resolución del encoder y N_{axis} es la reducción mecánica del eje.

Por lo tanto, si se quiere saber la resolución para la articulación 3, basándose en la Ecuación 2.2 y la Tabla 2.2, se tendría que la resolución es de 0.000825° , y teóricamente es el mínimo posible incremento que el sistema puede identificar y controlar en ese eje [33]. Esto implica que la precisión y la confiabilidad de los movimientos del robot son altas y van a cumplir con los requerimientos de trabajo.

2.1.2. Principios de Control del Brazo Robótico

Mediante el volumen de trabajo del robot y los datos de distancias entre articulaciones, que se presentan en la Figura 2.3, se creó el modelo matemático para el robot a partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg (ver Sección 1.5.2.4), aplicando las reglas que se presentan en Niku [27] y Spong et al. [28]. Estos parámetros se detallan en la Tabla 2.3, y con ellos se calculó la matriz de transformación que se presenta en la Ecuación 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de Denavit-Hartenberg calculados para el Scorbot ER 9Pro

T_i^j	d [mm]	θ [rad]	a [mm]	α [rad]
T_1^0	388	θ_1	70	$-\frac{\pi}{2}$
T_2^1	-43	θ_2	280	0
T_3^2	0	θ_3	230	0
T_4^3	0	θ_4	0	$\frac{\pi}{2}$
T_5^4	111	θ_5	0	0

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} -s_1s_5 + c_1c_5c_{234} & -c_5s_1 - s_5c_1c_{234} & c_1s_{234} & p_x \\ c_1s_5 + c_5s_1c_{234} & c_1c_5 - s_5s_1c_{234} & s_1s_{234} & p_y \\ -c_5s_{234} & s_5s_{234} & c_{234} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde

$$\begin{aligned}
 s_i &= \sin \theta_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3, 4, 5 \\
 c_i &= \cos \theta_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3, 4, 5 \\
 s_{23} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 c_{23} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 s_{234} &= \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
 c_{234} &= \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
 p_x &= a_1 c_1 - d_2 s_1 + a_2 c_1 c_2 + d_5 c_1 s_{234} + a_3 c_1 c_{23} \\
 p_y &= a_1 s_1 + d_2 c_1 + a_2 s_1 c_2 + d_5 s_1 s_{234} + a_3 s_1 c_{23} \\
 p_z &= d_1 - a_2 s_2 + d_5 c_{234} - a_3 s_{23}
 \end{aligned}$$

La Ecuación 2.3 se da en términos de θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 y θ_5 que son los diferentes ángulos de las articulaciones. Como se explicó en la Sección 1.5.2.4, dependiendo de los valores de estas variables se obtendrá una matriz de transformación única, la cual indica la posición y orientación del origen del marco de referencia del efector final (en este caso O_5) con respecto al origen del marco de referencia inercial o de la base (en este caso O_0) [28].

Como ejemplo, si se tiene al Scorbot en la posición de la Figura 2.3, en donde los valores de los ángulos de las articulaciones son $(0, 0, 0, \frac{\pi}{2}, 0)$ respectivamente, de acuerdo a los ejes coordenados elegidos, y siguiendo la matriz de transformación homogénea calculada en la Ecuación 2.3, se llega a la matriz H de la Ecuación 2.4.

$$H = T_5^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 691 \\ 0 & 1 & 0 & -43 \\ -1 & 0 & 0 & 388 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

De la ecuación (1.5) en la página 32, se tiene que $R_5^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ y $o_5^0 = \begin{bmatrix} 691 \\ -43 \\ 388 \end{bmatrix}$, y por lo tanto, los resultados obtenidos indican que con los valores establecidos de los ángulos de las articulaciones, el efector final (en este caso el sistema de coordenadas O_5) se encuentra a 691 mm en la dirección x , -43 mm en la dirección y , y 388 mm en la dirección z del sistema de referencia O_0 .

Asimismo, la orientación del sistema de coordenadas O_5 con respecto a O_0 indica que el eje x_5 está en la dirección negativa del eje z_0 (primera columna de la matriz R), y_5 en la misma

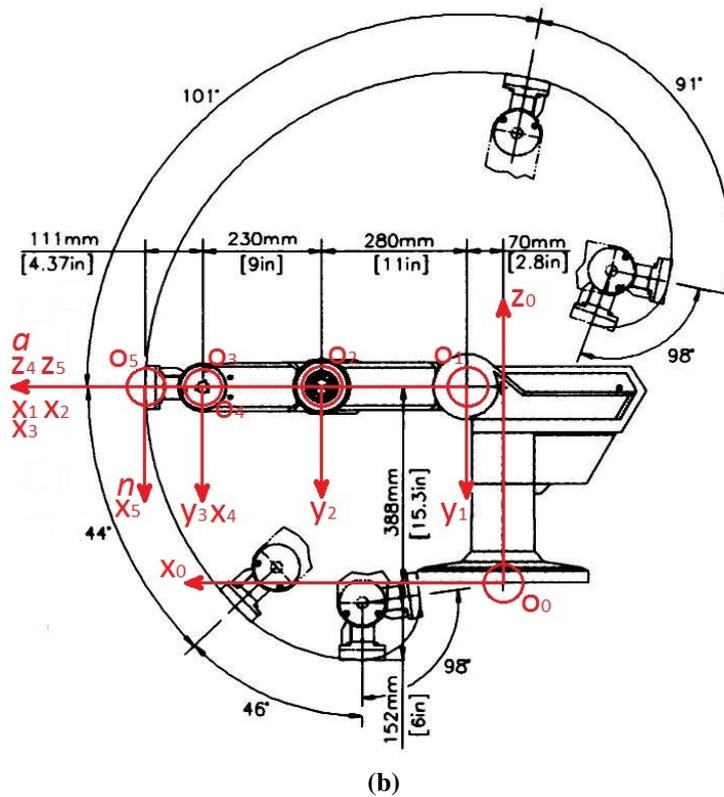
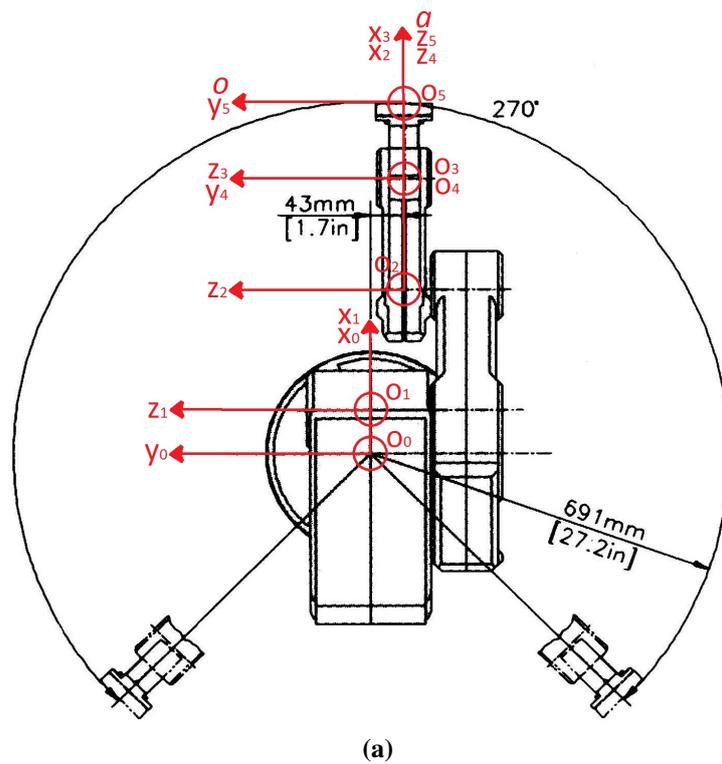


Figura 2.3. Volumen de trabajo del robot. Fuente [33]. a) Vista superior. b) Vista lateral.

dirección de y_0 (segunda columna de R), y z_5 en la dirección positiva x_0 (tercera columna de R). Comparando estos datos con la gráfica, se puede ver que son verdaderos y que el modelo es correcto.

Con esta matriz se pueden realizar cálculos en el Modelo Cinemático Directo, es decir, partiendo de los ángulos de las diferentes articulaciones del robot, computar las coordenadas cartesianas de posición y orientación del efector final con respecto al origen del sistema de referencia, que en este caso es la base del robot.

Sin embargo, para el caso en que se necesitan conocer los valores de los ángulos de las articulaciones que van a satisfacer la ubicación del efector final en una posición y orientación deseada, es necesario aplicar el Modelo Cinemático Inverso, cuyos cálculos y operaciones implican un análisis geométrico de la estructura del robot y de resolución de ciertas ecuaciones a partir de las matrices calculadas anteriormente. Por lo tanto, el problema es encontrar el vector q de variables de articulaciones que obtengan una matriz H deseada.

$$H_{deseada} = \begin{bmatrix} & R & o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_n^0(q) \quad (2.5)$$

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$o = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Las soluciones para un determinado problema pueden existir como única solución, varias soluciones o no existir debido a que la posición deseada está afuera del volumen de trabajo (ver Figura 2.4).

Para resolver este problema, primeramente se calcula geoméricamente la posición del centro de la muñeca del robot denominado o_c , que es definida mediante la Ecuación 2.8.

$$o_c^0 = o - d_5 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

donde o y R están dadas por la Ecuación 2.5. Mediante el análisis de la Figura 2.5a se obtienen las Ecuaciones 2.9 a 2.13, y se encuentra el ángulo θ_1 . Como se explicó anteriormente,

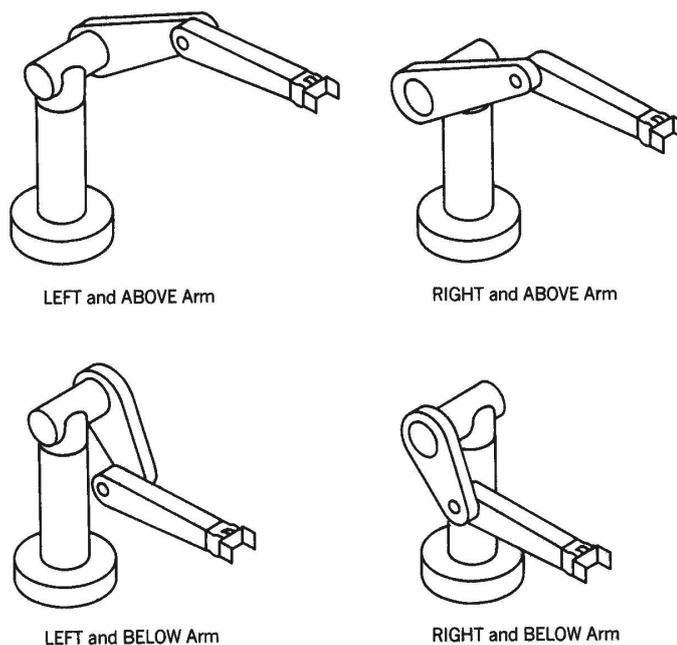


Figura 2.4. Diferentes soluciones para un mismo problema cinemático inverso. Fuente [28].

esta articulación puede tener otra configuración, sin embargo, debido a restricciones de movimiento del Scorbot ER 9Pro, solo la configuración del brazo a la derecha (Figura 2.4) se puede lograr.

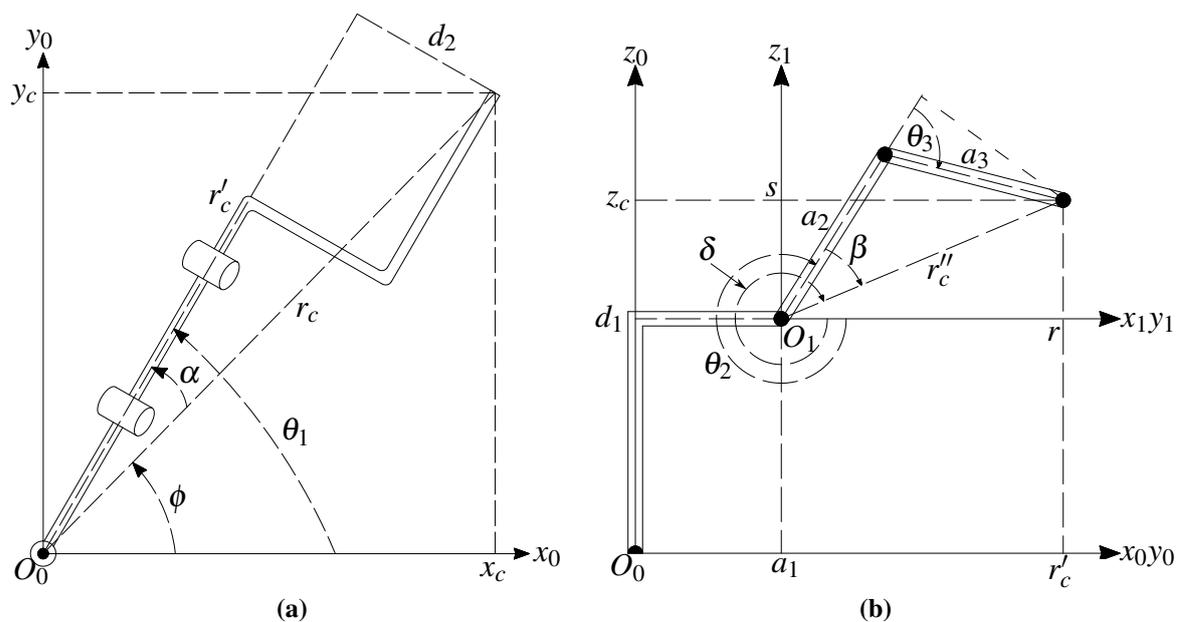


Figura 2.5. Análisis geométrico del robot usado para la resolución del Modelo Cinemático Inverso. **a)** Vista superior. **b)** Vista lateral de la proyección del plano formado por los eslabones 2 y 3.

$$r_c^2 = x_c^2 + y_c^2 \quad (2.9)$$

$$r'_c = \sqrt{r_c^2 - d_2^2} = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d_2^2} \quad (2.10)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \quad (2.11)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|d_2|}{r'_c}\right) \quad (2.12)$$

$$\theta_1 = \phi + \alpha \quad (2.13)$$

Para las articulaciones 2 y 3, la Figura 2.5b sirve de referencia para obtener las siguientes ecuaciones.

$$r = r'_c - a_1 = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d_2^2} - a_1 \quad (2.14)$$

$$s = z_c - d_1 \quad (2.15)$$

$$r_c''^2 = r^2 + s^2 \quad (2.16)$$

Por ley de cosenos en el triángulo $a_2 r_c'' a_3$ se obtiene la Ecuación 2.17, y se despeja el valor de $\cos \theta_3$.

$$r_c''^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2a_2 a_3 \cos(\pi - \theta_3) \quad (2.17)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3} \quad (2.18)$$

Para obtener el valor de θ_3 , no se calcula la función arco-coseno de la Ecuación 2.18, sino que se trabaja para obtener la función arco-tangente, la cual entrega los valores verdaderos en términos de cuadrantes; además entrega los dos valores para las dos configuraciones posibles (codo arriba y codo abajo) (ver Figura 2.4) [28].

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad (2.19)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3}\right) \quad (2.20)$$

Por lo tanto, si se desea la configuración de “codo arriba”, se utiliza el valor positivo de la

raíz de la Ecuación 2.19, y se lo reemplaza en la Ecuación 2.20; y del mismo modo, para la configuración de “codo abajo” se utiliza el valor negativo.

Seguidamente, se continúa trabajando en obtener el valor de θ_2 .

$$\delta = -\arctan\left(\frac{s}{r}\right) \quad (2.21)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{a_3 \sin \theta_3}{a_2 + a_3 \cos \theta_3}\right) \quad (2.22)$$

$$\theta_2 = \delta - \beta \quad (2.23)$$

Como se esperaba, el valor de θ_2 depende del valor de θ_3 , ya que dependiendo la configuración escogida los dos valores varían.

Debido a que ya se conocen los valores de las tres primeras variables (θ_1 , θ_2 y θ_3), se puede determinar la matriz transformada de rotación R_3^0 , que indica la orientación del origen de la muñeca, es decir, o_c . Además, se puede seguir la cadena de transformaciones y obtener la Ecuación 2.24.

$$R = R_3^0 R_5^3$$

$$R_5^3 = (R_3^0)^{-1} R = (R_3^0)^T R \quad (2.24)$$

En este caso, se tiene que

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$R_5^3 = \begin{bmatrix} c_4 c_5 & -c_4 s_5 & s_4 \\ s_4 c_5 & -s_4 s_5 & -c_4 \\ s_5 & c_5 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Aplicando la multiplicación de la Ecuación 2.24 a las matrices de las Ecuaciones 2.6, 2.25 y 2.26, se iguala término a término y se obtienen las Ecuaciones 2.27 a 2.30.

$$\text{término (1, 3)} \rightarrow c_1 c_{23} a_x + s_1 c_{23} a_y - s_{23} a_z = s_4 \quad (2.27)$$

$$\text{término (2, 3)} \rightarrow -c_1 s_{23} a_x - s_1 s_{23} a_y - c_{23} a_z = -c_4 \quad (2.28)$$

$$\text{término (3,1)} \rightarrow -s_1 n_x + c_1 n_y = s_5 \quad (2.29)$$

$$\text{término (3,2)} \rightarrow -s_1 o_x + c_1 o_y = c_5 \quad (2.30)$$

Finalmente, los valores de los ángulos se obtienen de la misma manera, mediante la función arco-tangente.

$$\theta_4 = \arctan \left(\frac{\sin \theta_4}{\cos \theta_4} \right) \quad (2.31)$$

$$\theta_5 = \arctan \left(\frac{\sin \theta_5}{\cos \theta_5} \right) \quad (2.32)$$

Por lo tanto, con todas las ecuaciones obtenidas se pueden obtener las variables de cada articulación, que van a satisfacer una posición y orientación deseada para el efector final.

2.1.3. Análisis de Velocidades y Trayectorias

En la Sección 1.5.2.4 se explicó la función de la matriz jacobiana para obtener la velocidad total del efector final a partir de las velocidades de cada articulación. Las Ecuaciones 1.9 y 1.10 en la página 33 explican como obtener el vector para cada articulación. Debido a que todas las articulaciones del robot son de revolución, se tiene que cada vector jacobiano tiene la forma de la Ecuación 2.33.

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{v_i} \\ J_{\omega_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1}^0 \times (o_5^0 - o_{i-1}^0) \\ z_{i-1}^0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

donde $o_5^0 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ que se calcula mediante la Ecuación 2.3 en el Modelo Cinemático Directo, e implica que el Jacobiano cambia para cada configuración del robot.

Para la articulación 1 se tiene

$$z_0^0 = R_0^0 k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$o_0^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} -p_y \\ p_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

La articulación 2 posee los siguientes datos

$$\begin{aligned} z_1^0 &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 \\ s_1 & 0 & c_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ o_1^0 &= \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ d_1 \end{bmatrix} \\ J_2 &= \begin{bmatrix} c_1(p_z - d_1) \\ -s_1(p_z - d_1) \\ -c_1(p_x - a_1 c_1) + s_1(p_y - a_1 s_1) \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Para la articulación 3 se obtuvieron los siguientes valores

$$\begin{aligned} z_2^0 &= \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ o_2^0 &= \begin{bmatrix} a_1 c_1 - d_2 s_1 + a_2 c_1 c_2 \\ a_1 s_1 + d_2 c_1 + a_2 s_1 c_2 \\ d_1 - a_2 s_2 \end{bmatrix} \\ J_3 &= \begin{bmatrix} c_1(d_5 c_{234} - a_3 s_{23}) \\ s_1(d_5 c_{234} - a_3 s_{23}) \\ -a_3 c_{23} - d_5 s_{234} \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Para la articulación 4 se tiene

$$\begin{aligned} z_3^0 &= \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ o_3^0 &= \begin{bmatrix} a_1 c_1 - d_2 s_1 + a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} \\ a_1 s_1 + d_2 c_1 + a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} \\ d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} d_5 c_1 c_{234} \\ d_5 s_1 c_{234} \\ -d_5 s_{234} \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

La articulación 5 posee los siguientes datos

$$\begin{aligned} z_4^0 &= \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -s_1 & c_1 s_{234} \\ s_1 c_{234} & c_1 & s_1 s_{234} \\ -s_{234} & 0 & c_{234} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 s_{234} \\ s_1 s_{234} \\ c_{234} \end{bmatrix} \\ o_4^0 &= \begin{bmatrix} a_1 c_1 - d_2 s_1 + a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} \\ a_1 s_1 + d_2 c_1 + a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} \\ d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} \end{bmatrix} \\ J_5 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1 s_{234} \\ s_1 s_{234} \\ c_{234} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Finalmente, el Jacobiano es la matriz armada de todos los vectores.

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5] \quad (2.39)$$

Con esta matriz, se pueden calcular las velocidades del efector final siguiendo la Ecuación 1.6, o también se puede realizar el problema inverso, calcular las velocidades de articulaciones para una velocidad de efector final deseada.

$$\dot{q} = J(q)^{-1} v \quad (2.40)$$

donde $J(q)^{-1}$ es la matriz inversa o pseudoinversa¹ del Jacobiano.

Todos estos cálculos, análisis matriciales y una simulación de trayectorias fueron realizados en MatLab para obtener la mejor configuración posible del robot para realizar el trabajo. Este estudio se presenta en la Sección 3.4.

¹La matriz Jacobiana no siempre es una matriz cuadrada, y es necesaria la obtención de una matriz pseudoinversa, ver referencia [28].

2.2. Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810

La máquina de soldar que se utilizó en el proyecto es la soldadora Gala Gar GALA MIG 1810 (Figura 2.6a). Esta máquina funciona para el proceso de soldadura MIG/MAG, es de tipo profesional, y es utilizada con fines educativos y para pequeños trabajos de mantenimiento. La soldadora pertenece al Taller Mecánico de la Universidad San Francisco de Quito, y utilizada principalmente por estudiantes de Ingeniería Mecánica para proyectos y clases demostrativas y técnicas de la carrera. Las especificaciones técnicas de este equipo se presentan en el Apéndice B.

2.2.1. Electrodo

El rollo de electrodo usado en este proyecto es del tipo ER70S-3. Este es un electrodo para trabajos de soldadura general, sobre aceros ordinarios al carbono y aplicable con CO_2 , $\text{Ar} - \text{O}_2$ o una mezcla entre ambos [6]. La composición química del electrodo se describió en la Tabla 1.1 en la página 23.

El diámetro del alambre es 0.9 mm, y el rollo está montado dentro de la armadura de la máquina que se mueve mediante un motor acoplado que funciona a velocidad regulable por el usuario, dependiendo de los requerimientos de trabajo (Figura 2.6b).

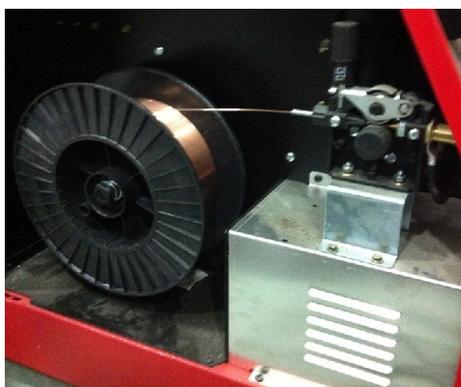
2.2.2. Gas de Protección

El gas de protección usado en este proyecto fue Dióxido de Carbono (CO_2). A temperatura normal, este gas se comporta como un gas inerte, sin embargo, cuando se encuentra a elevadas temperaturas dentro del arco eléctrico con el material fundido, el gas se vuelve reactivo [16].

En la región del polo eléctrico positivo, las moléculas de CO_2 se disocian dejando moléculas de carbono y oxígeno libres, además de Monóxido de Carbono (CO). En la región negativa, que siempre va a ser la pieza de trabajo (ver Sección 1.4.1), los elementos disociados anteriormente se vuelven a recombinar. Durante este proceso de recombinación, se crean niveles de alta densidad de energía, causando cordones con gran penetración y anchos [16].



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6. Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810 y sus componentes. **a)** Unidad principal de la soldadora. **b)** Alimentación de alambre. **c)** Conexión y manómetros para el gas de protección.

Debido a la disociación de elementos en la atmósfera del arco eléctrico, la presencia de oxígeno libre es una amenaza contra la calidad de la soldadura, y es por esta razón que los electrodos usados contienen elementos desoxidantes (Si, Al, Ti, V) que reaccionan inmediatamente, y previenen que se combine con el carbono y hierro del material base [6].

Por lo tanto, es necesario mantener un adecuado flujo de este gas; un flujo excesivo eleva la presencia de oxígeno libre en la soldadura, mientras que un flujo bajo de gas no cumplirá completamente la tarea de protección. En el proyecto se escogió un flujo de gas CO_2 de alrededor de 25 cfh, ya que varios textos sobre soldadura lo recomiendan u obligan en especificaciones de procedimientos más parecidos a los que se realizaron, y además, el propio

manual de la soldadora lo recomienda.

La soldadora dispone de un cilindro de gas CO₂, un manómetro para verificar la presión en el cilindro y regulador de caudal para seleccionar y mantener un flujo de salida constante. Estos componentes se presentan en la Figura 2.6c.

2.2.3. Control y Automatización

Esta soldadora no pudo ser automatizada en su totalidad ya que su aplicación es para soldadura MIG manual, sin embargo se llegó a realizar el control automático de encendido y apagado del arco.

El arco eléctrico en la soldadora se activa mediante un switch manual que se encuentra en la antorcha (Figura 2.7a). El switch está situado estratégicamente y de manera ergonómica para que sea accionado fácilmente por el operador. Así entonces, cuando el operador está listo para soldar, se acciona el switch que activa todos los componentes para crear el arco (energiza el electrodo, enciende el motor para la salida del alambre y abre la válvula de salida del gas protector).

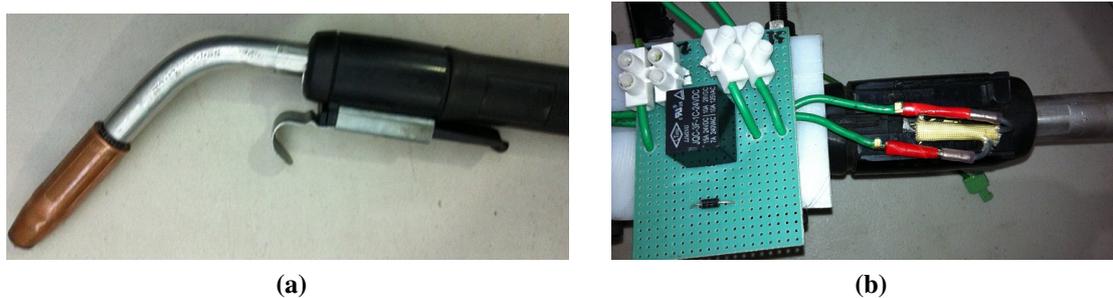


Figura 2.7. Modos de activación de la soldadora. **a)** Activación por pulsador mediante el switch manual. **b)** Activación por relé mediante computadora.

Para la aplicación del proyecto, se decidió retirar el switch manual, y reemplazarlo por un relé, que es activado automáticamente por el controlador del robot. Este relé se encuentra en el circuito de control que es explicado en la Sección 3.3 y en el Apéndice E, y acciona automáticamente el inicio y fin del arco eléctrico.

El voltaje, la velocidad de alimentación del electrodo y el flujo del gas fueron las variables

que no se pudieron controlar automáticamente, por lo tanto, esas variables deben ser configuradas manualmente antes de cada ciclo de trabajo.

2.3. Software Scorbace

El software usado para el control y programación del robot Scorbace ER 9Pro es Scorbace, versión 6.02. Este software es producido por Intelitek, y es exclusivo para la operación de sus brazos robóticos. El Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco de Quito posee la licencia para trabajar con el programa, el cual se encuentra instalado en la computadora WS2, para el respectivo control y funcionamiento del robot.

Scorbace permite el control y entrega información en tiempo real del estado del robot, mediante la comunicación USB con el controlador. Se puede obtener valores de encoder de articulaciones, valores de entradas del controlador, activar o desactivar salidas del controlador, así como las posiciones absolutas y relativas en sistema cartesiano o por articulación [34].

La programación en Scorbace se basa en definición de posiciones, o en posiciones predeterminadas, a fin de que el robot sepa a qué lugar moverse y en donde trabajar. En este contexto, siempre que se realiza un programa, se requieren las posiciones en la que se va a trabajar.

El control de posiciones del robot en Scorbace se realiza en base a dos sistemas de coordenadas: Cartesianas ($x, y, z, pitch, roll$) o Articulaciones ($base, shoulder, elbow, pitch, roll$), como se muestra en la Figura 2.8, y pueden ser tanto absolutas (referencia al origen del sistema) o relativas (en referencia a otra posición).

Los comandos de programación más usados en Scorbace se dividen en tres grupos y se los puede seleccionar desde la pantalla según la necesidad. Estos grupos son:

- *Axis Control*: Comandos para controlar posiciones y movimientos del robot, tales como enseñar posiciones, abrir y cerrar el gripper, mover hacia posiciones, etc.
- *Program Flow*: Comandos de programación usuales, como declaración de variables, pausas, declaración de subrutinas, ejecución de subrutinas, estructuras de casos y condiciones, etc.

- *Input & Output*: Comandos para interacción con las entradas y salidas del controlador, tales como prender una salida digital, leer el valor de una entrada análoga, interrupciones debido a señales de entradas, etc.

Scorbase tiene una integración con el lenguaje de programación Visual Basic Script (VBS), en donde se pueden crear algoritmos, subrutinas y funciones mucho más complejas, además de poder adentrarse en aplicaciones con el sistema de Windows y sus programas. Con VBS se puede crear, leer, editar y eliminar archivos, así como trabajar con MS Excel, archivos de texto simple (Notepad), usar funciones del sistema como el tiempo y fecha, entre otros.

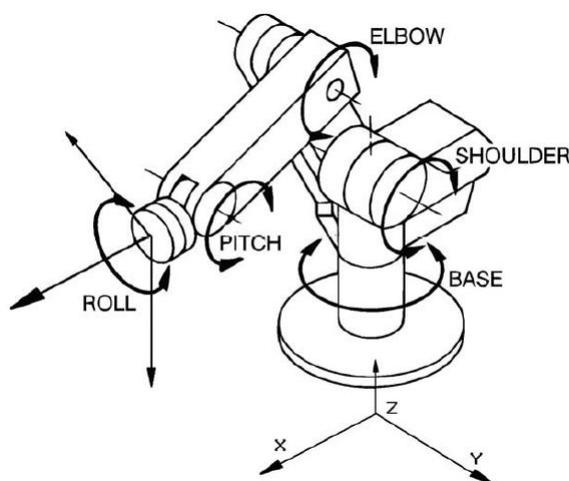


Figura 2.8. Sistemas de referencia. Fuente [33].

La ejecución de programas en Scorbase es línea por línea, es decir, cada vez que se ejecuta el programa, primero debe acabarse de ejecutar una línea de comando para que inicie la ejecución de la siguiente línea.

En el proyecto, se utilizó la programación en Scorbase y la integración de programación VBS. Sin embargo, se detectaron algunas restricciones y limitaciones en este software, que se listan en la Sección 3.7.

2.4. Controlador del robot USB-Pro

Para la comunicación y control entre el robot y los comandos de programación del software se requiere un controlador capaz de realizar y analizar las tareas. El controlador USB-Pro

Controller (Figura 2.9a) es fabricado por Intelitek y diseñado para funcionar únicamente con sus robots.

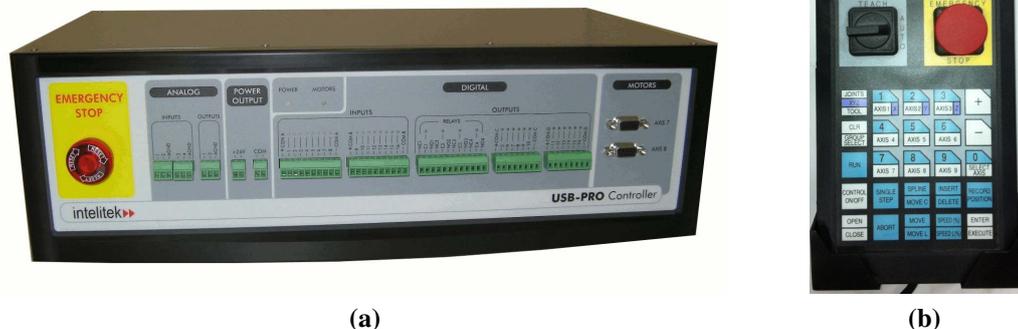


Figura 2.9. Sistema de control del robot. **a)** Controlador USB-Pro. Fuente [35]. **b)** Teach Pendant. Fuente Foto Propia.

El controlador es el encargado de recibir todos los comandos del software, traducirlos y enviarlos hacia los respectivos destinatarios, que puede ser cualquier motor de las articulaciones, comandos para prender o apagar las salidas, accionar el gripper o accionar cualquier eje adicional conectado.

Junto con el controlador viene incluido el “Teach Pendant” (Figura 2.9b). Este es un aparato para controlar al robot desde una distancia o posición cercana. Su uso es muy frecuente cuando se trata de grabación de posiciones o para accionar el pulsador de emergencia, puesto a que al estar cerca del robot, es más rápida la ejecución de esas tareas.

El USB-Pro Controller cuenta con 4 entradas análogas, 2 salidas análogas, una fuente de voltaje para el usuario, 16 entradas digitales, 16 salidas digitales y puertos para conexiones de ejes auxiliares, como una base deslizante u otro motor.

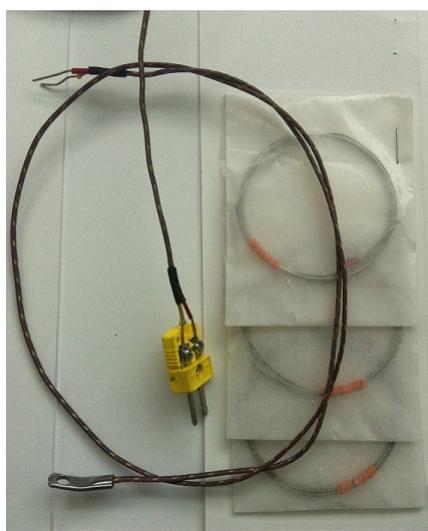
En el proyecto se usaron entradas análogas y digitales, así como salidas digitales. Las especificaciones técnicas y los circuitos de conexión para las entradas y salidas se detallan en el Apéndice C.

2.5. Equipo de Medición de Temperaturas

Para llevar a cabo la investigación, se necesitaron el set de Medición de Temperaturas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito. Este set contiene varios modelos de termocuplas de la marca Omega, que son de tipo *K* y capaces de medir temperaturas hasta 1000°C en algunos tipos. Estas se muestran en la Figura 2.10a.

Para la recolección de datos, se tiene un termómetro digital con funcionalidad de grabación de datos. Este termómetro es el Omega RDXL4SD (Figura 2.10b), el cual admite hasta cuatro señales de termocuplas diferentes, y puede grabar las temperaturas medidas cada cierto tiempo según los requerimientos del usuario.

En el Apéndice D se detallan las especificaciones técnicas de estos equipos.



(a)



(b)

Figura 2.10. Componentes del equipo de medición de temperaturas. **a)** Termocuplas usadas en el proyecto. **b)** Termómetro digital y recolector de datos. Fuente [36].

3. Desarrollo del Proyecto

3.1. Acople Mecánico entre Robot y Antorcha

La primera tarea que se realizó en el proyecto fue diseñar y fabricar el acople para que el robot tenga la capacidad de manipular la antorcha de la máquina de soldadura.

Se necesita que este acople sea muy rígido, exacto, que no intervenga ni deteriore la precisión y estabilidad del robot, y no fuerce ni comprometa a los componentes mecánicos y eléctricos del robot, como motores, transmisiones, etc.

Al inicio, se ideó como agarrar fijamente la antorcha, tal como lo hiciera un operador humano. Luego, se propuso poner dos bloques fijados a cada lado de la antorcha y asegurados con pernos. Se tomaron las mediciones necesarias de la antorcha y se diseñaron los bloques. En la Figura 3.1a se presenta el diseño CAD idealizado. Después de realizar un estudio FODA, se seleccionó el material a utilizar en la elaboración de los bloques. Por la disponibilidad y facilidad de adquisición, se consideró tres materiales: acero, aluminio y grilón¹. Para la evaluación de cada parámetro, se manejaron tres calificaciones: 0 = malo, 1 = medio, 2 = bueno. Los resultados del FODA se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Análisis FODA

Parámetro/Material	Acero	Aluminio	Grilón
Costo	1	0	1
Facilidad de maquinado	0	0	2
Peso	0	1	2
Adaptabilidad a la antorcha	2	2	2
Mantener fija antorcha en robot	2	2	2
Total	5	5	9

Después del análisis, se concluyó que el material a ser usado sería el grilón, ya que obtuvo el puntaje más alto en el FODA y sus propiedades físicas, mecánicas y de adaptabilidad son óp-

¹Grilón es un polímero termo-plástico hecho de nylon muy usado en la industria debido a sus propiedades.

timas para la aplicación. En el mismo Laboratorio de Manufactura, el diseño fue sometido a un software CAM, se programó las operaciones necesarias para maquinar la pieza de trabajo a las formas y dimensiones con las respectivas velocidades y avances de corte (Figura 3.1b).

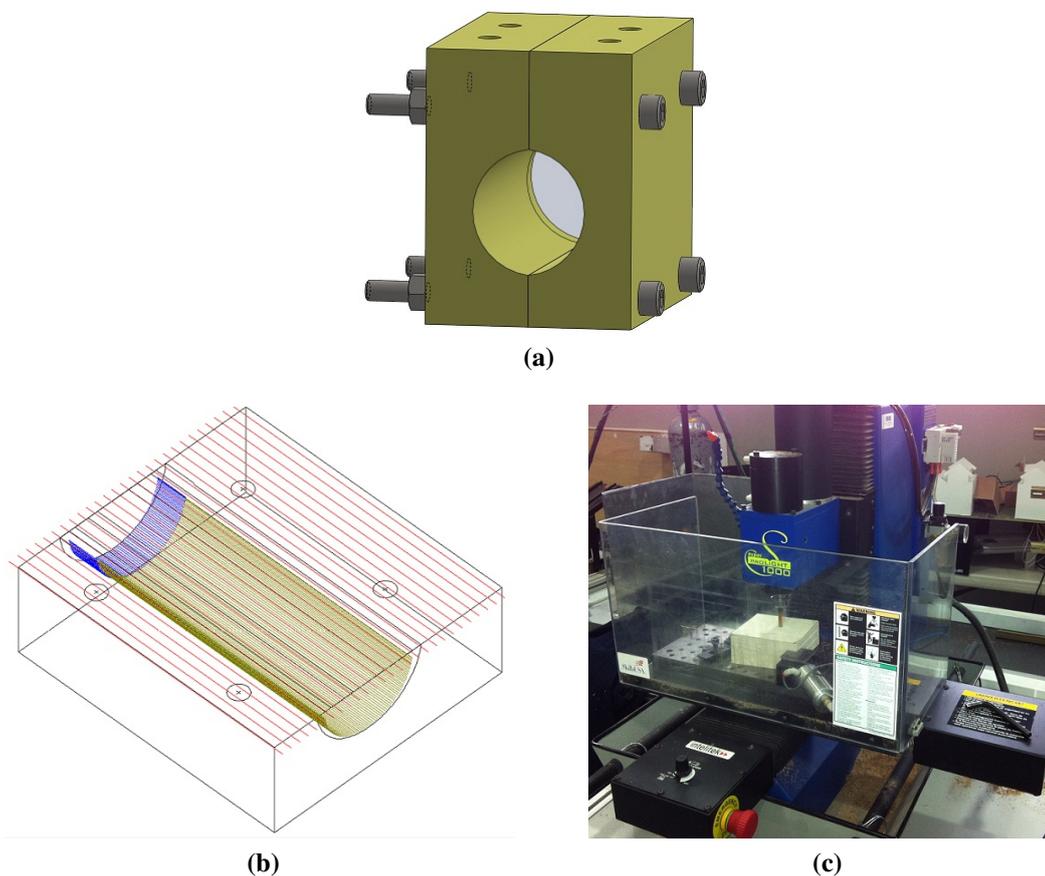


Figura 3.1. Diseño y construcción de la abrazadera. **a)** Diseño en CAD. **b)** Programación CAM. **c)** Maquinado final.

Finalmente, se adquirió la materia prima necesaria, se colocó en la fresadora del Laboratorio, se trabajó y maquinó hasta obtener el producto final, como se muestra en la Figura 3.1c.

El producto final resultó de buena calidad, acopló exactamente con el tamaño de la antorcha y no hubo ningún juego ni movimiento mecánico o errores que hicieran que la antorcha se mueva libremente. Esta abrazadera se muestra en la Figura 3.4a y se aprecia que es exactamente similar al diseño en CAD.

Luego, se definió como unir la antorcha con la abrazadera en el robot, surgieron dos posibles soluciones. Considerando que el robot inicialmente contaba con un gripper neumático, ex-

plicado en la Sección 2.1 (figura 2.1a en la página 38), la primera solución era conseguir que el gripper agarre el conjunto abrazadera-antorcha, ya sea mediante presión en las tenazas, o mediante una junta con el gripper cerrado, es decir, mediante cinta adhesiva alrededor de todo el gripper y abrazadera.

La segunda opción fue la de retirar completamente el gripper y atornillar la abrazadera a todo el conjunto del robot, ya que se dispone de una brida con varios agujeros roscados para acoplar algún efector final, ya explicado en la Sección 2.1 (Figura 3.2).

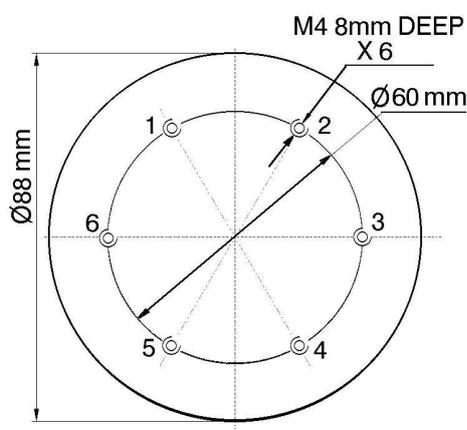


Figura 3.2. Esquema de la brida en el robot. Fuente [33].

A pesar de tener dos opciones, no fue necesario analizar los beneficios de cada una, pues estaba muy claro que la segunda opción era la más beneficiosa, ya que una junta atornillada simétricamente siempre va a ser más estable, segura y firme en comparación a una junta con cinta adhesiva. Igualmente, la junta atornillada en la brida va a prevenir que la antorcha se mueva libremente, brinde protección y soporte el peso de la antorcha de forma distribuida en cada perno, ya que ésta es relativamente pesada (aproximadamente 6 lb) y grande (alrededor de 15 cm de largo). Por lo tanto, se procedió a diseñar la manera de atornillar los bloques de grilón en la brida del robot.

Sin embargo, debido a la distribución de los agujeros roscados en el robot y al tamaño del bloque de la abrazadera de grilón, resultó imposible juntar directamente el bloque al robot, por lo que se diseñó una pequeña extensión de metal para acoplar la abrazadera a los agujeros roscados del robot. El diseño se lo realizó en un software CAD (Figura 3.3a), se adquirió

la materia prima, y se procedió con su elaboración y armado (Figura 3.3b). Para este componente, fue necesario adquirir un material que pueda ser soldado con facilidad, ya que se necesita dos pequeñas planchas planas y un tubo pequeño. El material elegido fue el acero, por su disponibilidad, precio y facilidad para soldarlo. El producto final se presenta en la Figura 3.4b.

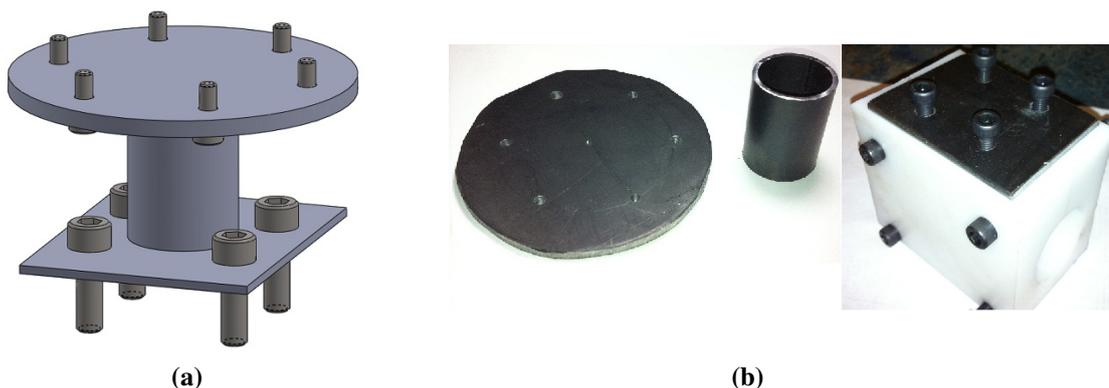


Figura 3.3. Diseño y construcción de la extensión para la brida del robot. **a)** Diseño en CAD. **b)** Fabricación.

Finalmente, se unieron todas las partes fabricadas dando forma al producto final. Este acople final (Figura 3.4c) tuvo resultados exitosos pues cumple con todos los requisitos necesarios, como sujeción, firmeza, peso liviano y estabilidad, además el robot se comporta de manera normal, y puede realizar movimientos sin ningún sobresfuerzo ni sobrecalentamiento en ningún componente.

Pese a los buenos resultados, surgió una alternativa adicional para que el robot no se sobrecargue por el peso de la antorcha y su cable, por lo que se fabricó un estante para que soporte el cable de la antorcha desde una determinada altura. Con esto se logró reducir enormemente la carga que genera el peso del cable sobre el robot. El estante se fabricó con un tubo reusado, soldado con un tornillo doblado en forma de U, y asegurado mediante abrazaderas pequeñas a una mesa de trabajo ubicada junto a la cámara de soldadura.

Con esta solución, todo el sistema de acople, robot y antorcha brinda una funcionalidad y adaptabilidad perfecta, y se cumplió con todas las exigencias propuestas.

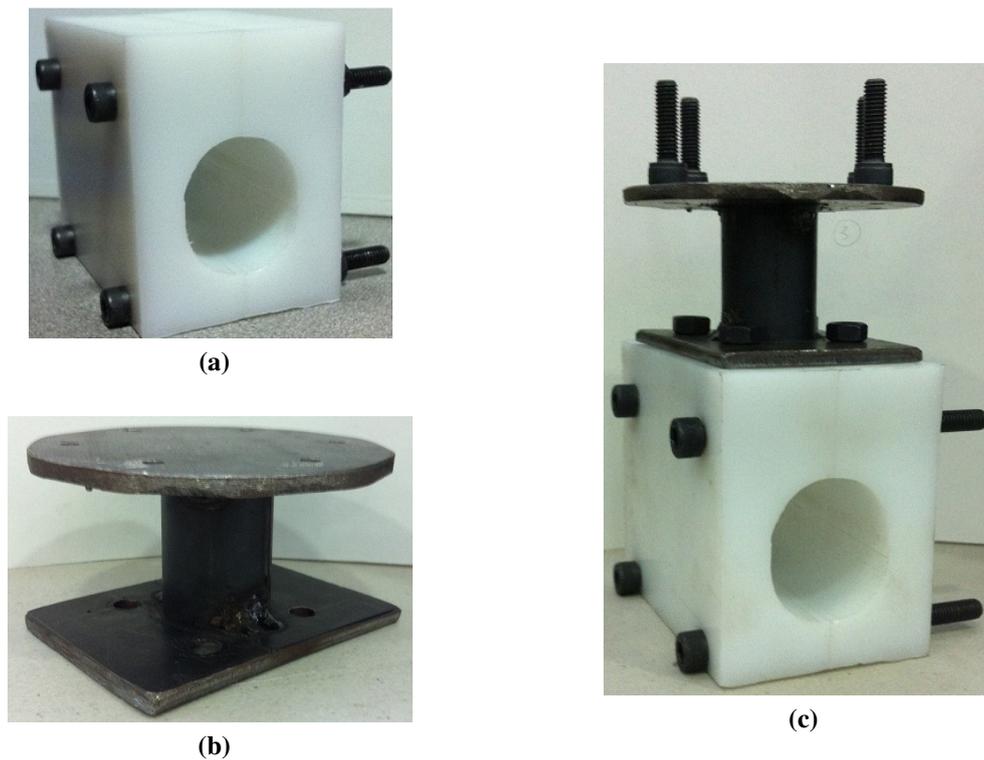


Figura 3.4. Productos finales del sistema de acople. **a)** Abrazadera. **b)** Extensión para la brida. **c)** Sistema de acople completo.

3.2. Adecuación del Espacio Físico

El Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco está conformado por varias máquinas y robots utilizados en tareas y actividades educativas que simulan una industria con procesos de manufactura automatizados (Figura 3.5). Entre estas máquinas y robots existen una fresadora CNC, un torno CNC, una banda alimentadora, una cabina de almacenaje de partes, un robot cartesiano, un robot SCARA, un robot articulado de cinco ejes, y los respectivos controladores y computadores para cada aparato. En total, existen 4 estaciones de trabajo en los cuales se ilustra un proceso robotizado de producción de piezas.

En el laboratorio se cuenta con un espacio pequeño destinado para el proceso de soldadura robótica. Inicialmente, este espacio de trabajo para soldadura constaba de una mesa, que tenía una pequeña protección de metal, y una base metálica fija en la mesa con varios agujeros roscados para sostener los materiales a trabajar (Figura 3.6a). Sin embargo, debido al tamaño del acople y la antorcha de la suelta, el espacio requerido para el trabajo del robot se amplió,



Figura 3.5. Laboratorio de Robótica y Manufactura de la Universidad San Francisco de Quito. Fuente [37].

en consecuencia, se plantearon cambios en el área de soldadura para mejorar las condiciones de trabajo tanto del robot como de los usuarios del laboratorio.

Se consideró la seguridad para los estudiantes y personal que se encuentren cerca del lugar, además de la seguridad y protección del robot, de las máquinas cercanas como el torno y la fresadora, y del mismo sistema automático. Para esto se compró una plancha galvanizada, se cortó y se le dio la forma adecuada para que funcione como una cortina, mostrada en la Figura 3.6b. El objetivo de esta cortina es retener las chispas y partículas incandescentes de material fundido, que salen disparadas en cualquier proceso de soldadura, para que no dañen los equipos, mangueras o cables del laboratorio, ni causen quemaduras a las personas que se encuentren dentro del laboratorio. Además, con esta protección se puede evitar parcialmente la luz intensa y rayos UV producidos por el arco eléctrico, que son muy dañinos para la vista humana.

El requerimiento de protección a los equipos cercanos fue cubierto por las cortinas de protección. Para la protección a usuarios y personas cercanas a la cámara de soldadura, la acción tomada fue la de conseguir equipo de protección personal (EPP), por lo que se solicitó overoles, visores y guantes al Taller Mecánico de la Universidad. El problema de la luz intensa del arco eléctrico fue atenuada parcialmente con la protección de las planchas galvanizadas en la cámara y con el uso de visores.

El proceso de soldadura MIG expulsa gases debido a las altas temperaturas y reacciones

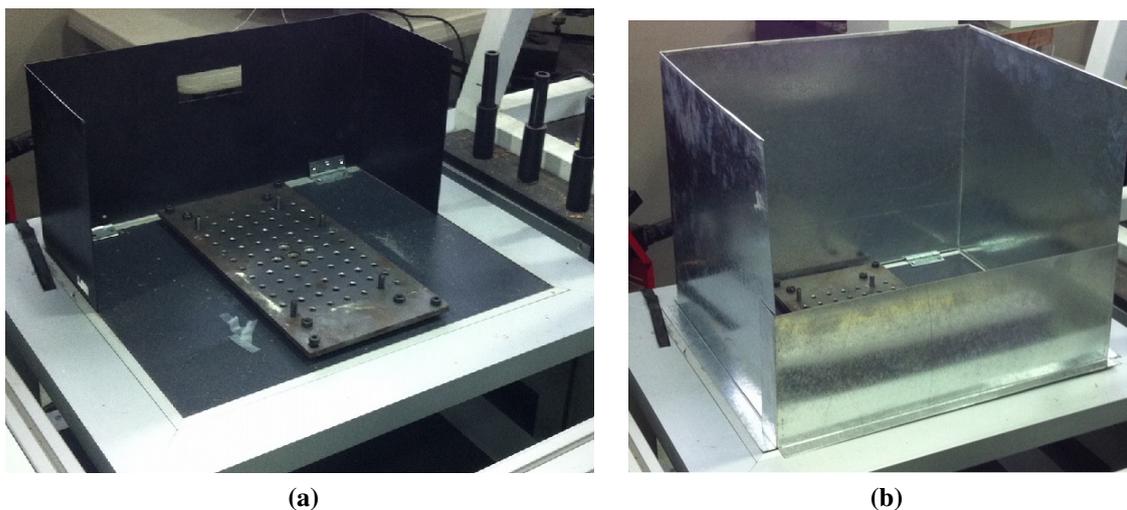


Figura 3.6. Protección para la cámara de soldadura. **a)** Sistema inicial. **b)** Sistema de protección mejorado.

químicas con el gas, sin embargo, la cantidad de gas despedido es relativamente baja en comparación a otros tipos de procesos de soldadura como SMAW. Por ende, el último problema por solucionar en la adecuación del espacio físico, fue la extracción y eliminación de gases producto de la soldadura. Este problema no se logró resolver en su totalidad, debido a que el espacio en el laboratorio es muy limitado, y la implementación de un sistema de extracción de gases es costosa y, sobretodo, muy complicada en un espacio reducido. La única solución al alcance, es mantener abiertas todas las ventanas para ventilar el laboratorio mientras se ejecutan las tareas de soldadura.

3.3. Panel de Control

Con el objeto de tener señalización, control e interacción entre el software, el controlador y la máquina de soldadura, se diseñó y elaboró una caja de control con un circuito electrónico de luces y relés para la funcionalidad del sistema completo del robot soldador.

El objetivo inicial de esta caja de control es contar con un circuito de control lógico que sirva de interconexión entre el usuario, la maquina soldadora y el controlador del robot. Como se analizó en las Secciones 2.2 y 2.4, el controlador del robot tiene entradas y salidas análogas y digitales de baja corriente y voltaje, mientras que la soldadora utiliza gran cantidad de co-

riente y voltaje. Por lo tanto, para poder interactuar estos dos equipos se requiere un circuito de control lógico mediante relés, para que sean activados por el controlador (baja corriente) y cierren contactos con capacidad de transportar alta corriente que utiliza la soldadora. Así mismo, mediante estos relés se puede implementar señales visuales y pulsadores para la interacción con los operadores. Además, este circuito de control, junto con el programa, va a simular el trabajo real de un robot soldador.

Se definieron los componentes de la caja de control: se decidió utilizar 3 luces piloto (verde, amarilla y roja) y 2 pulsadores (verde y rojo de emergencia). La idea del ciclo de funcionamiento es que cuando el robot se encuentre en la posición de listo para trabajar se encienda la luz verde, cuando esté efectuando un cordón de soldadura se encienda la luz amarilla, y cuando termine cada ciclo o exista alguna emergencia se encienda la luz roja. Asimismo, el usuario debe presionar el pulsador verde para iniciar un ciclo de trabajo, y el pulsador rojo de emergencia en casos de esa naturaleza.

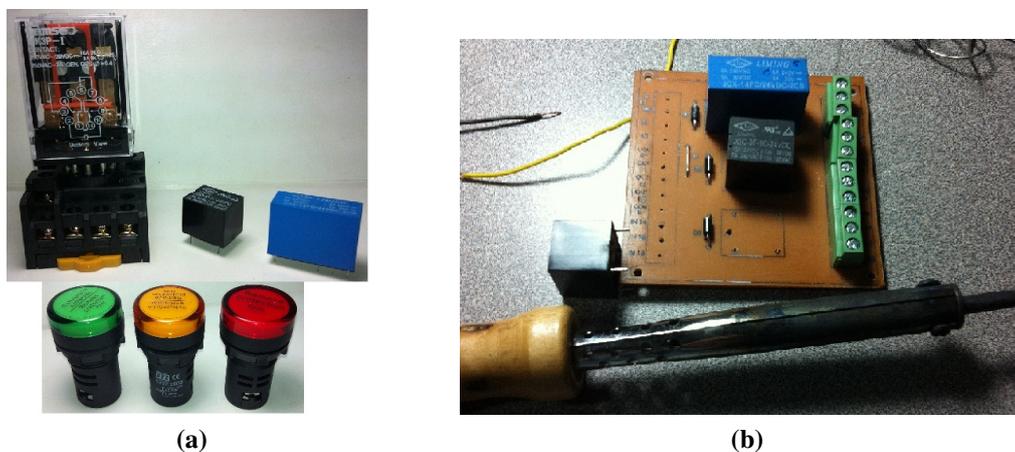


Figura 3.7. Construcción del panel de control. **a)** Relés y luces piloto usadas. **b)** Fabricación de la placa PCB.

Sin embargo, para que todo este ciclo funcione automáticamente, se necesita de relés que abran o cierren contactos. En el Apéndice E se muestra el circuito, con sus relés, luces, pulsadores, contactos, entradas y salidas digitales hacia el controlador, y se explica detenidamente el funcionamiento.

El circuito se realizó en una placa de cobre y baquelita, fue montado junto con pulsadores,

luces y cables en una caja de acrílico diseñada en CAD, y cortada con láser (Figura 3.7).

El resultado final fue una caja de control totalmente funcional y compatible con el controlador y la soldadora usada en el proyecto (Figura 3.8).



Figura 3.8. Producto final del panel de control

3.4. Programación del Robot

3.4.1. Explicación General del Programa

Antes de empezar a realizar las pruebas de soldadura con el robot, se escribió un programa computacional para completar el flujo de interacción del sistema: operador, caja de control, entradas de controlador, software de control, salidas de controlador, movimiento y tareas del robot.

Lo que se desea recrear en el proyecto es un robot industrial de soldadura y su funcionamiento genérico en cualquier fábrica. Por lo tanto, el programa va a realizar el siguiente ciclo:

- Llevar a una posición de “Listo” o “Stand By” al robot, en la cual el robot se mantiene hasta que el operador presiona el pulsador verde de “Iniciar”.
- Cuando el operador haya ubicado adecuadamente el material a ser soldado, se oprime el pulsador verde “Iniciar”, y el robot entonces se dirige a las posiciones programadas, realiza el cordón de soldadura, y regresa a su posición de “Stand By”.

- Se retira el material trabajado, y se coloca uno nuevo.
- El ciclo vuelve a empezar cuando el operador presiona nuevamente el botón verde.

3.4.2. Análisis y Cálculo de Posiciones

Primeramente, se realizó el modelo matemático del robot, explicado en las Secciones 2.1.2 y 2.1.3, mediante el software MatLab, y además se usaron dos toolboxes de licencia libre para MatLab llamados *Robotics Toolbox* de Peter Corke y *DAMA^{ROB} toolbox* de Marco Caputano y Dario Bellicoso, para comparar con los resultados propios obtenidos y para usar algunas funciones y animaciones.

Se escribieron tres funciones en MatLab que se aplican únicamente para el Scorbot, y que calculan la cinemática directa, inversa y el jacobiano.

Con este modelo se obtuvieron las mejores posiciones del robot en las que el efector final sea ubicado de la forma presentada en la Figura 3.9a durante todo el proceso de soldadura.

Por lo tanto, el problema necesita ser resuelto mediante el Modelo Cinemático Inverso, en el cual se obtienen ciertas configuraciones del robot para una posición y orientación deseadas del efector final. Para esto, se programaron y usaron todas las ecuaciones descritas en la Sección 2.1.2.

Sin embargo, a dichas ecuaciones se tuvo que agregar la orientación y posición del acople de pistola de soldadura cuando está montada en el robot, ya que solo se tenían calculadas las ecuaciones y matrices hasta la brida de montaje para efector final. Estas nuevas posiciones son descritas en la matriz de transformación de la Ecuación 3.1 que fue obtenida geométricamente mediante las dimensiones de la Figura 3.9b.

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} 0 & \cos \delta & -\sin \delta & -269.95 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta & 213 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde $\delta = \arctan\left(\frac{83.4}{128}\right) = 0.5775$ rad, el cual es el ángulo de curvatura de la antorcha.

Se realizaron mediciones y se definió que la mitad de la plancha con agujeros de la cámara de

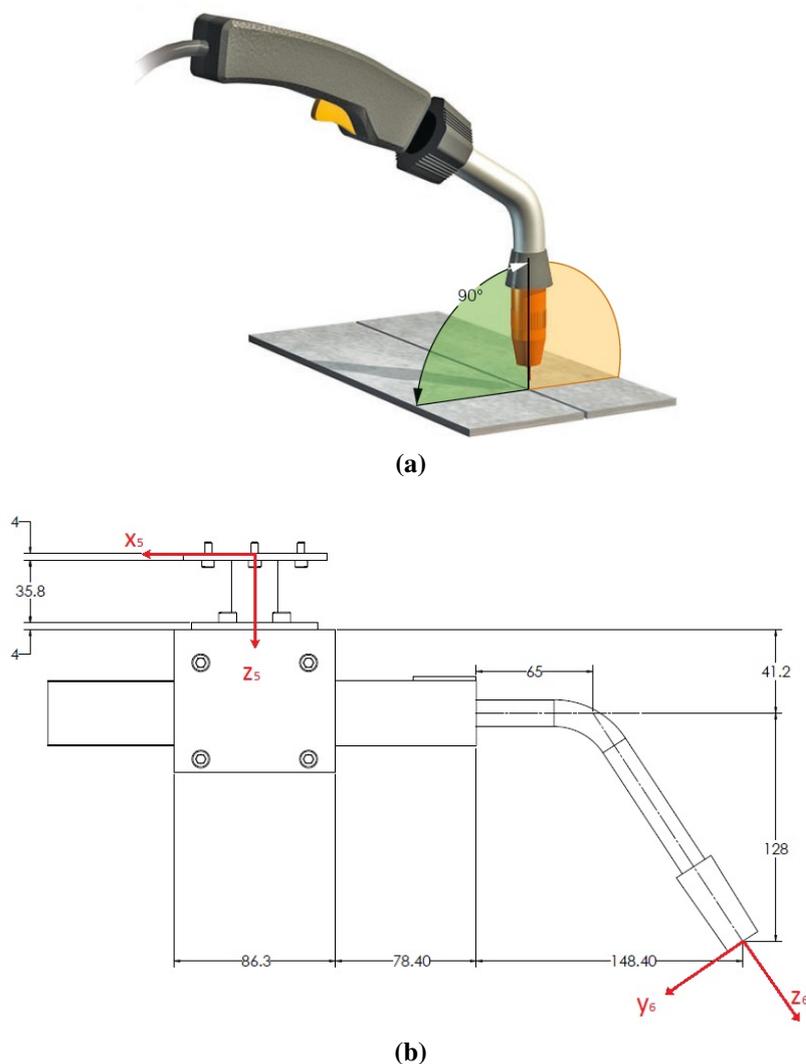


Figura 3.9. Esquemas del efector final una vez ubicado en el robot. **a)** Posición deseada del efector final para realizar la soldadura. Fuente [15]. **b)** Medidas y ejes cartesianos del efector final para el modelamiento.

soldadura se encuentra a 50 cm en dirección perpendicular de la base deslizante del robot y a 5 mm por abajo de la base del robot en donde se encuentra el origen del marco de referencia principal O_0 .

Debido a que se tiene previsto realizar cordones de soldadura de 115 mm de largo en una placa de acero de 4 mm de espesor y de 28 cm \times 15 cm de superficie, se buscaron las configuraciones del robot en las que el punto medio del cordón ha realizarse coincida con el punto medio de la plancha de agujeros roscados de la cámara de soldadura. Esto se traduce a que se requiere cumplir la siguiente matriz de transformación.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 43 \\ 0 & -1 & 0 & 500 \\ 0 & 0 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Esto implica que el efector final (sistema de referencia o_6) se encuentre en la posición $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 43 \\ 500 \\ -5 \end{bmatrix}$ y esté orientado en la dirección $\text{dir} \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix} = \text{dir} \begin{bmatrix} x_0 \\ -y_0 \\ -z_0 \end{bmatrix}$.

Después de realizar la simulación en MatLab, se llegó al vector de resultados de la Ecuación 3.3 que satisfacen la matriz de la Ecuación 3.2, en configuración codo arriba.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 90 \\ -40.6828 \\ 83.6264 \\ 170.1431 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Se puede apreciar en las animaciones de los toolboxes de las Figuras 3.10a y 3.10b, y en la foto real del robot (Figura 3.10c), que con los resultados anteriores se llega a la posición y orientación deseadas.

Así entonces, desde esta posición central se calcularon las de inicio y fin del cordón de soldadura. Sin embargo, estos puntos no pueden tener la misma orientación que la del punto central, ya que es mecánica y matemáticamente imposible debido a la falta de un tercer grado de libertad en la muñeca del robot.

Debido a esta razón, se calcularon dos tipos de trayectorias. El primer tipo es manteniendo el efector final perpendicular a la superficie; y el segundo fue variando mínimamente el ángulo de acción del efector final, o sea, inclinando la pistola de soldadura. Mediante un cálculo numérico iterativo en MatLab se encontraron las matrices que satisfacen dichos tipos de trayectorias.

Las matrices de transformación siguientes indican las posiciones inicial y final del efector final para realizar el cordón de soldadura en línea recta para los dos tipos de trayectorias deseadas.

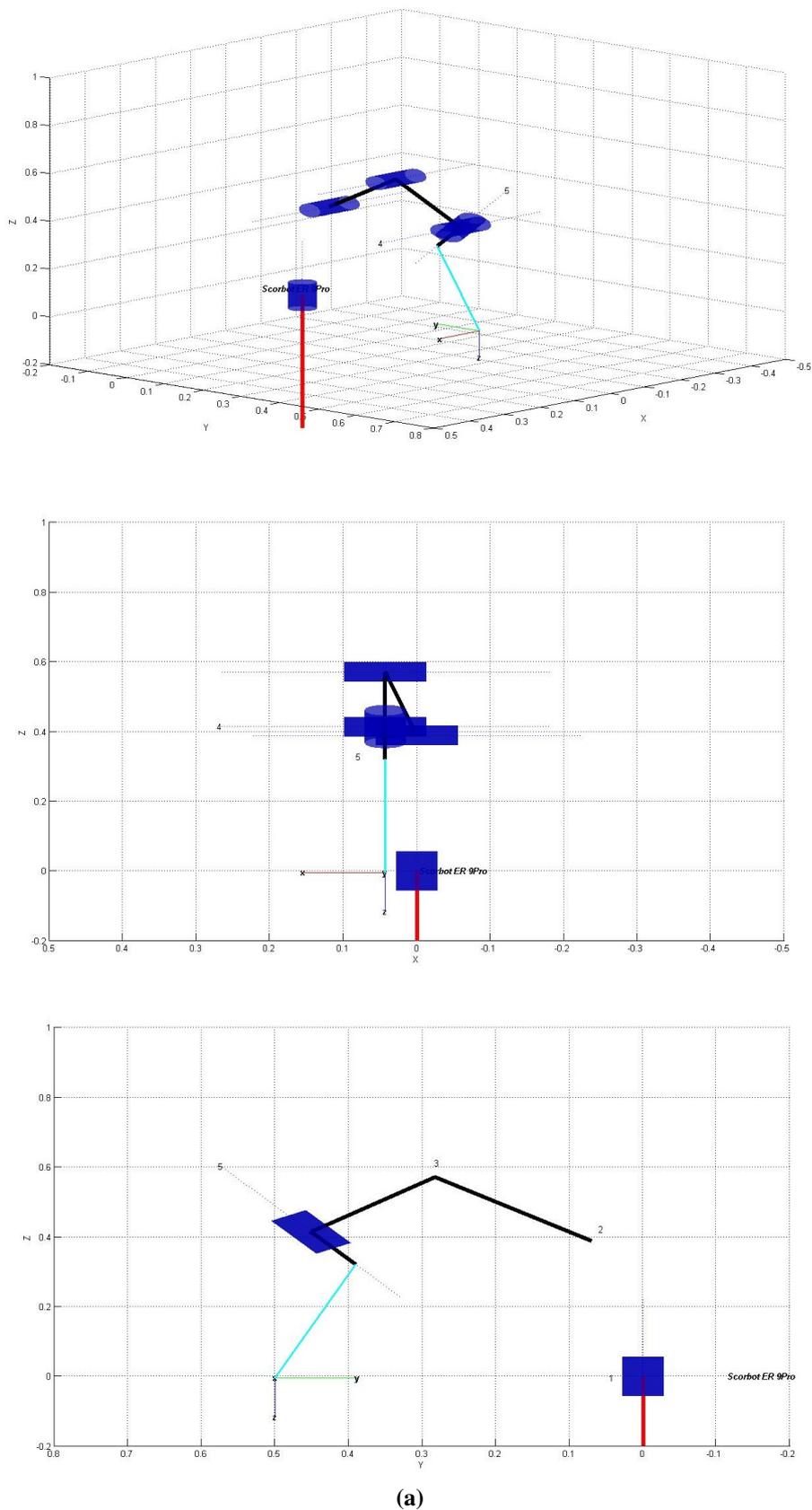
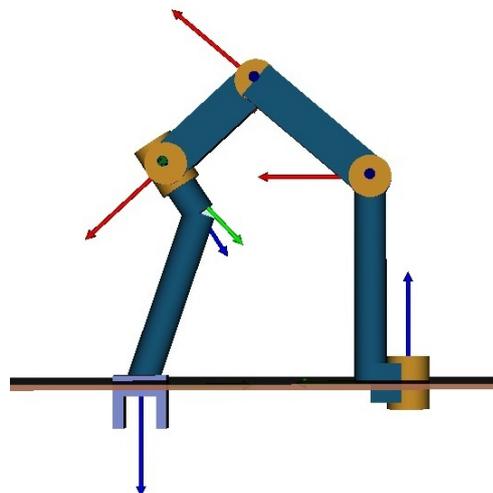
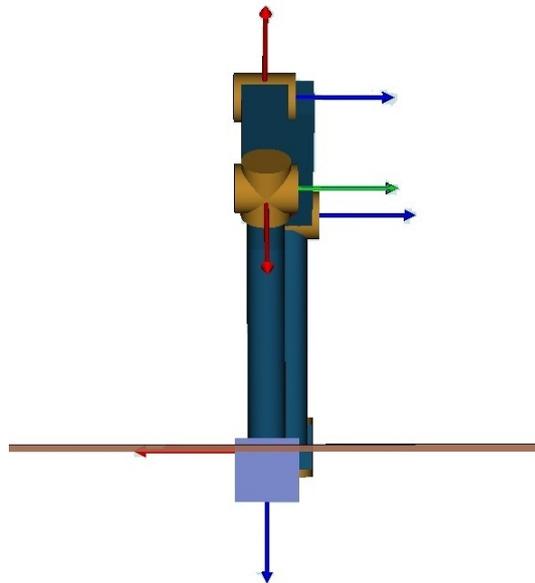
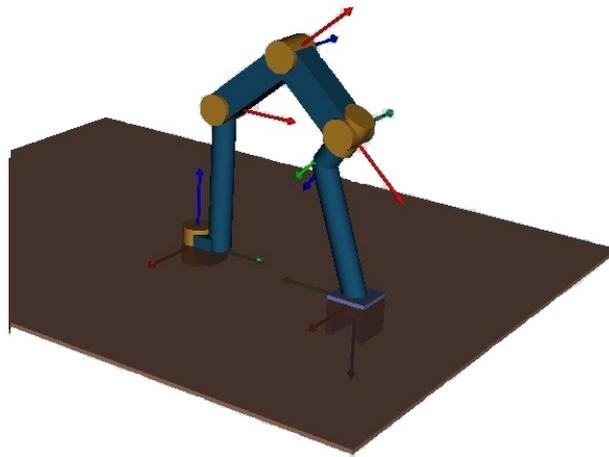


Figura 3.10. Robot en posición de soldadura con la configuración calculada. **a)** Animación mediante *Robotics Toolbox*. (continúa)



(b)

Figura 3.10. (continuación) Robot en posición de soldadura con la configuración calculada.
b) Animación mediante $DAMA^{ROB}$. (continúa)



(c)

Figura 3.10. (continuación) Robot en posición de soldadura con la configuración calculada.
c) Foto del robot en la configuración calculada previamente.

$$\text{Tipo 1} \left\{ \begin{array}{l} H_i = \begin{bmatrix} 0.9911 & -0.1331 & 0 & 110.5 \\ -0.1331 & -0.9911 & 0 & 500 \\ 0 & 0 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H_f = \begin{bmatrix} 0.9909 & 0.1344 & 0 & -24.5 \\ 0.1344 & -0.9909 & 0 & 500 \\ 0 & 0 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\text{Tipo 2} \left\{ \begin{array}{l} H_i = \begin{bmatrix} 0.9714 & 0 & -0.2373 & 110.5 \\ 0 & -1 & 0 & 500 \\ -0.2373 & 0 & -0.9714 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H_f = \begin{bmatrix} 0.9658 & 0 & 0.2592 & -24.5 \\ 0 & -1 & 0 & 500 \\ 0.2592 & 0 & -0.9658 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Como se puede derivar de las Ecuaciones 3.4 y 3.5, el cambio de posición se da solamente a lo largo del eje x , que es igual a 135 mm; esto es debido a que el cordón va a tener una longitud de 115 mm y se deja 10 mm a cada extremo para que el robot parta de la posición inicial y adquiera la velocidad deseada para empezar el arco eléctrico, y de igual manera, desactive el arco y después reduzca su velocidad para llegar a la posición final.

Por lo tanto, se usaron estos dos pares de posiciones y se realizaron los análisis de trayectorias y velocidades para determinar cual es la mejor. Este estudio se muestra en la siguiente sección.

3.4.3. Generación de Trayectorias y Análisis de Velocidades

Como se explicó, se realizaron simulaciones de dos tipos de trayectorias. Para esto se programó para que el efector final siga una trayectoria de línea recta entre los dos puntos necesarios, obtenidos mediante las matrices de las Ecuaciones 3.4 y 3.5.

Esta simulación fue realizada para un tiempo de trabajo de 45 segundos, ya que la distancia entre los puntos de inicio y fin de movimiento es de 135 mm y se simuló para una velocidad de avance de 3 mm/s.

Primeramente, se calculó la trayectoria rectilínea por la que se va a mover el efector final. Esta trayectoria se muestra en la Figura 3.11. Como se puede apreciar, los dos tipos de trayectorias cumplen los requerimientos de mover el efector final en el eje x y mantener constante los ejes y y z , y prácticamente son iguales.

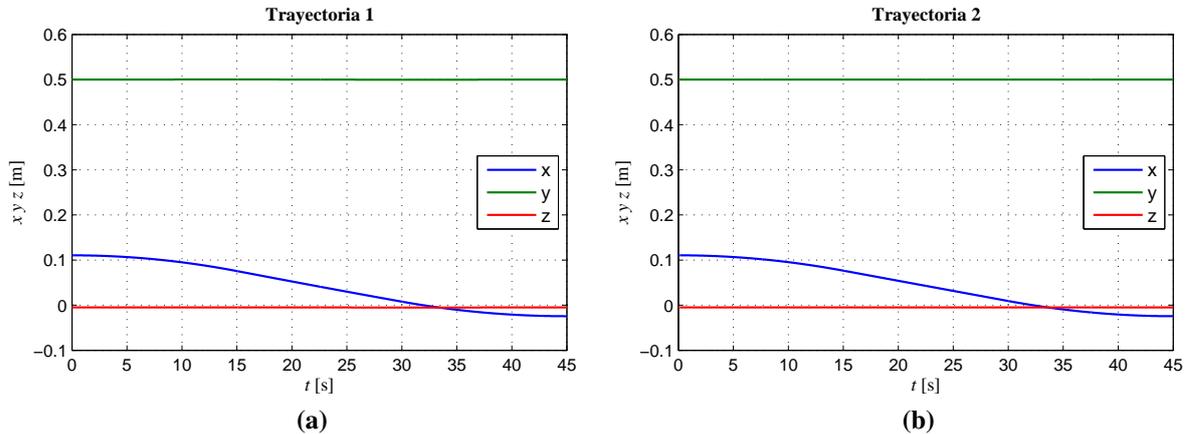


Figura 3.11. Representación de las trayectorias en coordenadas cartesianas en función del tiempo. **a)** Trayectoria para las posiciones tipo 1. **b)** Trayectoria para las posiciones tipo 2.

Seguidamente, se usó la cinemática inversa para obtener las configuraciones de las articulaciones necesarias que muevan el efector final a lo largo de las trayectorias calculadas. La Figura 3.12 muestra el movimiento de cada articulación que satisface la trayectoria. Se distingue que en la trayectoria 1 existe mucho más movimiento de todas las articulaciones en comparación con la trayectoria 2.

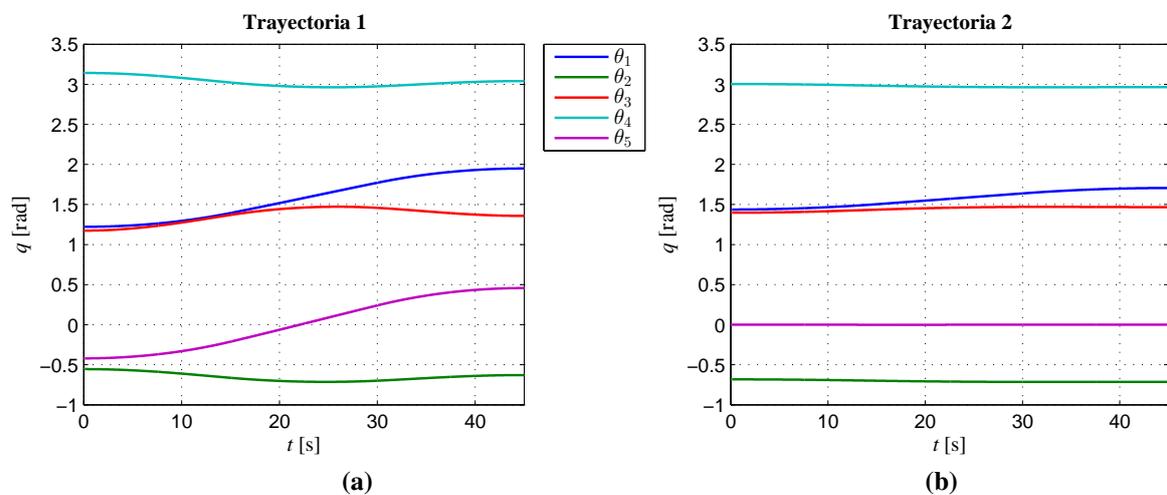


Figura 3.12. Representación de trayectorias en coordenadas de articulaciones en función del tiempo. **a)** Trayectoria para las posiciones tipo 1. **b)** Trayectoria para las posiciones tipo 2.

A continuación se comprobó si las coordenadas de articulaciones obtenidas siguen la trayectoria especificada anteriormente. Para esto, se calculó la cinemática directa para cada configuración, y se graficó las trayectorias cartesianas en los planos xy y xz para facilidad de análisis y a una misma escala en la Figura 3.13.

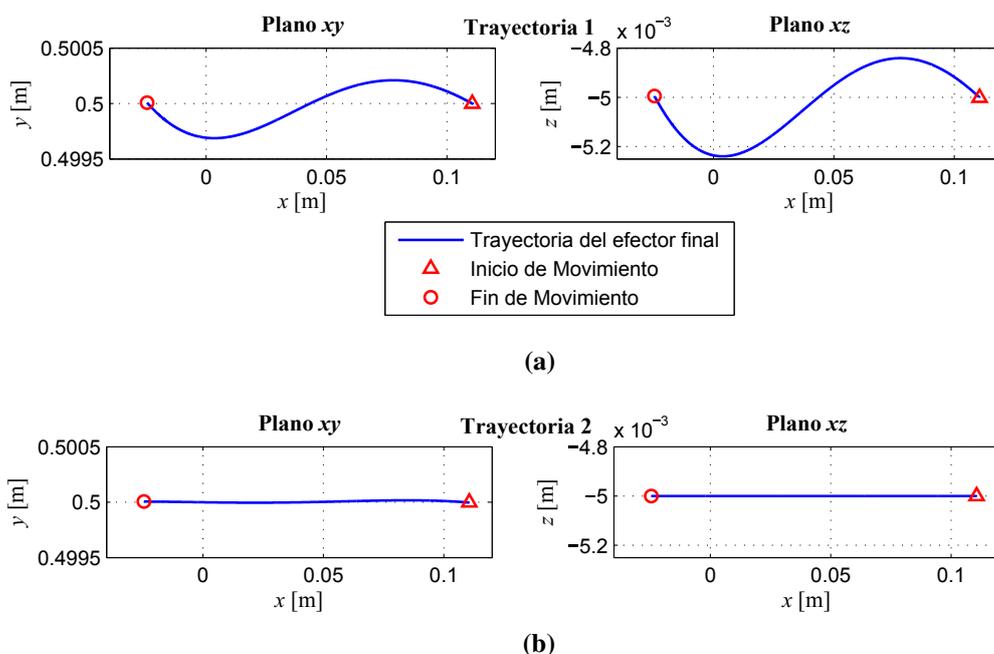


Figura 3.13. Comprobación de trayectorias en coordenadas cartesianas vistas desde planos xy y xz . **a)** Trayectoria para las posiciones tipo 1. **b)** Trayectoria para las posiciones tipo 2.

Se puede ver que la trayectoria 1 muestra variaciones tanto en el eje y como en el eje z , con cambios máximos de hasta 0.313 mm en el eje y , y 0.239 mm en el eje z . Por otro lado, la trayectoria 2 también presenta variaciones pero éstas son muy pequeñas, con máximos de 0.017 mm en eje y , y 9.46×10^{-5} mm en el eje z .

Finalmente, se realizaron los cálculos de velocidades de articulaciones para ambos casos, mediante la matriz jacobiana y las diferentes posiciones obtenidas. La Figura 3.14 muestra los resultados obtenidos. Se aprecia que las velocidades en la trayectoria 1 son mucho mayores que en la trayectoria 2. Se tiene una velocidad máxima de 0.0307 rad/s en la trayectoria 1, comparada con el máximo de 0.009 rad/s en la trayectoria 2.

Después de estos análisis, se concluyó que la trayectoria 2 es la mejor para llevar a cabo el proceso de soldadura, ya que presenta los resultados más favorables, tales como la trayectoria

más exacta, el movimiento de articulaciones es menor y más suave, y las velocidades de las articulaciones son menores. Por lo tanto, se tomaron como posición inicial y final de movimiento a las de la Ecuación 3.5, que en coordenadas de articulaciones son las siguientes.

$$q_i = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4374 \\ -0.6825 \\ 1.3975 \\ 3.0041 \\ 0.0001 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad q_f = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.7058 \\ -0.7133 \\ 1.4670 \\ 2.9654 \\ 0.0002 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

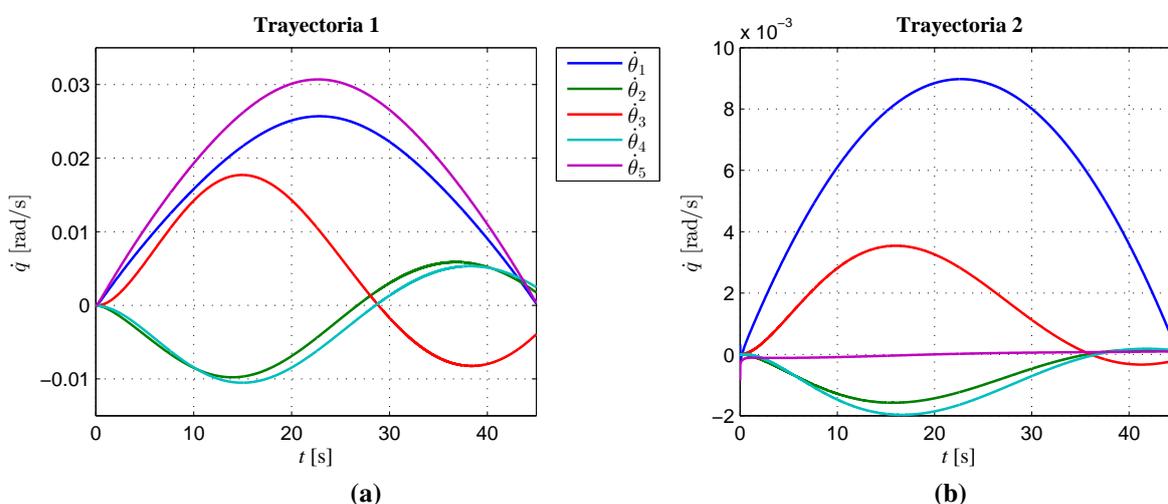


Figura 3.14. Velocidades para cada articulación en función del tiempo durante la trayectoria. **a)** Trayectoria para las posiciones tipo 1. **b)** Trayectoria para las posiciones tipo 2.

Aunque se desarrolló la trayectoria del robot en MatLab, para el software Scorbace solamente se pueden especificar la posición de inicio, de final y el tipo de trayectoria (lineal, circular o la más rápida), pero no la trayectoria propiamente dicha. Por lo tanto, se programó al robot para que vaya desde la posición q_i a q_f (Ecuación 3.6) en una trayectoria lineal y se obtuvieron los datos de coordenadas de articulaciones reales calculados por el controlador del robot.

La Figura 3.15 muestra los datos de la trayectoria real que el controlador calculó entre las posiciones impuestas. Estos datos se convirtieron a radianes y se grafican con la misma escala que la Figura 3.12b que fue la escogida. Como se puede notar, las posiciones de las articulaciones son iguales a las calculadas en MatLab, por lo tanto se concluye que los análisis y resultados teóricos presentados son válidos y realmente van a suceder cuando el robot este trabajando.

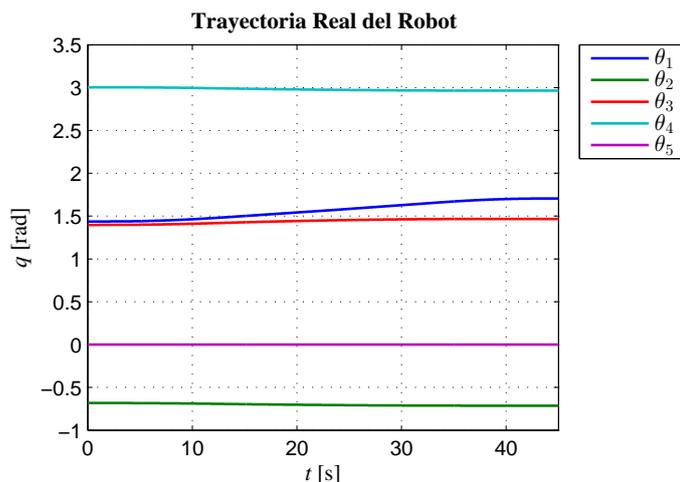


Figura 3.15. Trayectoria real del robot en coordenadas de articulaciones

3.4.4. Programación en Scorbace y Visual Basic Script

Para el presente proyecto, se desarrolló un programa mediante el cual se hacen 19 cordones rectos en una plancha de acero de 4 mm de espesor y 28 cm \times 15 cm de superficie, fijada con 4 pernos en la placa de la cámara de soldadura. Las posiciones fueron seleccionadas en las secciones anteriores, y en cada versión se trató de mejorar y optimizar el tiempo de programación y de trabajo. Los comentarios para las diferentes versiones del programa se presentan en las siguientes subsecciones.

Igualmente, en el Apéndice F, se muestra todo el programa, posiciones guardadas e imágenes del software Scorbace, y una explicación línea por línea del funcionamiento. A continuación se explica, en resumen, toda la programación realizada:

- Primeramente, se debe activar el contactor del Laboratorio de Robótica, que enciende todo el sistema. Luego encender la computadora WS2 que se encuentra en el laboratorio, que es la que controla al robot Scorbace ER 9Pro. Seguidamente, cargar el programa “Suelda.ws” en el software Scorbace, y conectar la caja de control a las entradas y salidas del controlador y a la alimentación de energía eléctrica de 110 VAC.
- Ahora, el robot necesita ser llevado a su posición de HOME (botón ) , para inicializar encoders y sensores para mantener el control adecuado del robot. Esto se realiza solamente la primera vez, después de encender el sistema. Las actividades, desde la carga del software en la computadora hasta inicializar el robot, son realizadas manualmente por el operador.
- Después de ser inicializado el sistema, se procede al montaje de la antorcha en el

robot; ésta no puede quedar fija mientras el sistema este apagado, debido a su peso relativamente elevado y a que el robot no está fabricado exclusivamente para soldar. Para empezar el montaje, se ejecuta la subrutina “Colocar/Retirar”, que permite que el robot se mueva hacia una posición estable y de fácil acceso para colocar la antorcha, luego se debe fijar el acople con los pernos (Figura 3.16).

- Una vez inicializado y listo el sistema robot-controlador-antorcha, se inicia el programa mediante el botón “Run Single Cycle”  desde la línea 1. A partir de este punto, el programa ya está ejecutándose.
- Todos los pasos anteriores se realizan solamente una vez, al iniciar el trabajo del robot. Los siguientes pasos son parte del ciclo de trabajo del robot, por lo tanto, al terminar cada ciclo, se debe iniciar nuevamente desde este punto.
- El robot se mueve a la posición de espera o “Stand By”.
- Se enciende la luz verde de “Listo” de la caja de control, y se espera que el operador presione el pulsador verde.
- Al pulsar el botón verde, el robot empieza a trabajar. Se mueve a la posición establecida para trabajar en la cámara de soldadura, y luego se mueve a la posición de inicio del cordón a ser trabajado.
- Cuando llega a la posición inicial donde se va a realizar el cordón, se ordena al robot que se mueva linealmente y a la velocidad de avance establecida hacia la posición final del cordón, y que encienda y apague el arco eléctrico de la soldadura en determinados momentos.
- Al llegar a la posición final, el robot ya ha terminado de ejecutar el cordón de soldadura, por lo que se levanta el brazo robótico, y se mueve a la posición de espera.
- Si el ciclo es el número 19, el programa finaliza ya que la pieza de trabajo en la que se basa el programa tiene espacio para 19 cordones. Si el ciclo es menor a 19, empieza nuevamente esperando la acción del operador.

3.4.5. Versión 1

Al iniciar las primeras pruebas del robot soldador, el programa anterior tenía únicamente dos posiciones guardadas, la de inicio y la de final del movimiento, para un solo cordón de soldadura. Así entonces, cada vez que se ejecutaba un cordón y se acababa un ciclo, se tenía que parar el programa y colocar manualmente la placa de pruebas en la posición adecuada para realizar el siguiente cordón con las mismas posiciones guardadas del cordón



Figura 3.16. Montaje/Desmontaje de la antorcha

anterior. Es decir, el programa era muy básico y no tenía casi ninguna automatización. Con estas limitaciones se realizaron las primeras pruebas y se llenó la placa #1 con cordones (Figura 3.17a).

3.4.6. Versión 2

Para mejorar el programa y el trabajo, se fijó la placa de pruebas mediante pernos con la plancha de la cámara de soldadura. Seguidamente, se procedió a seleccionar y guardar posiciones para cada cordón trabajado. En otras palabras, a partir de las dos posiciones calculadas previamente, se usó el Teach Pendant para mover el robot a lo largo del eje y escoger otro par de posiciones, se realizaba un cordón, y se volvía a elegir otras posiciones para realizar otro cordón. Este procedimiento tomaba mucho tiempo y era necesaria la programación y almacenamiento de alrededor de 35 posiciones, por lo que se buscó alternativas nuevas de optimización.

3.4.7. Versión 3

Para esta versión, se bosquejó un cuadrilátero de trabajo en la placa de prueba, y se anotaron las coordenadas del robot de las 4 esquinas del rectángulo trabajado. Con los datos de las coordenadas, se procedió a interpolar las demás posiciones interiores para llegar a un total

de 19 cordones por placa de trabajo. Este método resultó efectivo, puesto que se optimizó el tiempo y la interpolación de posiciones dio buenos resultados. Sin embargo, como se tenían que guardar las coordenadas para cada posición usada, implicó que al final existan 35 posiciones en el programa, y por esta razón se trabajó una vez más en la optimización a fin de evitar guardar tantos datos. Además, los cordones no resultaron rectos (ver Figura 3.17c) por lo que se pensó en una nueva forma de conseguir posiciones buenas.

3.4.8. Versión 4

En esta versión, se utilizó el mismo procedimiento del cuadrilátero pero con la programación en coordenadas relativas. Para esto, se programaron las posiciones para obtener una separación aproximada de 1 cm entre cada cordón, y por lo tanto solo se guardaron 4 posiciones: la posición inicial y final del primer cordón, y las 2 posiciones incrementales de inicio y fin de cada cordón subsiguiente.

Adicionalmente, se realizó una programación del tiempo de trabajo de encendido de la soldadura, de la velocidad de avance del robot y de la longitud deseada del cordón. Para esto se aprovechó la compatibilidad de Scorbace con Visual Basic Script, y se creó un script VBS. Así entonces, para cada ciclo de trabajo, el usuario es capaz de especificar la velocidad de avance y la longitud del cordón. Esta versión fue la escogida como versión final, y será utilizada para todos los trabajos debido a la funcionalidad del programa.

3.4.9. Versión 5

Como un intento para mejorar la automatización del sistema, se pensó en añadir un sensor análogo de corriente, para verificar la corriente de soldadura y hacer que el robot se mueva hacia arriba o abajo en el caso de que la corriente sea muy alta o baja respectivamente, lo que significa tratar de llegar a un Control Adaptivo (Sección 1.5.3.2).

Debido al alto costo y poca disponibilidad de un sensor de corriente DC, primeramente se realizó una simulación del sensor con un potenciómetro conectado a una entrada análoga del controlador, y se logró que el robot se mueva hacia arriba si el potenciómetro marca un

voltaje superior a un límite establecido, mantenerse constante marca un voltaje dentro de un rango definido, o que el robot se mueva hacia abajo si el potenciómetro marca un voltaje menor al límite inferior determinado.

Sin embargo, con el nivel de programación y control que ofrece el software Scorbace, el robot debe llegar a una posición establecida antes de moverse a una nueva, por lo que se desarrolló un programa para que el robot vaya desde el inicio del cordón hasta el final dividiendo la trayectoria en posiciones de 1 mm entre cada una. Así entonces, cuando el robot se movía un 1 mm horizontalmente, medía el valor de la entrada análoga, y se movía a la siguiente posición, que dependiendo el valor de la entrada análoga, era 1 mm a la izquierda y hacia arriba, hacia abajo, o a una altura constante.

Debido a este funcionamiento, en el que el robot tenía que iniciar y acabar movimientos de 1 mm de separación, se producían vibraciones que en muchos casos resultaron muy considerables. Por lo tanto, se descartó el uso del control de corriente ya que podía dañar al robot, sus componentes, y aún más podía ser peligroso para los usuarios.

3.5. Verificación y Pruebas del Sistema

Para obtener un óptimo resultado final de buena calidad, fue necesario realizar varias y diferentes pruebas de funcionamiento del robot. Como se explicó en la sección anterior, se efectuaron pruebas de cordones sobre cuatro planchas de acero de 28 cm × 15 cm de superficie y 4 mm de espesor. En las siguientes subsecciones se detalla el cordón y tipo de prueba efectuada.

El flujo de gas escogido fue de 25 ft³/h (25 cfh) como se explicó en la Sección 2.2, y la velocidad de salida del alambre se fijó en función del amperaje requerido, aunque en las pruebas se mantuvo un amperaje constante de 92 A, con el potenciómetro de alimentación de electrodo cerca del nivel 3, que corresponde a 4.5 m/min de alimentación de electrodo.

3.5.1. Placa de Pruebas 1

Para iniciar con las pruebas en el robot, se utilizó el programa en su primera versión para toda la placa. La placa no estuvo sujeta a ningún tipo de perno, solo estuvo apoyada en la cámara de soldadura. Asimismo, cada vez que se realizaba un cordón, se debía mover la placa manualmente y colocarla en el sitio adecuado para que el robot efectúe el cordón en la siguiente posición. En total se realizaron 19 cordones sobre esta placa. La figura 3.17a en la página 85 y la Tabla 3.2 muestran los cordones y las variables utilizadas.

Tabla 3.2. Variables de soldadura usadas en la Placa 1

Cordón	Nivel Voltaje	Velocidad Avance	Resultado/Problema
1	5	-	Primera Prueba. Muy Rápido
2	5	-	Cordón malo. Muy Rápido
3	5	10	Cordón malo
4	5	10	Cordón muy malo
5	5	8	Mejó el cordón
6	5	8	Arco estable
7	5	7	Buen Cordón
8	5	6	Alta salida de alambre
9	5	6	Arco inestable
10	5	6	Alambre se atascó
11	5	6	Buen cordón
12	5	6	Alambre se atascó
13	5	5	Buen cordón
14	5	-	Alambre se atascó
15	5	-	Alambre se atascó
16	5	-	Alambre se atascó
17	5	5	Arco inestable
18	5	5	Problemas con salida de alambre
19	5	5	Alambre se atascó
20	5	5	Arco inestable
21	5	5	Arco inestable
22	5	5	Cordón regular
23	5	5	Cordón regular
24	5	5	Arco inestable
25	6	5	Cordón excelente

Los resultados visibles en esta placa no fueron muy satisfactorios ya que la placa se curvó de manera significativa debido a los esfuerzos residuales causados por la cantidad de transferencia de calor y porque no estaba sujeta a nada. Igualmente, los cordones resultaron de mala

calidad, debido a que se tuvo un arco inestable en la ejecución de varios cordones, por lo que los cordones no son regulares y presentan varios saltos. Como eran las primeras pruebas, se tenía que experimentar con todas las variables. El último cordón de la placa resultó muy bueno, regular y sin saltos ni aglomeración de material.

3.5.2. Placa de Pruebas 2

Para esta placa, se mejoró el programa como se explicó en la Sección 3.4.6, y se la sujetó mediante pernos y tuercas a la base de la cámara de soldadura. Los resultados visibles fueron mejorando, pero aún existieron fallas y variaciones.

Tabla 3.3. Variables de soldadura usadas en la Placa 2

Cordón	Nivel Voltaje	Velocidad Avance	Resultado/Problema
1	5	6	Arco inestable
2	5	6	Arco inestable
3	6	6	Problemas con salida de alambre
4	5	6	Problemas con salida de alambre
5	5	6	Arco inestable
6	5	6	Arco inestable
7	6	5	Se soldó dos veces
8	5	6	Problemas con salida de alambre
9	5	6	Cordón muy alto y grueso
10	6	5	Cordón muy alto y grueso
11	6	5	Cordón muy alto y grueso
12	6	5	Arco inestable
13	6	5	Arco inestable
14	6	5	Arco inestable
15	6	5	Cordón regular
16	7	5	Mucho voltaje
17	5	6	Problemas con salida de alambre
18	5	6	Problemas con salida de alambre
19	6	6	Problemas con salida de alambre
20	6	-	Cordón curvilíneo. Buena calidad

Como existía un espacio vacío para trabajar en la parte final de la placa, se realizó un solo experimento de cordones de soldadura curvilíneos. Estos cordones resultaron de buena calidad a pesar de las restricciones del robot en cuanto a sus movimientos. La figura 3.17b en la página 85 y la Tabla 3.3 muestran las variables usadas en la placa #2.

3.5.3. Placa de Pruebas 3

En este caso, ya se tenía un programa con un nivel de automatización medio. En esta prueba, se procedió a fijar igualmente la nueva placa, y se efectuaron los cordones de soldadura. Los resultados obtenidos, mostrados en la figura 3.17c en la página 86 con las variables de la Tabla 3.4, fueron muy buenos visiblemente. Se pueden apreciar cordones muy regulares tanto en grosor como altura y sin saltos de material.

Tabla 3.4. Variables de soldadura usadas en la Placa 3

Cordón	Nivel Voltaje	Velocidad Avance	Resultado/Problema
1	6	5	Cordón excelente
2	6	5	Cordón excelente
3	6	5	Cordón excelente
4	6	5	Cordón excelente
5	6	5	Cordón excelente
6	6	5	Cordón muy bueno
7	6	5	Cordón muy bueno
8	6	5	Cordón muy bueno
9	6	5	Problemas con salida de alambre
10	6	4	Problemas con salida de alambre
11	6	4	Cordón muy bueno
12	6	4	Cordón excelente
13	6	4	Cordón excelente
14	6	4	Cordón excelente
15	6	4	Cordón excelente
16	6	4	Problemas con salida de alambre
17	6	4	Problemas con salida de alambre
18	6	4	Cordón muy alto
19	6	4	Cordón muy alto y grueso

3.5.4. Placa de Pruebas 4

Debido al gran nivel de programación que se llegó a desarrollar, con esta placa de pruebas se pudo cumplir uno de los objetivos de este proyecto, que era demostrar que con un brazo robótico se pueden lograr productos finales de características constantes, que en este caso son los cordones de soldadura.

En esta placa, se realizaron los 19 cordones de soldadura sin variar ningún dato, es decir, a una misma velocidad de avance, longitud, flujo de gas de protección, velocidad de salida de

alambre y voltaje. Como se puede verificar en la figura 3.17d en la página 86, la mayoría de los cordones presentan características similares. A pesar de que existen algunos cordones con errores, estos no sucedieron debido a la aplicación robotizada, sino que fueron problemas en la salida de alambre ya que el rollo de éste se encontraba enredado en algunas partes, y hubiesen sucedido igualmente si el soldador era humano.

En la Tabla 3.5 se muestran las variables usadas en la placa, y su imagen se muestra en la figura 3.17d en la página 86.

Tabla 3.5. Variables de soldadura usadas en la Placa 4

Cordón	Nivel Voltaje	Velocidad Avance	Resultado/Problema
1	6	3	Problemas con salida de alambre
2	6	3	Cordón excelente
3	6	3	Problemas con salida de alambre
4	6	3	Cordón muy bueno
5	6	3	Cordón excelente
6	6	3	Cordón muy bueno
7	6	3	Cordón excelente
8	6	3	Cordón excelente
9	6	3	Cordón excelente
10	6	3	Problemas con salida de alambre
11	6	3	Cordón muy bueno
12	6	3	Cordón excelente
13	6	3	Cordón excelente
14	6	3	Cordón excelente
15	6	3	Cordón excelente
16	6	3	Cordón muy bueno
17	6	3	Cordón excelente
18	6	3	Cordón excelente
19	6	3	Cordón excelente



(a)



(b)

Figura 3.17. Placas de pruebas de cordones de soldadura realizados por el robot. **a)** Placa No. 1. **b)** Placa No. 2. (*continúa*)



(c)



(d)

Figura 3.17. (continuación) Placas de pruebas de cordones de soldadura realizados por el robot. **c)** Placa No. 3. **d)** Placa No. 4.

3.6. Comparación entre Soldadura Manual y Robótica

Después de haber realizado las pruebas de soldadura robotizada, se obtuvieron buenos resultados tanto en la calidad de cordones como en la productividad (tiempo de trabajo, tiempo de preparación de materiales, tiempo de preparación de posiciones, etc.). Sin embargo, es necesario realizar la respectiva comparación con la contraparte, es decir, con la soldadura manual, para poder sacar las debidas conclusiones.

Para esto, se preparó una muestra exactamente igual a la que se hizo con el robot, para que un soldador humano realice el mismo trabajo como el que se realizó en la placa #4 (ver Tabla 3.5 y Figura 3.17d). Por lo tanto, se preparó una placa de acero de 28 cm × 15 cm de superficie y 4 mm de espesor. Se marcaron mediante un punzón los puntos de inicio y final de cada cordón para un total de 19 cordones separados aproximadamente 1 cm entre ellos.

Finalmente, se ubicó la placa en la cámara de soldadura, en la misma posición y ubicación como las del robot, y se procedió a realizar los cordones.

Cabe recalcar, que ni el robot de soldadura ni su operador fueron calificados AWS para llevar a cabo el proceso, y por lo tanto, el soldador humano tampoco fue un soldador calificado AWS; sin embargo, el soldador fue una persona con una experiencia relativamente alta en procesos de soldadura.

En la Figura 3.18 se muestra el resultado de los cordones realizados de forma manual. Como se puede ver, los cordones son irregulares, la separación entre ellos no fue la deseada, el total de cordones realizados no fue el esperado, la longitud de los cordones no se mantuvo constante en 115 mm y la velocidad de avance no fue constante ni igual a 3 mm/s como se especificó.

Con esta comparación se puede ver que con la soldadura hecha por robots se pueden obtener productos finales iguales y de la misma calidad, mientras que con la soldadura manual los resultados varían dependiendo de muchas razones, como cansancio, enfermedad, poco entrenamiento, etc.

Igualmente, el tiempo de trabajo que el robot utilizó para realizar la placa #4 de 19 cordo-

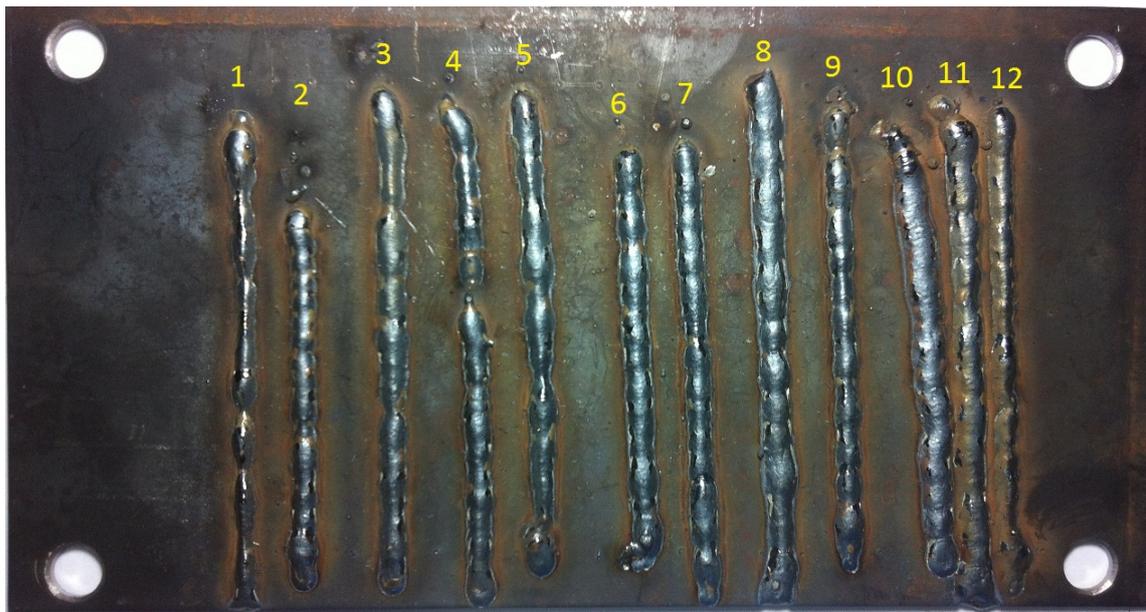


Figura 3.18. Placa de cordones realizados por soldador humano

nes de soldadura fue de 10 minutos aproximadamente, mientras que el soldador humano se demoró aproximadamente 15 minutos en la placa de 12 cordones.

De la misma manera, aunque la programación del robot y sus posiciones tomó cierto tiempo, una vez que este programa está listo, el robot hará el mismo trabajo siempre que se ejecute el programa, y ya conocerá todas las posiciones necesarias. En comparación, para un soldador humano, siempre se debe explicar y marcar las posiciones entre las cuales es necesario realizar el cordón. Por lo tanto, mientras la programación del robot toma tiempo relativamente grande, esto solo es necesario realizar una sola vez, y se equilibra con el tiempo que un soldador humano necesita para marcar y preparar las posiciones cada vez que realice un trabajo.

Aunque parezca que la soldadura robotizada solo presenta ventajas ante la soldadura manual, esto no es así. Uno de los problemas más comunes sucede cuando se varía o se mueve la pieza de trabajo o la cámara de soldadura. En este caso, el robot ya no va a realizar la tarea pues su programación no está definida para los nuevos valores y posiciones, y por lo tanto, es necesaria una reprogramación del robot. Esto no sucede con la soldadura manual, ya que el soldador sabe en donde tiene que realizar su trabajo, aunque este se haya movido de lugar.

En fin, existen ventajas y desventajas que dependiendo el tipo de trabajo y la aplicación

pueden ayudar a obtener conclusiones acerca de qué tipo de soldadura es la más adecuada.

3.7. Limitaciones y Restricciones

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron algunas limitaciones y restricciones en varias situaciones. A continuación se detallan estas limitaciones divididas por áreas de trabajo:

– Espacio Físico

- El espacio físico de trabajo es muy reducido e improvisado, debido a que el robot es parte de todo el sistema del laboratorio y su trabajo no es exclusivamente la soldadura.
- El laboratorio cuenta con muy poca ventilación debido a que no fue diseñado para lugar de trabajo de soldadura.
- La mesa de la cámara de soldadura no está fija, por lo que cualquier movimiento o cambio de la posición en la mesa implicaría que las posiciones del robot no funcionen, y por ende, se necesitaría una reprogramación para nuevas posiciones.
- La mesa de la cámara de soldadura esta en desnivel y en diferente nivel de la base del robot, por lo tanto, siempre van a existir cambios de altura de arco durante la soldadura. Esto influye altamente en el resultado final del cordón.

– Soldadura y Antorcha

- La antorcha tiene un peso relativamente alto y un tamaño grande, por lo tanto, los operadores y los robots deben trabajar con estas limitaciones de peso y tamaño.
- La antorcha no puede quedar colocada en el robot cuando está apagado debido a que al apagar el controlador se desenergizan los motores del robot, y si la antorcha se queda colocada, el robot se cae hasta que la antorcha golpee la mesa o algún objeto. Por lo tanto, la antorcha debe ser retirada y volverla a colocar cada vez que se la va a utilizar.
- La tobera de la antorcha se tapa durante el proceso de soldadura, ya pequeñas partículas de material fundido salen proyectadas hacia la antorcha y se solidifican en la tobera, por lo tanto, se necesita una limpieza frecuente de la tobera para retirar los residuos del material fundido.

- Si el rollo del alambre viene mal enrollado, cuando se trabaja, el alambre puede atascarse y no salir, creando un arco muy inestable e incluso apagándolo.

– Software de Programación

- El programa Scorbace posee un bug cuando se ejecutan los comandos de interrupción (Enable Interrupt, On input # interrupt) para más de dos entradas, el programa deja de recibir el dato del estado de las entradas digitales debido a algún bug en el funcionamiento del propio software. Por esta razón, en algunas ocasiones la subrutina “Emergencia” del programa “Suelda” no se ejecuta correctamente. Para volver a recibir información del estado de las entradas, se debe cerrar y volver a abrir el software Scorbace. Se debería informar sobre este problema a la empresa fabricante del software para que tomen acciones correctivas.
- Durante los comandos “Go Linear to Position # Duration” y “Go Linear to Position # Speed”, los tiempos definidos en la programación no son los que en realidad suceden. Por ejemplo, si se quiere que el robot vaya linealmente entre dos posiciones a una velocidad de 4 mm/s, el tiempo real que se demora para realizar este trabajo no coincide con el está programado. Esto genera un problema ya que mientras se suelda, se debería tener la certeza de que la velocidad de avance a la que está trabajando es la entregada por el usuario. Debido a esto, se usaron interpolaciones y aproximaciones mediante mediciones experimentales; es decir, se tomaron mediciones del tiempo real de duración y se lo tabuló para cada duración en el programa. Por ejemplo, para un tiempo real de 45 segundos, es necesario especificar en el programa 52 segundos de duración de movimiento.
- Al iniciar el movimiento y al llegar a una posición, el robot baja su velocidad y se vuelve muy lento. Esto genera problemas en la calidad, debido a que en las zonas de inicio y fin de cordón se demora mucho más tiempo y hace que el cordón en esos lugares sean más gruesos y altos. Por esta razón, en el programa “Suelda” se incluyó un tiempo pequeño para que el robot adquiriera velocidad y inicie la suelda, al igual, se alargó la posición final para que antes de que el robot llegue, se apague la suelda y

baje la velocidad.

- El programa funciona con posiciones guardadas y necesita llegar a una posición antes de iniciar la ejecución de la siguiente. Por esta razón, no fue posible implementar el control de corriente, ya que no se cuenta con un control adaptivo de la trayectoria.
- El software Scorbace solo usa números enteros, y en ningún cuadro de dialogo en programación Scorbace se puede incluir números con decimales. Por esta razón, con la implementación VBS, se trabajó con unidades sobre 100 [/100], es decir, se multiplicó a todo número por 100 para poder trabajar con números de hasta 2 decimales, y después de todos los cálculos regresar a Scorbace con la unidad inicial. De este modo, solo se pierde la precisión de los decimales al final de todos los cálculos numéricos.

4. Desarrollo de la Investigación

4.1. Descripción de la Obtención de Datos Experimentales

El objetivo de la presente investigación es la obtención de datos experimentales de tiempo y temperatura durante el proceso de soldadura automática GMAW. Se prevee que la comparación de estos datos experimentales con los resultados provenientes de modelos analíticos permitirá determinar los parámetros de soldadura óptimos.

Ciertos detalles de la experimentación documentados en Bouchard [38] fueron adaptados en el presente trabajo. En esta referencia se presenta un benchmark de validación para simulaciones de esfuerzos residuales debido a la soldadura de un cordón en una placa de acero inoxidable austenítico, mediante métodos realizados por miembros del proyecto “European NeT Project”.

Para nuestro caso, se adquirieron probetas de las mismas medidas, pero se cambió el material base a acero A36 (alrededor de 0.26 % de C). Igualmente, se ubicaron termocuplas para la medición de temperatura, pero se cambió la posición de medida en comparación con las del artículo. En las siguientes secciones se explica en detalle la secuencia de la experimentación.

4.2. Preparación de Probetas

El tamaño de las probetas, como indica el benchmark, es de 180 mm × 120 mm × 17 mm [38]. En este estudio se utilizó probetas de acero A36 de 180 mm × 120 mm × 18 mm. Debido a que las probetas fueron sometidas a oxígeno, éstas fueron recocidas para devolverles sus propiedades de suministro.

De acuerdo con la referencia [39], para realizar el tratamiento térmico de recocido de un acero A36 (0.26 % de carbono), se debe seleccionar una temperatura aproximada de 825 °C (ver Figura 4.1a), mantener la probeta en el horno por una hora y media, y enfriarla dentro del mismo para garantizar un enfriamiento lento como el mostrado en la Figura 4.1b.

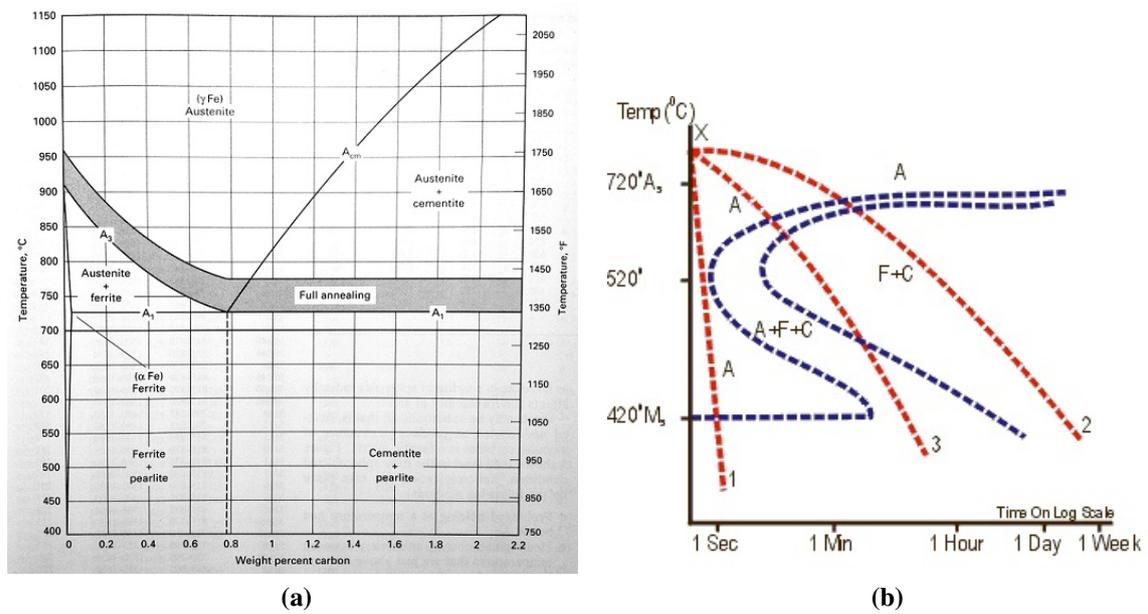


Figura 4.1. Esquemas para el tratamiento térmico del acero. **a)** Diagrama de Hierro-Carbono. Fuente [39]. **b)** Diagrama CCT idealizado para el acero al carbono¹. Fuente [40].

El tratamiento térmico de recocido en 8 probetas se llevó a cabo en el horno Mufla del Laboratorio de Química de la Universidad San Francisco de Quito. En la Figura 4.2 se puede observar cómo se realizó el procedimiento en el laboratorio.



Figura 4.2. Tratamiento térmico de las probetas. **a)** Equipo utilizado. **b)** Probetas a temperatura de autenización.

Como consecuencia del tratamiento, las superficies de las probetas quedaron cubiertas con óxido de hierro (Figura 4.3a) y con una menor concentración de carbono de acuerdo a la

¹Curva #2 corresponde al tratamiento de recocido usado

ley de difusión de Fick [41]. Las superficies fueron rectificadas, como se muestra en la Figura 4.3b, para tener probetas libres de óxido y con una concentración de carbono normal (aproximadamente 0.26%), como las de la Figura 4.3c.

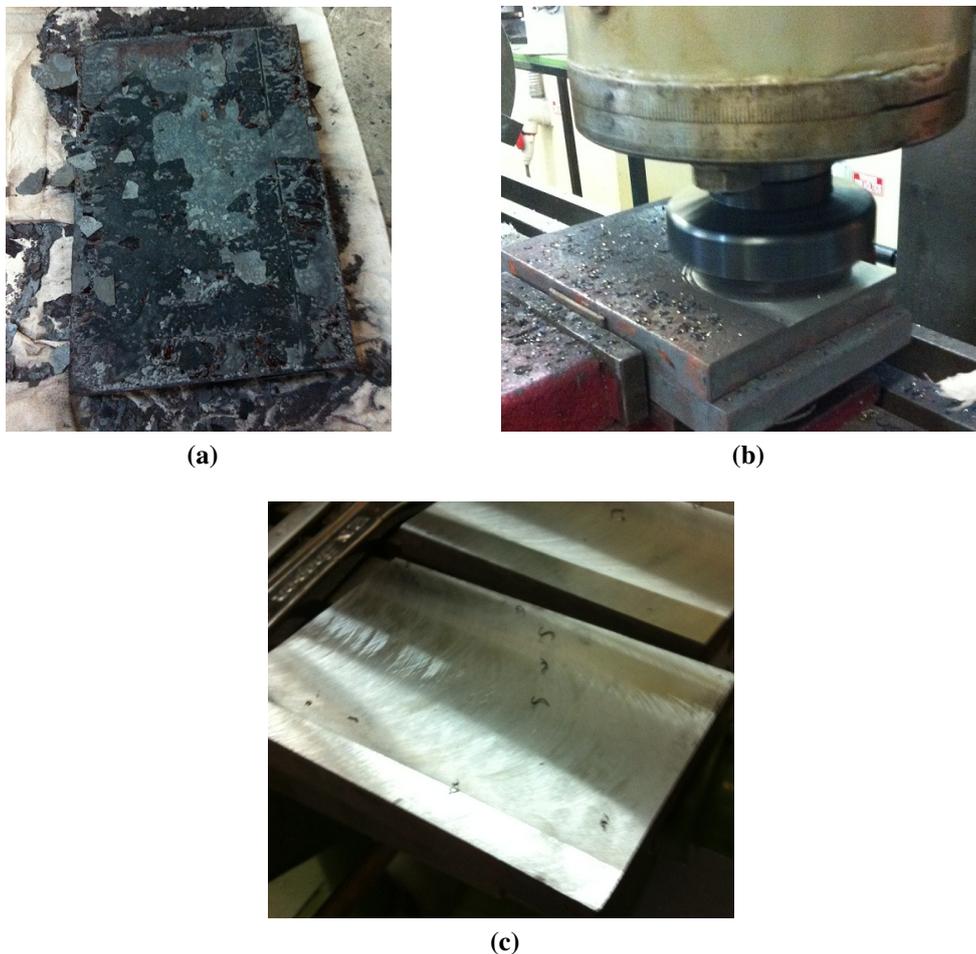


Figura 4.3. Limpieza de las probetas después del tratamiento térmico. **a)** Probetas con óxido después del enfriamiento lento en el horno. **b)** Rectificado de una superficie de las probetas para retirar el óxido. **c)** Probetas listas para la investigación.

4.3. Obtención de Ciclos Térmicos

4.3.1. Ubicación de las Termocuplas

Para la medición de ciclos térmicos, varias termocuplas se ubicaron en lugares estratégicos. Las probetas fueron simplemente apoyadas sobre tres pernos de $5/16''$ colocados en la plancha de agujeros de la cámara de soldadura (Figura 4.4).

Siguiendo las recomendaciones del benchmark [38], se realizaron los cordones de soldadura

de 60 mm y midieron temperaturas en las posiciones T_2 , T_5 y T_9 (ver Figura 4.5).

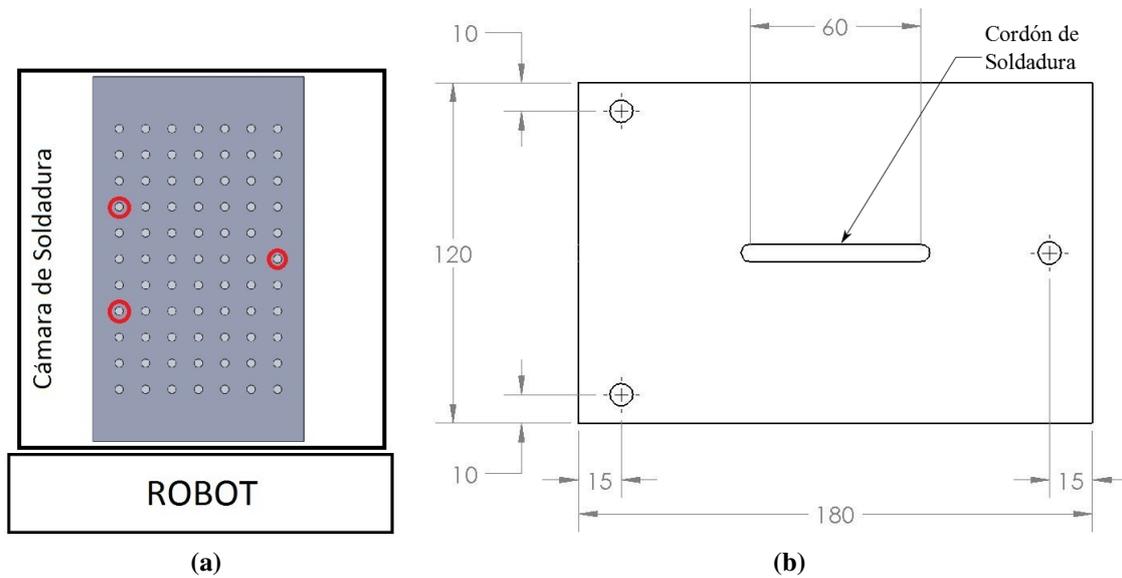


Figura 4.4. Condiciones de apoyo. **a)** Esquema de la placa de la cámara de soldadura con los agujeros marcados en donde se ubicaron los pernos. **b)** Probeta de ensayo apoyada en tres puntos (Vista Superior).

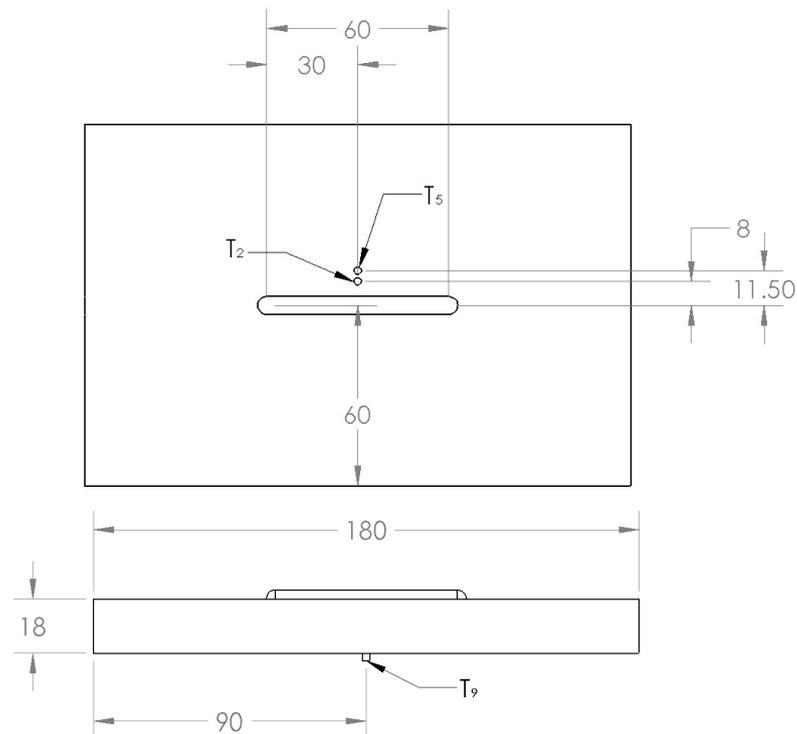


Figura 4.5. Posiciones de las termocuplas documentadas en la referencia [38]. Vistas Superior y Frontal.

Asimismo, en otras probetas se ubicaron termocuplas en las posiciones indicadas en la Figura 4.6.

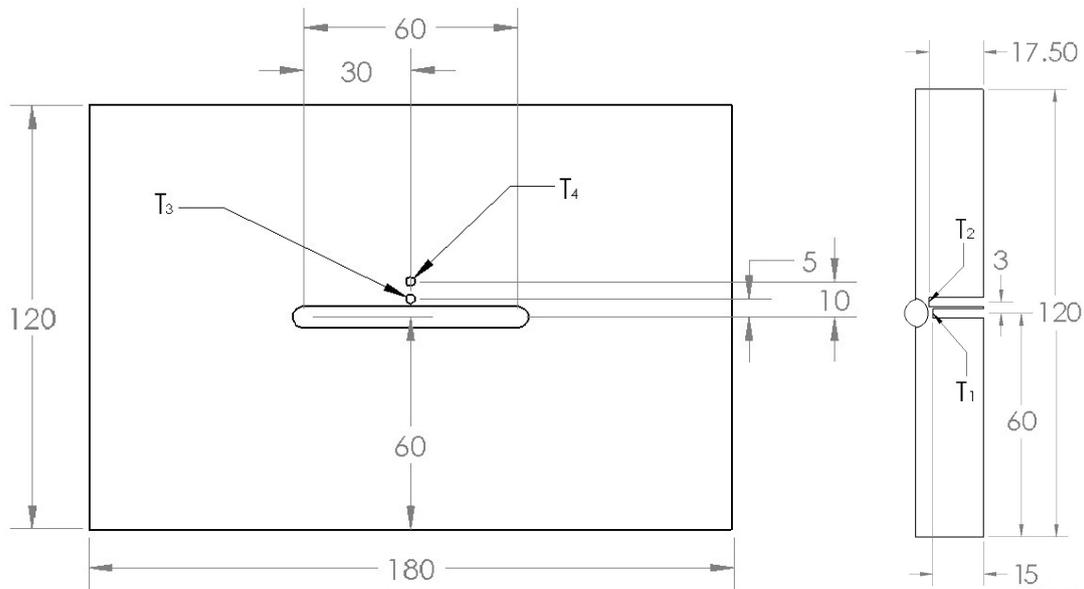


Figura 4.6. Posiciones de las termocuplas para la investigación. Vistas Superior y Lateral.

La termocupla T_1 , encargada de medir las temperaturas aproximadas a la zona de fusión (FZ), se colocó en la mitad exacta del cordón (eje central), y a una altura de 15 mm desde la superficie inferior de la probeta. La termocupla T_2 , encargada de medir las temperaturas aproximadas de la zona afectada por el calor (HAZ), se colocó a una altura de 17.5 mm desde la superficie inferior de la probeta, y a 3 mm del eje central. Las termocuplas T_3 y T_4 se ubicaron en la superficie superior de la probeta y a una distancia de 5 mm y 10 mm desde el centro del cordón. Estas posiciones se muestran en la Figura 4.6 y las posiciones T_1 y T_2 muestran su relación con la Figura 4.7.

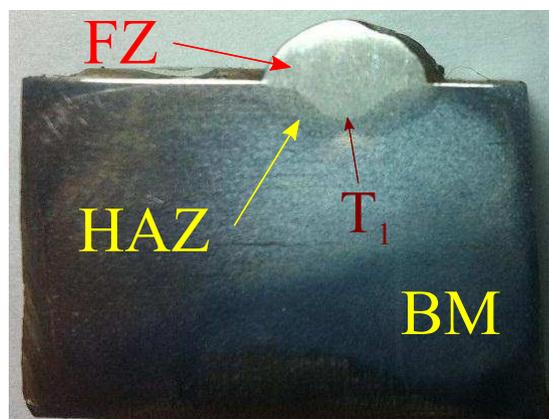


Figura 4.7. Corte transversal de un cordón de soldadura. Se muestran las zonas de soldadura y la ubicación de la termocupla T_1 .

La Figura 4.7 muestra el corte transversal de un cordón de soldadura MIG realizado, en donde se puede apreciar claramente la zona de fusión (FZ), zona afectada por el calor (HAZ) y metal base (BM).

4.3.2. Adaptación de la Programación del Robot

El programa realizado para la investigación, incluyendo el funcionamiento del robot soldador, fue prácticamente el descrito en la Sección 3.4 y que se explica en el Apéndice F. El programa sufrió pequeñas adaptaciones para darle mayor funcionalidad en los ensayos y para que realice un solo cordón en la mitad de las probetas, con la longitud y velocidad establecidas.

Primeramente, se realizaron los cambios de posiciones de inicio y final de cordón, para que el robot se mueva y ejecute el proceso de soldadura en la mitad de las probetas, cuando están apoyadas en sus tres puntos dentro de la cámara de soldadura, de acuerdo con la Figura 4.4 .

Posteriormente, se realizó el cambio en la programación de la longitud de cordón, ya que ésta siempre va a ser fija e igual a 60 mm (nominalmente). Así entonces, la única variable controlada por el usuario, cada vez que se ejecute el proceso, es la velocidad de avance.

Finalmente, se modificó el programa para que efectúe un solo cordón de soldadura, y no los 19 ciclos programados inicialmente. Por esta razón, se eliminaron también las subrutinas y comandos de interpolación y grabación de nuevas posiciones, ya que únicamente se requieren las posiciones inicial y final del cordón.

4.3.3. Pruebas Realizadas

Primeramente se realizó la comparación con los datos proporcionados por el Benchmark. Por lo tanto, se requirió una entrada de calor $HI = 633 \text{ J/mm}$ con una velocidad de avance de $v = 2.27 \text{ mm/s}$, y un cordón de soldadura de 60 mm de longitud. En la experimentación, realizada en la probeta 4, se obtuvieron los valores experimentales de $HI = 673.23 \text{ J/mm}$, equivalente a un 6% de error. Los ciclos térmicos y resultados se presentan en la siguiente sección.

De la misma manera, se realizó investigación propia que consistió en realizar diferentes cordones de soldadura manteniendo la entrada de calor constante (HI). Para esto, se varió la intensidad de corriente, el voltaje y la velocidad de avance del robot a lo largo del material. Las mediciones de ciclos térmicos y posterior análisis metalográfico permitirán concluir que parámetros de soldadura son los más apropiados para garantizar la integridad del cordón de soldadura.

Se fijó una entrada de calor $HI \approx 700\text{J/mm}$ y se variaron las velocidades de avance entre $v_1 = 2.25\text{ mm/s}$, $v_2 = 2.50\text{ mm/s}$ y $v_3 = 4.25\text{ mm/s}$. La Tabla 4.1 muestra las variables usadas para cada cordón realizado. Se puede ver que HI no se pudo mantener exactamente constante, sin embargo la media (μ_{HI}) es muy cercana a lo establecido previamente (1% de error), y que la desviación estándar (σ_{HI}) es muy pequeña (2% de la media), por lo que se puede seguir con la investigación usando esos datos.

Tabla 4.1. Variables de soldadura usadas en los diferentes cordones realizados

No. de Cordón	v [mm/s]	I [A]	V [V]	HI [J/mm]
5	2.25	92.9	18.75	696.75
6	2.50	112	17.8	717.70
7	2.50	107.5	18.6	719.82
8	2.25	92	19.3	710.24
11	4.25	156	20.6	680.53
12	4.25	163	20.5	707.61
				μ_{HI} 705.44
				σ_{HI} 13.42

La Figura 4.8 muestra un cordón de soldadura de 60 mm de largo realizado por el robot sobre una placa de ensayo (probeta).

4.3.4. Resultados de Datos Obtenidos

Como se explicó, primeramente se realizó la medición de temperaturas para el ensayo descrito en el benchmark [38]. La Figura 4.9 indica los ciclos térmicos medidos en el ensayo y comparados con los publicados en el Benchmark. Como se puede notar, las curvas son parecidas en cuanto a su tendencia y enfriamiento en el estado estable. No obstante, se observa una diferencia considerable entre las temperaturas máximas de la termocupla T_2 .



Figura 4.8. Placa de ensayo con el cordón de soldadura realizado

Estas diferencias pudieron ser causadas por diferentes factores. Uno de ellos es que que la prueba no se realizó con el mismo material base. El ensayo del benchmark trabajó con acero inoxidable austenítico mientras que esta prueba se realizó en acero de bajo carbono A36.

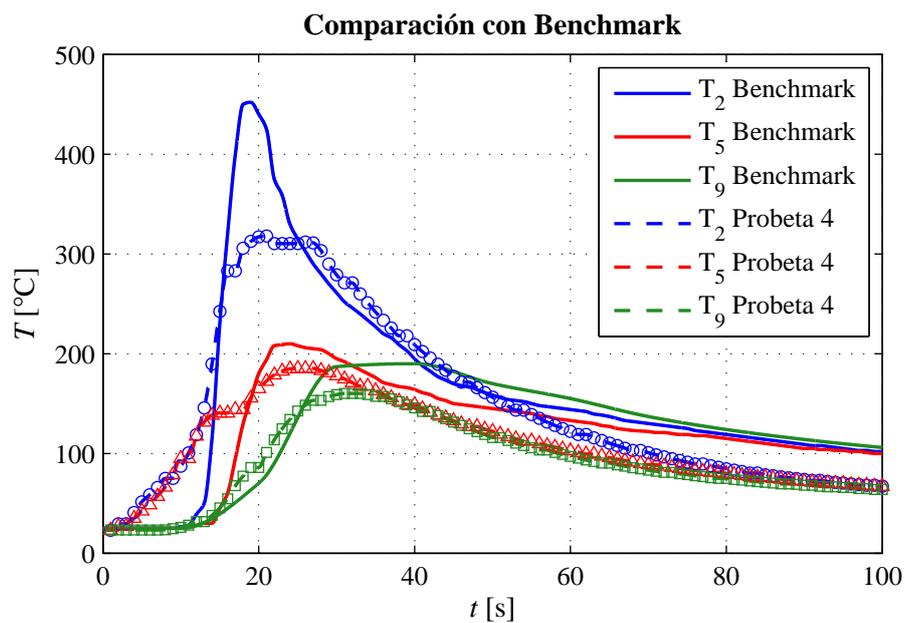


Figura 4.9. Ciclos térmicos obtenidos mediante el ensayo descrito en la referencia [38]

De la misma manera, el proceso de soldadura usado en el benchmark fue TIG, mientras que en el ensayo se usó el proceso MIG. Como última posible causa, puede ser que la termocupla ubicada en la posición T_2 no reaccionó debidamente a la temperatura o se movió durante el ensayo. Las diferencias en los ciclos térmicos pudieron ser causadas por estas razones, sin embargo se puede considerar que la medición de datos fue buena y se prosiguió a la siguiente fase de la investigación.

A continuación, se realizaron las pruebas para la investigación propia. Los ciclos térmicos que se obtuvieron para la posición de termocupla T_1 se muestran en la Figura 4.10. Estos datos brindan información útil acerca de las tasas de enfriamiento que el material sufrió inmediatamente después del proceso de soldadura.

La Figura 4.11 muestra las curvas de enfriamiento a diferentes velocidades comparadas entre sí. En la Figura 4.11a se presentan los datos en una escala de tiempo lineal, mientras que en la Figura 4.11b se presenta en una escala de tiempo logarítmica empezando desde la temperatura registrada más alta. Esta gráfica nos ayuda a predecir la microestructura que se forma mediante las curvas CCT del acero.

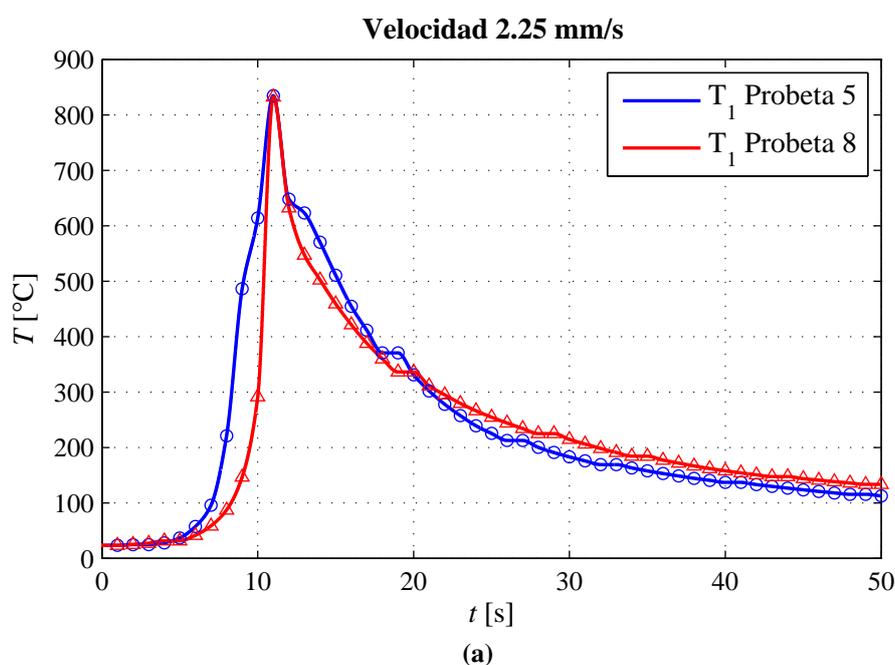


Figura 4.10. Ciclos térmicos obtenidos mediante la termocupla en la posición T_1 a diferentes velocidades de avance. **a)** Velocidad 2.25 mm/s. (continúa)

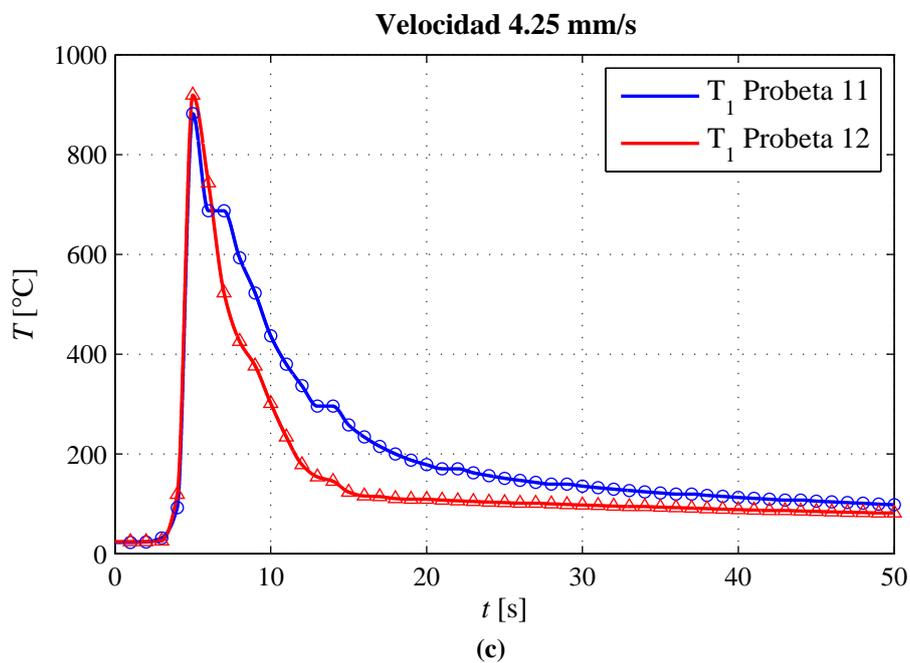
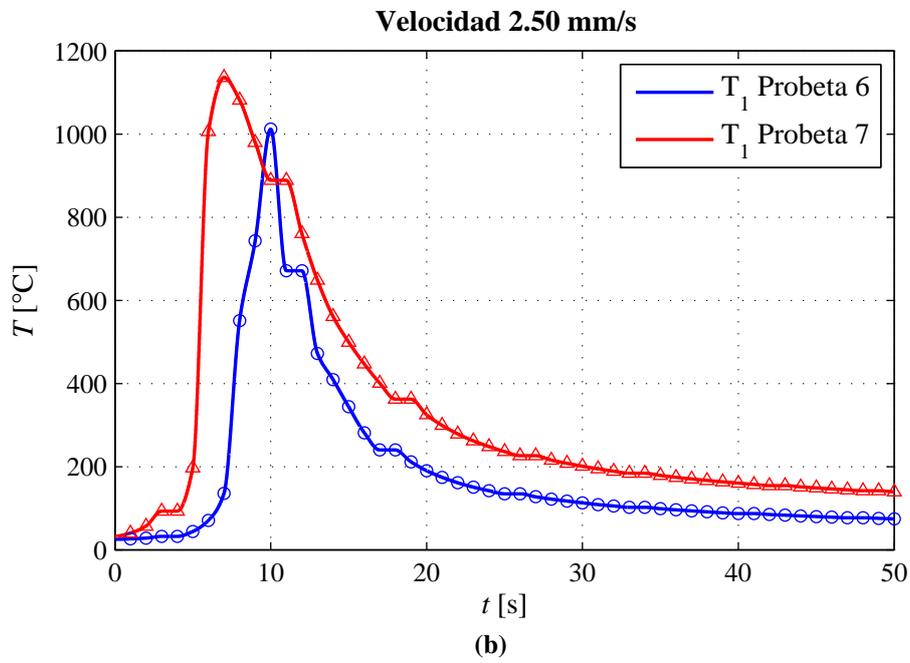


Figura 4.10. (continuación) Ciclos térmicos obtenidos mediante las termocuplas en la posición T_1 a diferentes velocidades de avance. **b)** Velocidad 2.50 mm/s. **c)** Velocidad 4.25 mm/s.

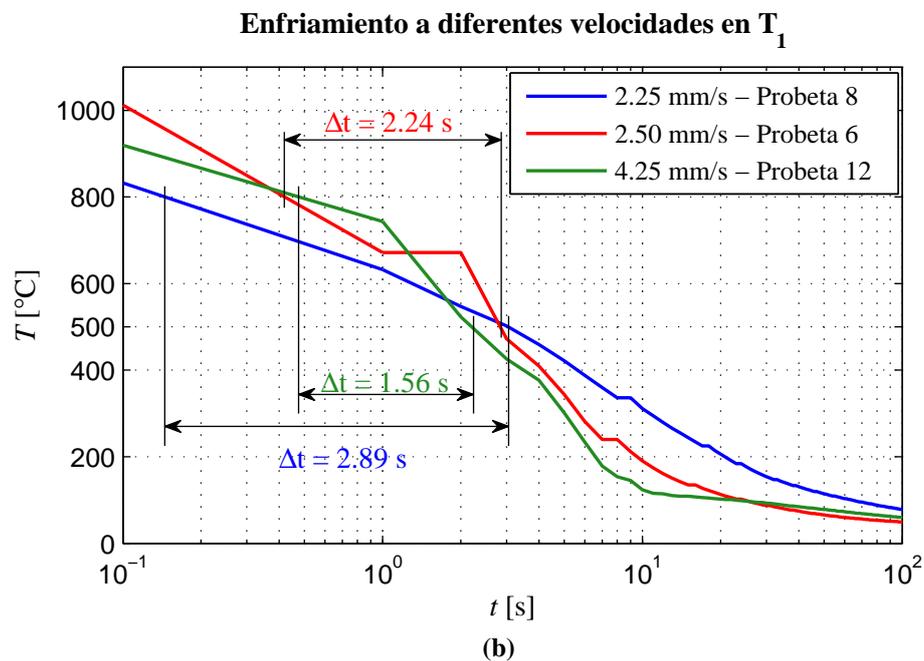
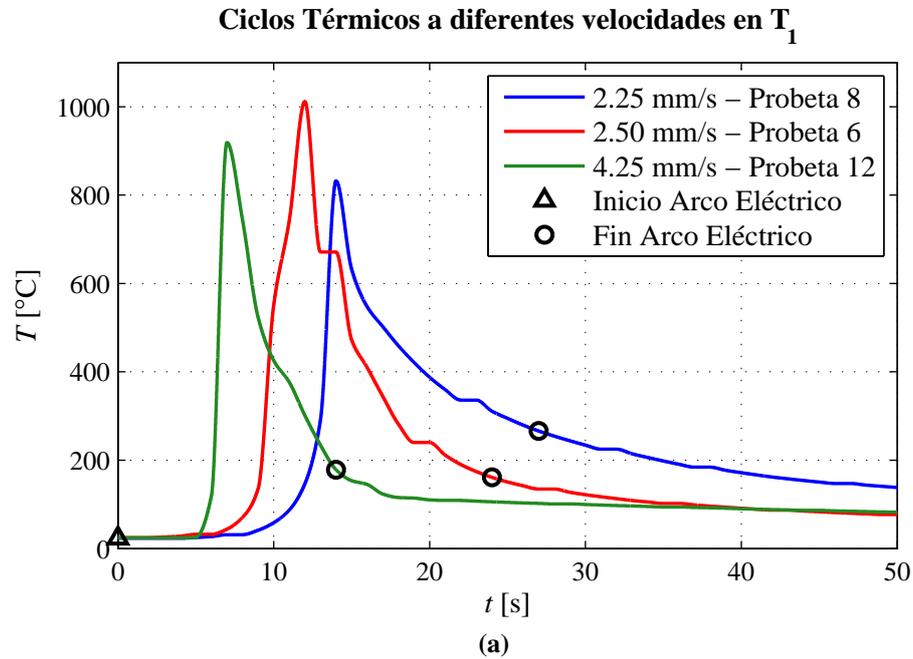


Figura 4.11. Comparación de las tasas de enfriamiento de temperaturas en la posición T_1 a diferentes velocidades de avance. **a)** Comparación en escala de tiempo lineal. **b)** Comparación en escala de tiempo logarítmica, se muestra Δt entre 800°C y 500°C .

En la Figura 4.11b se calculó el tiempo que cada una de las probetas tomó para enfriar de 800°C a 500°C. Estos tiempos se calcularon mediante una interpolación lineal entre los datos experimentales obtenidos. Los tiempos promedio de enfriamiento se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Tiempos promedio de enfriamiento de 800°C a 500°C

Velocidad [mm/s]	Tiempo [s]
2.25	3.45
2.5	2.77
4.25	2.20

Como se puede ver en la Tabla 4.2, a medida que la velocidad de avance aumenta, el tiempo de enfriamiento disminuye. Esto se debe a que el arco eléctrico actúa menos tiempo a lo largo del material, y por lo tanto, el calor se disipa a una tasa mayor.

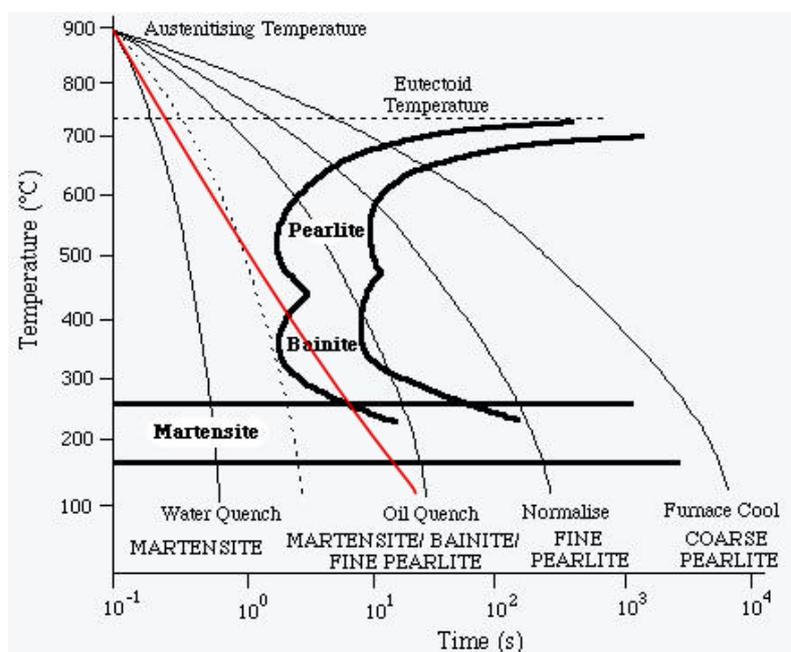


Figura 4.12. Diagrama CCT para un acero eutectoide. Curva roja indica el proceso de enfriamiento promedio real en las probetas. Fuente [42].

Finalmente, mediante la Figura 4.11b y el diagrama CCT de la Figura 4.12, se puede prever una microestructura de bainita para los cordones realizados, debido a su tasa de enfriamiento. Esta predicción tiene que ser comprobada mediante el análisis metalográfico de la siguiente sección.

4.4. Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico, se trabajó con la empresa ILPM Engineering Cia. Ltda. Las muestras fueron cortadas en frío, pulidas y atacadas químicamente, para ser observadas en el microscopio óptico.

Se tomaron micrografías a un aumento de 50x para obtener datos sobre el tamaño de grano en la zona de fusión (FZ), y a 1000x para realizar un estudio del crecimiento dendrítico.

ILPM Engineering entregó los datos descritos, y se presentan a continuación. En la Figura 4.14 se muestran algunas de las micrografías tomadas a 50x, y mediante éstas se determinó el tamaño de grano en los cordones de soldadura, que están tabulados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Tamaño promedio de grano en los cordones de soldadura

Velocidad [mm/s]	Cordón No.	Largo [μm]	Ancho [μm]	Promedio Ancho [μm]
2.25	5	1385.77	257.62	209.10
	8	715.43	160.58	
2.5	6	1707.95	115.74	112.63
	7	766.02	109.51	
4.25	11	842.71	106.18	105.74
	12	840.89	105.3	

Como se puede ver, los granos en la zona de fusión son de forma columnar. Esto se debe al enfriamiento relativamente rápido que sucede en el material fundido, que causa una precipitación en dendritas y después en granos columnares.

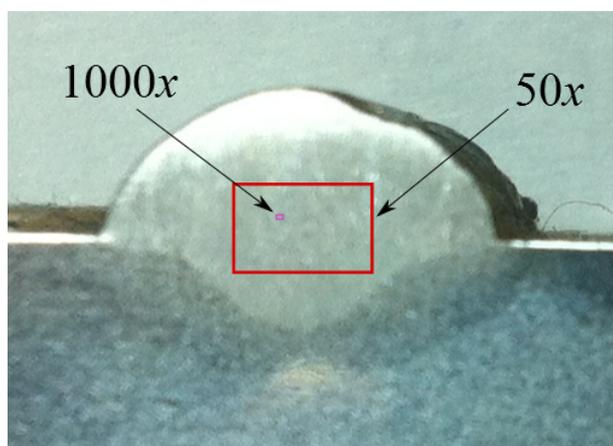
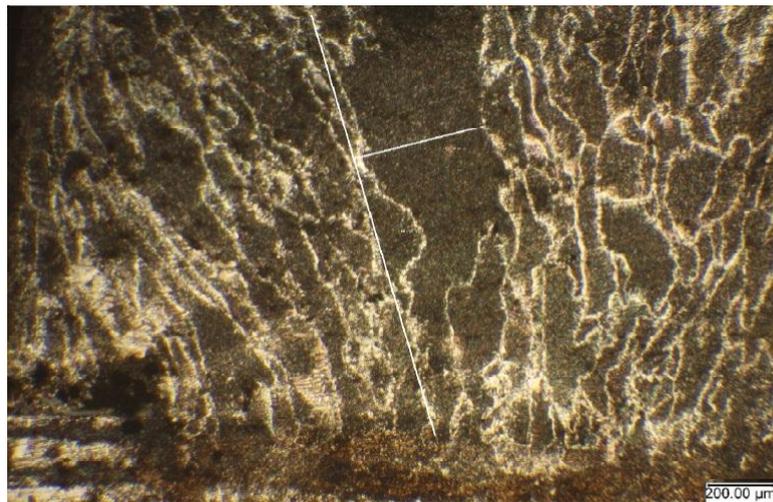
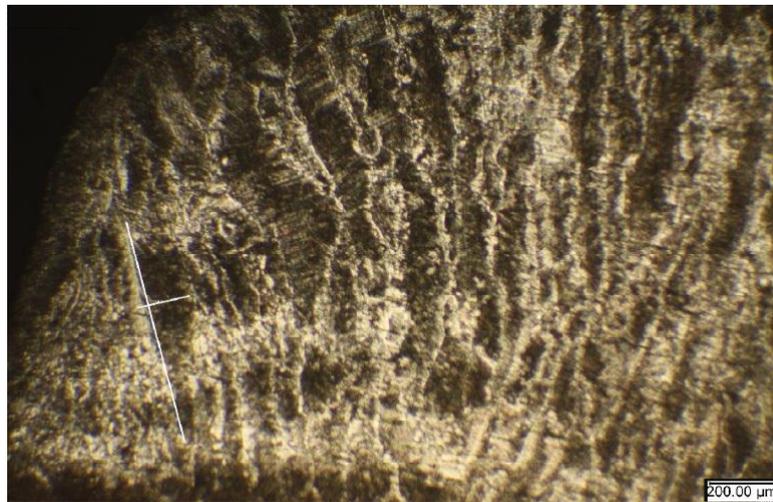


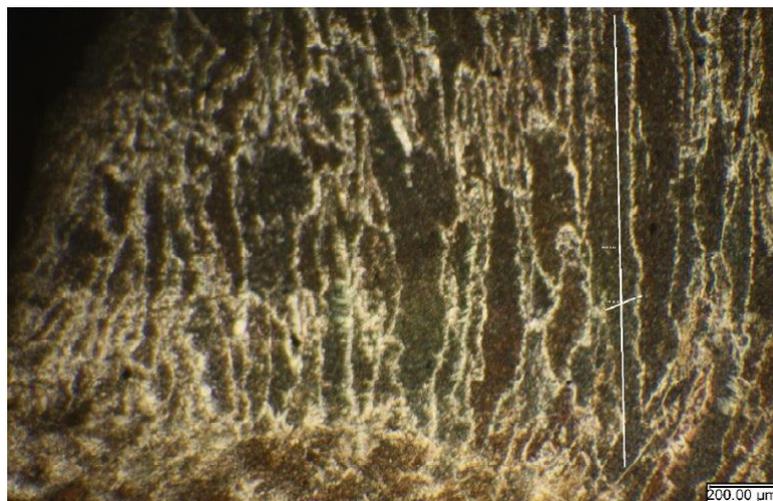
Figura 4.13. Ubicaciones de las micrografías dentro de la zona de fusión



(a)



(b)



(c)

Figura 4.14. Micrografías tomadas a 50x de la zona de fusión de la soldadura. **a)** Probeta 8. **b)** Probeta 6. **c)** Probeta 12.

Las micrografías presentan tres tipos de microestructuras en todos los cordones: ferrita acicular, bainita y ferrita-perlita. No se encontró casi nada de martensita, porosidades ni grietas en las muestras.

La ferrita acicular, con forma de agujas, aumenta la tenacidad² del material[41], y debido a la ausencia de martensita, el material no es frágil. Se puede concluir que los cordones de soldadura realizados por el robot son de buena calidad.

Se puede ver, mediante los datos presentados en la Tabla 4.3, que mientras la velocidad de avance aumenta, el ancho del grano columnar disminuye. Esto ocurre por la misma razón explicada en la sección anterior; la solidificación del material fundido sucede más rápidamente cuando la velocidad de avance es mayor, y por lo tanto, los granos precipitan rápidamente y con menor tamaño.

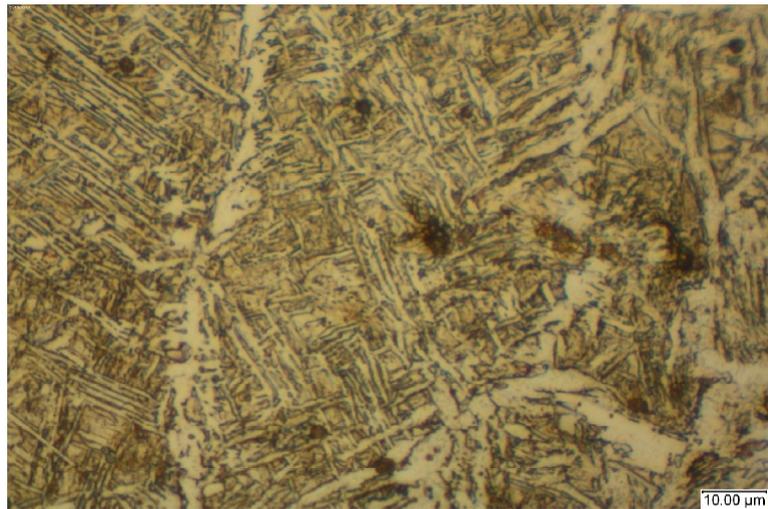
El segundo tipo de micrografías, tomadas con aumento a 1000x, se pueden ver en la Figura 4.15. Igualmente, solo se presentan algunas de las micrografías tomadas debido a que resultaron muy similares. En estas imágenes, se observa una microestructura dendrítica muy desordenada, y solamente en la Figura 4.15a es posible ver de mejor manera el crecimiento del brazo dendrítico secundario.

El espaciamiento del brazo dendrítico secundario (en inglés *Secondary Dendritic Arm Spacing*, SDAS) es la distancia entre dos consecutivos brazos dendríticos (ver λ_2 en la Figura 4.16a).

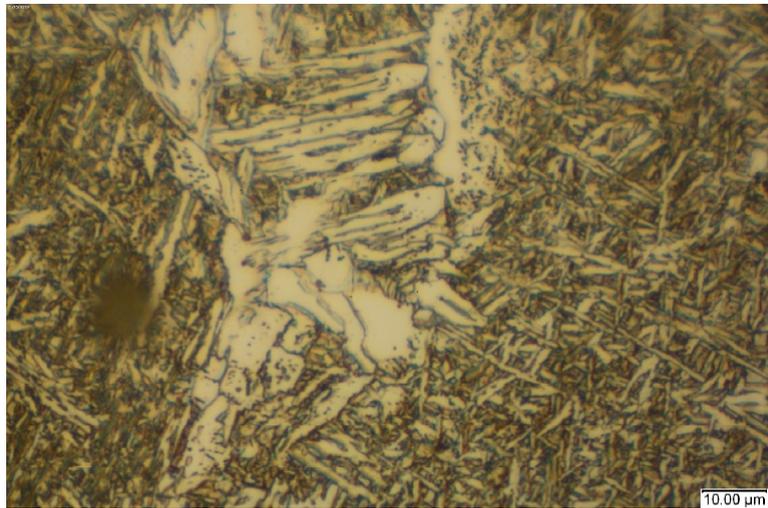
El estudio del brazo dendrítico secundario es importante debido a que brinda información acerca de las propiedades mecánicas del material. Esta relación se muestra en la Figura 4.16b; tanto la resistencia a la tracción como el porcentaje de deformación presentan relación con el espaciamiento del brazo dendrítico secundario.

Sin embargo, debido a la limitada resolución de las micrografías, no fue posible determinar esta distancia entre las dendritas secundarias.

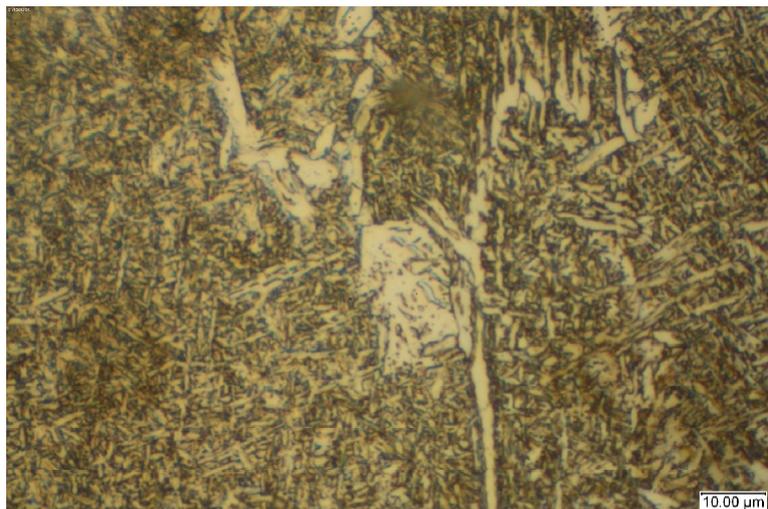
²Tenacidad es la habilidad de un material de absorber energía y deformarse plásticamente sin llegar a la fractura.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15. Micrografías tomadas a 1000x de la zona de fusión de la soldadura. **a)** Probeta 8. **b)** Probeta 6. **c)** Probeta 12.

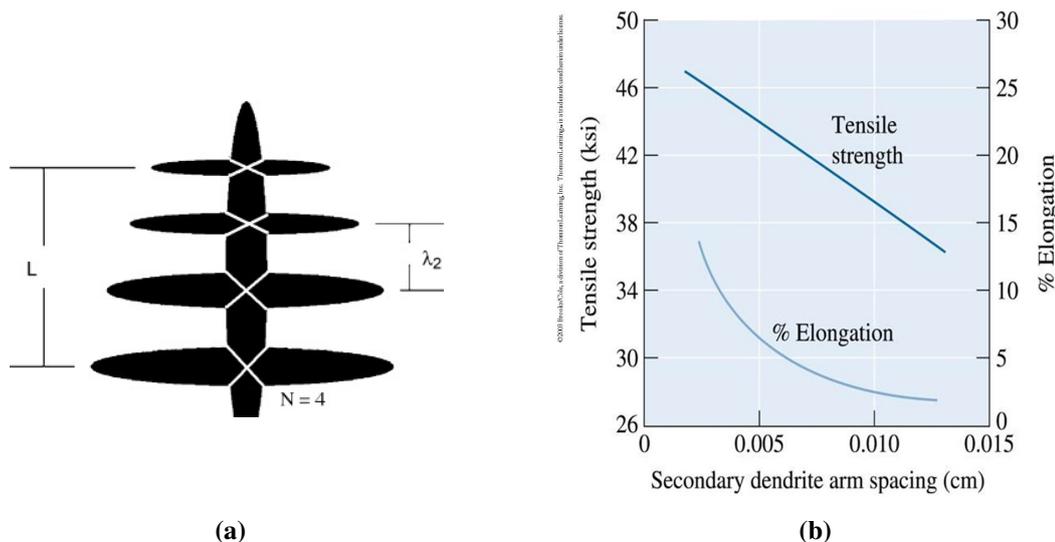


Figura 4.16. Espaciamiento del Brazo Dendrítico Secundario (SDAS). **a)** Definición gráfica del SDAS (λ_2). Fuente [43]. **b)** Relación del espaciamiento del brazo dendrítico secundario con las propiedades mecánicas del material. Fuente [44].

4.5. Comparación con Modelos Teóricos

Existen dos modelos teóricos conocidos para el análisis del flujo de calor en soldadura que son presentados en Kou [45]. El primer modelo fue desarrollado por Rosenthal y se presenta en la Ecuación 4.1 [45]. Este modelo puede ser usado para calcular la temperatura $T(x, y)$ en cualquier ubicación de la superficie de la pieza de trabajo, con respecto a una fuente de calor en movimiento, ubicada en la posición $(0, 0)$.

$$\frac{2\pi(T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{vx}{2\alpha}\right) K_0(z) \quad (4.1)$$

donde

T = Temperatura en la posición (x, y) [K]

T_0 = Temperatura antes de soldar [K]

k = Conductividad térmica del material [J/m·s·K]

g = Espesor del material [m]

Q = Calor transferido al material [W], igual a ηVI ,

η, V e I son la eficiencia, el voltaje, y la corriente que entrega la fuente, respectivamente

v = Velocidad de Avance [m/s]

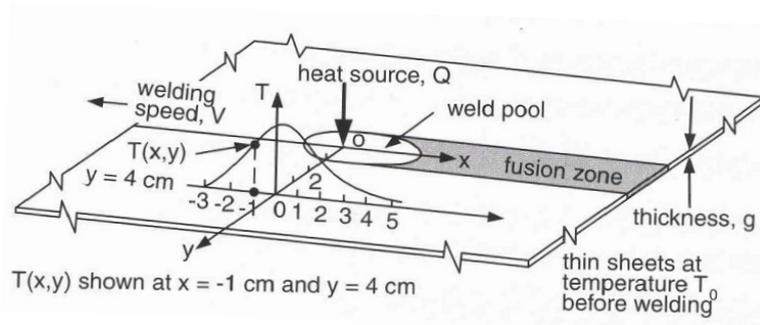
r = Distancia radial desde el origen, igual a $\sqrt{x^2 + y^2}$ [m]

α = Difusividad térmica del material $[\text{m}^2/\text{s}]$, igual a $\frac{k}{\rho C}$,

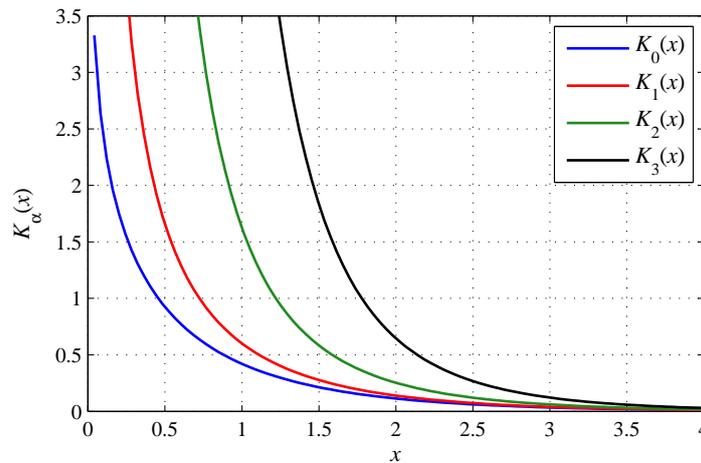
ρ y C son la densidad y el calor específico del material, respectivamente

$K_0(z)$ = Función de Bessel modificada de segundo tipo

y orden cero, con argumento $z = \frac{vr}{2\alpha}$. Ver Figura 4.17b



(a)



(b)

Figura 4.17. Modelo matemático del flujo de calor en el proceso de soldadura para las ecuaciones de Rosenthal y Adams. **a)** Análisis geométrico. Fuente [45]. **b)** Función modificada de Bessel de segundo tipo y orden 0, 1, 2, 3.

El segundo modelo, desarrollado por Adams, es usado para calcular las temperaturas pico T_p en la superficie de la pieza de trabajo a una distancia Y de la línea de fusión, en su dirección normal [45]. La Ecuación 4.2 es llamada la ecuación de Adams.

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13vYg\rho C}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4.2)$$

donde T_m es la temperatura de fusión del material (en grados K) y para las demás variables se usa la misma simbología que en la ecuación anterior.

Para el desarrollo de estas ecuaciones se usaron las siguientes constantes [45]: $\eta = 0.9$, $\rho C = 4.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 41 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$, $T_m = 1800 \text{ K}$.

Para esta sección se usaron los datos obtenidos mediante las termocuplas ubicadas en las posiciones T_3 y T_4 (ver figura 4.6 en la página 96), y las probetas con las variables de soldadura listadas en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Variables de soldadura usadas en las probetas

No. de Cordón	v [mm/s]	I [A]	V [V]
3	2.25	92	16.5
5	2.25	92.9	18.75
6	2.50	112	17.8
10	3.70	144	19.9

A continuación se realizó la programación y simulación en MatLab (Código 4.1), y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 4.18.

Código 4.1 Modelo Rosenthal en MatLab

```

1 %Modelamiento Ciclos Termicos por Rosenthal y Adams
2 temp = open('temp_prob.mat'); %abrir los datos de temperatura guardados
3 k = 41; %conductividad termica
4 g = 17e-3; %espesor
5 n = 0.9; %eficiencia
6 pC = 4.5e6; %densidad*calor especifico
7 alp = k/pC; %difusividad termica
8 Tm = 1800; %temperatura de fusion
9 E = 16.5; %voltaje
10 I = 92; %corriente
11 Q = n * E * I; %calor
12 V = 2.25e-3; %velocidad de avance
13 t = linspace(-30e-3/V,360e-3/V,301); %tiempo t=distancia/velocidad
14 T0 = mean(temp.T3_P3(1:5)) + 273.15; %temperatura inicial (primeros valores)
15 y = 5e-3; %distancia normal de la termocupla
16 T_ros = zeros(size(t)); %vector para guardar datos de Rosenthal
17 for i=1:size(t,2)
18     x = t(i)*V; % distancia = tiempo*velocidad
19     r = sqrt(x^2+y^2); %distancia radial desde el origen
20     Z = V*r/(2*alp); %argumento funcion Bessel
21     K0 = besseli(0,Z); %funcion Bessel modificada tipo 2 orden 0
22     T_ros(i) = T0 + Q/(2*pi*k*g)*exp(V*x/(2*alp))*K0; %ecuacion de Rosenthal

```

```

23 end
24 plot(t,T_ros) %Ciclo termico del modelo
25 T_exp = max(temp.T3_P3); %temp maxima experimental
26 T_ros = max(T_ros); %temp maxima Rosenthal
27 T_ad = T0 + 1/(4.13*V*y*g*pC/Q + 1/(Tm - T0)); %temp maxima Adams

```

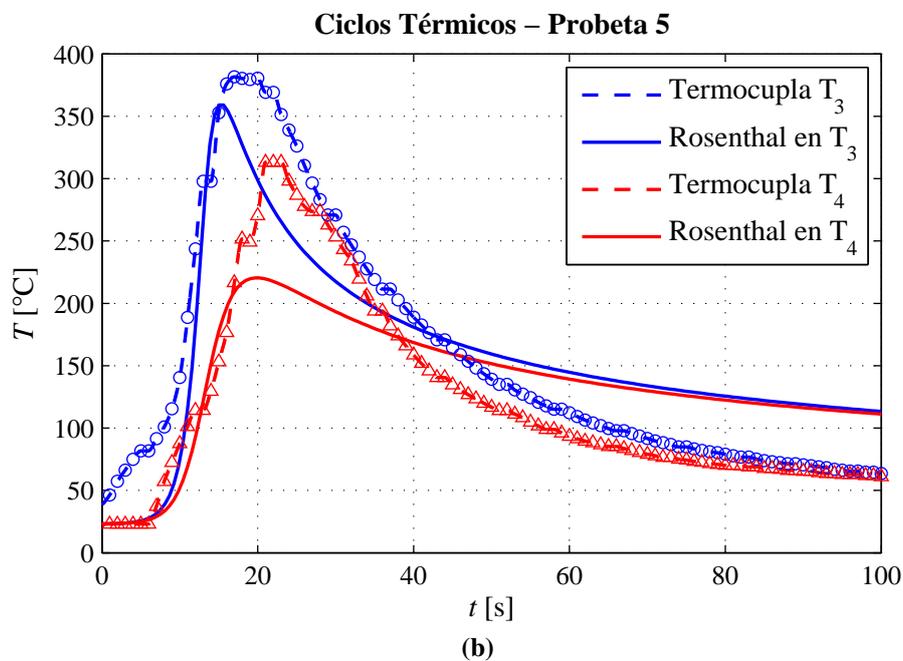
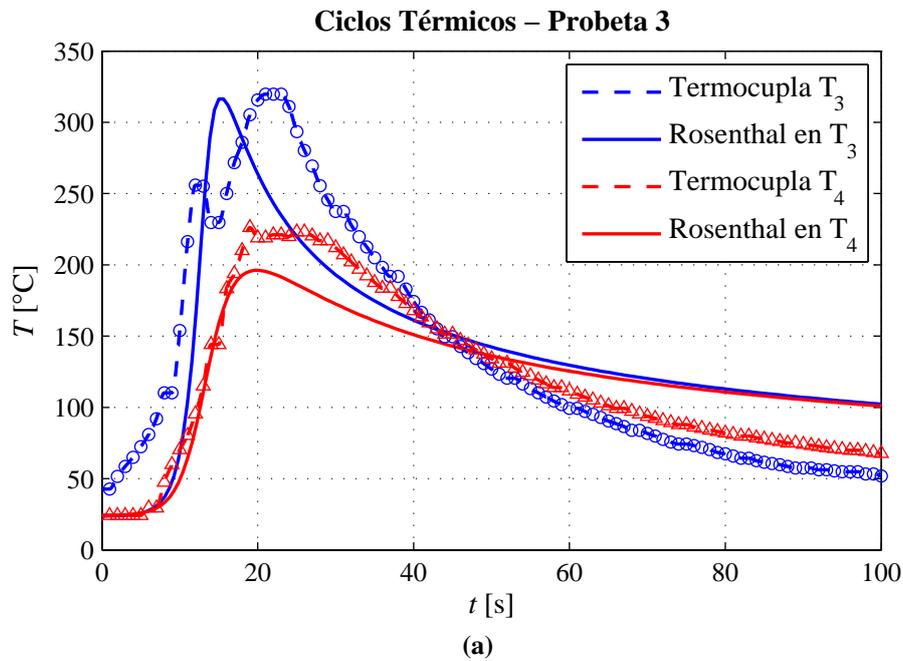


Figura 4.18. Comparación entre los ciclos térmicos obtenidos experimentalmente y los del modelo matemático de Rosenthal. **a)** Probeta No. 3. **b)** Probeta No. 5. (*continúa*)

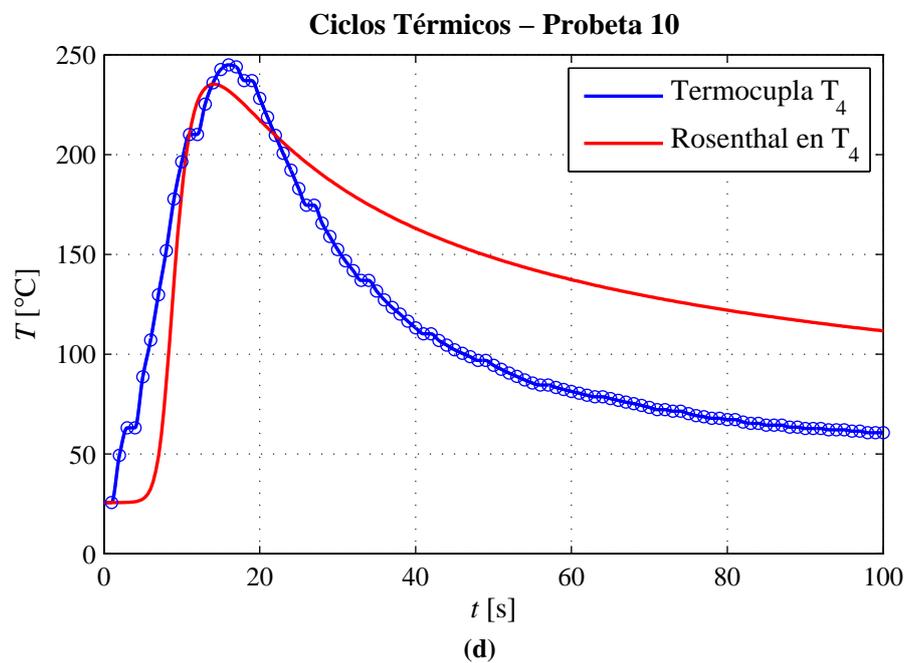
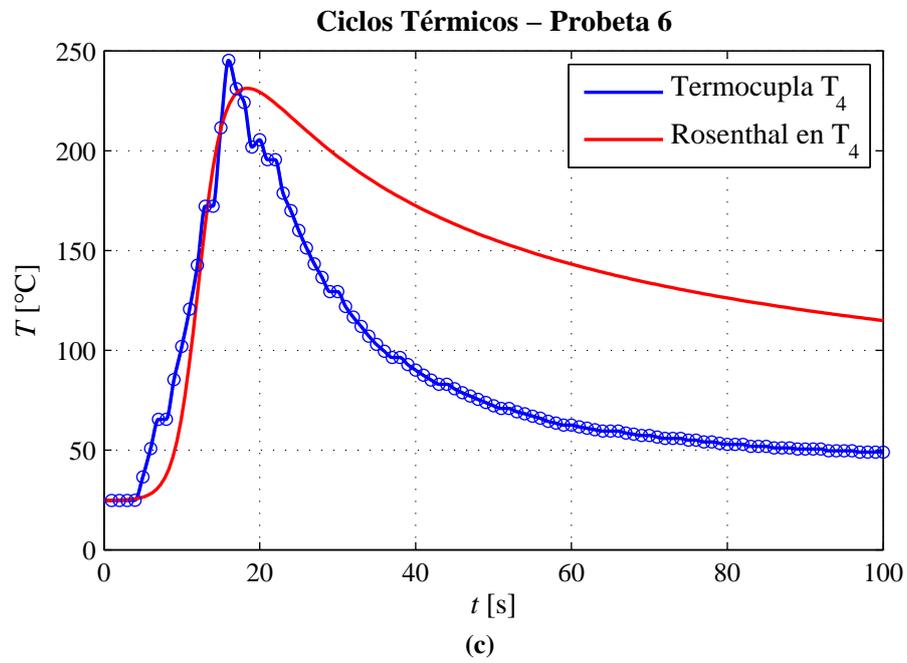


Figura 4.18. (continuación) Comparación entre los ciclos térmicos obtenidos experimentalmente y los del modelo matemático de Rosenthal. **c)** Probeta No. 6. **d)** Probeta No. 10.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.5. En esta tabla se muestran las temperaturas pico T_p , en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), obtenidas experimentalmente en las diferentes termocuplas (T_{exp}), obtenidas mediante la ecuación de Rosenthal (T_{Ros}) y mediante Adams (T_{Ad}). Se computó un promedio entre las temperaturas de los dos modelos $T_{prom} = \frac{T_{Ros} + T_{Ad}}{2}$, y el porcentaje de error entre los datos teóricos y los experimentales $\%Error = \frac{|T_{exp} - T_{prom}|}{T_{prom}} \times 100$.

Tabla 4.5. Resultados obtenidos mediante la simulación de los modelos matemáticos

Probeta	Termocupla	T_{exp}	T_{Ros}	T_{Ad}	T_{prom}	$\% Error$
3	T3	319.8	316.39	329.72	323.06	0.55
	T4	226.2	196.18	194.59	195.38	6.58
5	T3	381.6	359.05	364.13	361.59	3.15
	T4	313.1	220.44	215.42	217.93	19.38
6	T4	245.3	231.26	222.02	226.64	3.73
10	T4	245	235.29	217.95	226.62	3.68

Se obtuvieron aproximaciones muy altas y errores muy pequeños en las temperaturas pico, a excepción de la T_4 de la probeta 5 donde el error es considerable. Sin embargo, estas cifras muestran que los modelos si se aproximan a la realidad del proceso.

En las gráficas de la Figura 4.18, se puede ver que los ciclos térmicos obtenidos experimentalmente no son muy parecidos a los del modelo de Rosenthal. Esto se debe a que Rosenthal hace algunas suposiciones que no siempre se cumplen. La suposición que más influye en el modelo es que siempre se entrega calor desde una fuente. Por lo tanto, durante toda la simulación de 100 segundos, se supone que siempre existe una fuente de calor activa, y por eso las curvas de ciclos térmicos no coinciden entre ellas en su parte de enfriamiento, ya que en la realidad, solamente se realizó un cordón de 60mm de largo y se desactivó el arco.

Otra suposición que afecta el modelo es que no toma en cuenta la geometría total de la probeta, sino solamente el espesor, lo que genera variaciones entre los datos experimentales y los datos teóricos.

El modelo tampoco considera que las propiedades físicas son dependientes de la temperatura y también se omite las pérdidas de calor por convección y radiación.

4.6. Limitaciones y Restricciones

Durante el desarrollo de la investigación se encontraron algunas limitaciones y restricciones en varias situaciones, además de las que ya se explicaron en el capítulo anterior. A continuación se detallan estas limitaciones divididas por temas específicos:

– Probetas

- El corte de las probetas no fue exacto en su totalidad; las probetas variaban en su tamaño nominal por 2.5 mm máximo.
- Cuando se rectificaron las probetas, igualmente se cambió el tamaño del espesor, el cual en promedio tenía una variación de ± 1 mm entre todas las probetas.

–Medición de Temperaturas

- El tiempo de respuesta de las termocuplas es de alrededor de 1 o 2 segundos, por lo tanto se pierde certeza en las temperaturas obtenidas experimentalmente.
- El tiempo de adquisición de datos del termómetro es cada segundo, por lo que se pierden algunos datos de temperatura que ocurren entre cada segundo.
- Las termocuplas deben ser aisladas eléctricamente cuando están siendo usadas, ya que los canales en el termómetro no están aislados entre ellos; por lo que se debe usar cemento de alta temperatura que aísla eléctricamente pero no térmicamente.

– Medición de Corriente y Voltaje de Arco

- El voltaje y la corriente de arco no son constantes todo el tiempo, y varían mucho durante la soldadura. Esto depende de muchos factores tales como la longitud de arco, la estabilidad de arco, la alimentación de electrodo, etc.
- Debido a la variación de los valores de voltaje y corriente, siempre se tomó como dato el valor medio que sucedió durante la ejecución del cordón.

– Variables de Soldadura

- La combinación entre voltaje y corriente escogidos para realizar el trabajo no siempre producían un arco eléctrico estable.
- Los valores de voltaje menores a 12V siempre creaban un arco muy inestable, y en consecuencia, un cordón de muy baja calidad.
- Cuando se necesitaban corrientes elevadas, es decir, velocidad de alimentación alta, la longitud de arco también debía incrementarse un poco, ya que en caso contrario el electrodo quedaba pegado durante el arco eléctrico, que resultaba en una aglomeración del material de aporte en un solo punto, y con riesgo de dañar la antorcha, el robot, la cámara de soldadura, o la máquina soldadora.

– Metalografías

- Las micrografías obtenidas fueron de buena calidad para un aumento de 50x, sin embargo, para el aumento de 1000x no se logró los resultados deseados, debido a que no se cuenta con el microscopio adecuado para la obtención de dichas imágenes.

– Modelos Teóricos

- Los modelos teóricos no cumplen exactamente con lo que se realizó en las pruebas, ya contienen suposiciones que alejan el proceso de la realidad.
- El modelo de Rosenthal supone que siempre existe una fuente entregando calor, y es por esto que las curvas llegan a un estado estable con una temperatura relativamente alta ($> 100^{\circ}\text{C}$). Esto no pasa en la realidad, ya que el arco eléctrico se apaga después de realizar el cordón de 60mm de largo.
- El modelo considera que las propiedades físicas son constantes y que no existen pérdidas de calor por convección y radiación.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se cumplió con todos los objetivos planteados al iniciar el proyecto.
- La antorcha de soldadura GMAW fue acoplada al brazo robótico, y el sistema es capaz de realizar cordones de soldadura según especificaciones del usuario.
- El robot mueve el efector final a las posiciones deseadas, enciende y apaga el arco eléctrico de manera automática.
- El acople de la antorcha al robot es robusto y mantiene a la antorcha en su lugar, por lo que no tiene ningún efecto negativo en la ejecución de la soldadura.
- El espacio de trabajo fue adecuado y mejorado para proteger la maquinaria del laboratorio, a los operadores y usuarios del mismo.
- Se realizó un análisis cinemático del robot y sus articulaciones, el cual permitió calcular las posiciones de articulaciones y cartesianas, velocidades de articulaciones y trayectorias para el efector final.
- El análisis cinemático puede servir para un futuro trabajo de control del robot con software propio, para poder llegar a un nivel más alto de control, tal como el control adaptivo.
- La programación propia en MatLab, con la ayuda de los toolboxes de robótica, se probó que es completamente funcional y que es una muy aproximada representación del robot real.
- La programación en Scorbace y VBS es de muy alta calidad, ya que cumple de manera automática con varias tareas necesarias para el funcionamiento y ejecución de la soldadura.

- El programa en Scorbace es capaz de realizar cordones a velocidades de avance y longitudes diferentes especificadas por el usuario.
- El tiempo de trabajo y la calidad de suelda del robot soldador presenta una mayor ventaja en relación a la soldadura manual.
- El espacio de trabajo del robot es muy reducido, sin embargo, el robot puede trabajar sin ningún problema cuando se trata de soldadura de tamaño pequeño.
- La antorcha y su cable son relativamente pesados, pero el robot puede manejar esos pesos sin sobrecargarse.
- El software Scorbace ofrece un control de trayectoria para el robot, no obstante, para el proceso de soldadura sería óptimo un control adaptivo o de seguimiento de juntas mediante sensores.
- Las probetas, cortadas con proceso Oxicorte, fueron tratadas térmicamente para volver a tener una microestructura sin esfuerzos residuales para que no afecte el posterior análisis metalográfico.
- Se ubicaron termocuplas en los lugares de interés para obtener datos experimentales acerca del proceso. Algunas de ellas se fundieron durante el arco eléctrico, pero aún así entregaron datos válidos.
- Se obtuvieron ciclos térmicos para cada termocupla usada en las probetas, con un tiempo de muestreo de 1 segundo entre cada dato guardado.
- Los resultados de la investigación demuestran que mientras la velocidad de avance del material es menor, la calidad del cordón y su microestructura obtienen las mejores propiedades.
- A medida que la velocidad de avance aumenta, el tiempo de enfriamiento disminuye. Esto se debe a que el arco eléctrico actúa menos tiempo a lo largo del material, y por lo tanto, el calor se disipa a una tasa mayor y el material fundido se enfría lentamente, mejorando las propiedades finales de la suelda.

- Mientras la velocidad de avance aumenta, el ancho del grano columnar disminuye. Esto ocurre por la misma razón explicada en el punto anterior; la solidificación del material fundido sucede más rápido cuando la velocidad de avance es mayor, y por lo tanto, los granos precipitan rápidamente y con menor tamaño. Esto reafirma los resultados y demuestra que las propiedades mecánicas mejoran.
- Los modelos teóricos de Rosenthal y Adams ayudan a prever temperaturas en posiciones cercanas a la línea de fusión, sin embargo, no siempre van a ser exactas o posibles, debido a las suposiciones hechas para llegar a las ecuaciones.
- Los modelos de Rosenthal y Adams presentan buenas aproximaciones con los datos obtenidos experimentalmente, correspondientes a temperaturas pico T_p . El error promedio entre los datos experimentales y teóricos es de 6%, y éste puede ser causado por las suposiciones hechas en los modelos teóricos, una mala toma de temperaturas experimentales, la variación de las propiedades físicas del material con la temperatura (k, α, ρ, C), etc.
- El modelo de Rosenthal supone que siempre existe una fuente entregando calor, y es por esto que las curvas llegan a un estado estable con una temperatura relativamente alta ($> 100^\circ\text{C}$). Esto no pasa en la realidad, ya que el arco eléctrico se apaga después de realizar el cordón de 60 mm de largo, y por eso la curvas experimentales llegan a una temperatura menores.
- El sistema robótico de soldadura cumple con lo necesario para realizar cordones de soldadura de buena calidad.

5.2. Recomendaciones

- El operador, usuario u observador del sistema robótico soldador debe siempre usar el equipo de protección personal (EPP) y elementos de seguridad industrial para hacer funcionar o analizar el trabajo del robot sin ningún riesgo para su salud.

- Se debe fijar o evitar mover la mesa de la cámara de soldadura ya que las posiciones del robot están guardadas con respecto a la posición actual de ella, y un cambio mínimo significará que las posiciones dejan de ser las de trabajo.
- Si se realiza cualquier cambio en el robot o su efector final, el modelo matemático presentado deja de ser válido, ya que éste fue calculado a partir de la geometría y medidas existentes y presentadas.
- El software Scorbace ofrece un control de trayectoria para el robot, no obstante, para el proceso de soldadura sería óptimo un control adaptivo o de seguimiento de juntas mediante sensores.
- Para un proceso de soldadura, se debería tener un control adaptivo de trayectoria, por lo que en un futuro se debería plantear este tema como un proyecto de tesis para ser desarrollado.
- Cuando se trabaja con termocuplas en el área cercana a la zona de fusión, se debe aplicar un poco de cemento de alta temperatura para evitar que las termocuplas se queden fundidas con el material.
- El trabajo de toma de datos y mediciones debería ser realizado por dos personas, ya que es necesario chequear el desempeño del robot, el arco, y la máquina soldadora, además de los equipos de medición (pinza amperimétrica, multímetro, termómetro, etc.).
- El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito debería contar con un laboratorio de ciencia de materiales y metalografías, ya que se realizan muchos estudios e investigaciones en relación a esos temas, en los que se necesitan ciertos equipos que la USFQ no posee y como consecuencia, es necesario realizar el trabajo y pagar por el uso del equipo en otras universidades.
- Los modelos teóricos de Rosenthal y Adams son aproximaciones pero no son exactamente los mismos, por lo tanto, se debería realizar el modelamiento matemático mediante elementos finitos con las mismas condiciones y acciones realizadas en el proceso real, para poder obtener datos comparables con los experimentales.

- El proyecto va a continuar por otros alumnos de la Universidad San Francisco de Quito, en el cual se van a realizar modelos mediante el método de elementos finitos (FEA).
- Se debería continuar con la investigación y el desarrollo de la robótica y automatización en el país para mejorar la productividad y calidad de los productos ecuatorianos, así poder sobresalir en el mercado internacional con precio y calidad competitivos.

Apéndice

A. Especificaciones Técnicas Scorbot ER 9Pro

Los siguientes datos, figuras y tablas fueron tomados del manual del robot Scorbot ER 9Pro [33].

A.1. Especificaciones Generales

Tabla A.1. Especificaciones. Fuente [33].

Robot Arm Specifications	
Mechanical Structure	Vertical articulated, enclosed casting
Number of Axes	5 plus gripper
Axis Range	<ul style="list-style-type: none"> • Axis 1: Base rotation: 270° • Axis 2: Shoulder rotation: 145° • Axis 3: Elbow rotation: 210° • Axis 4: Wrist pitch: 196° • Axis 5: Wrist roll: 737°
Speed: Effective Speed, Maximum Speed	<ul style="list-style-type: none"> • Axis 1: Base rotation — 80°/sec, 140°/sec • Axis 2: Shoulder rotation — 69°/sec, 123°/sec • Axis 3: Elbow rotation — 77°/sec, 140°/sec • Axis 4: Wrist pitch — 103°/sec, 166°/sec • Axis 5: Wrist roll — 175°/sec, 300°/sec
Maximum Operating Radius	691mm (27.2") without gripper
End Effector: options:	Pneumatic Gripper Electric DC Servo Gripper
Homing	Optical switch and encoder index pulse on each axis
Feedback	Incremental optical encoders with index pulse on each axis
Actuators	24VDC servo motor on each axis
Transmission	Harmonic Drive gears and timing belts
Maximum Payload	<ul style="list-style-type: none"> •5kg (11 lb) (with reduced acceleration) •2kg (4.4 lb) (Full speed) (including gripper)
Position Repeatability	±0.05mm (0.002")
Weight	53.5 kg (117.7 lb)
Ambient Operating Temperature	2° - 40°C (36° - 104°F)

A.2. Motores

Por los requerimientos y limitaciones del trabajo, el robot funciona con dos tipos de motores dependiendo de cada uno de los ejes, y sus características se presentan en la siguiente tabla.

Tabla A.2. Especificaciones de los motores del robot. Fuente [33].

	Motor Axes 1, 2, 3	Motor Axes 4, 5
Peak Rated Torque	143 oz.in	27.8 oz.in
Rated Torque	32 oz.in	12.5 oz.in
Maximum Operating Speed	4000rpm	4500rpm
Weight	1.29k / 2.84lb	0.28k / 0.62lb

A.3. Sistema de Reducción Harmonic Drive

Este sistema de reducción tiene cuatro componentes importantes (Figura A.1a):

- Circular spline: es un aro sólido de acero dentado interiormente, y sujeto al eslabón en el que se requiere el movimiento final de un determinado motor.
- Wave generator: es un disco sólido elíptico, que se mueve directamente con el eje del motor.
- Flexspline: es un cilindro flexible muy delgado, dentado exteriormente. Transmite el movimiento mediante sus dientes.
- Dynamic spline: es un cilindro sólido de acero con dientes internos.

Cuando el Wave generator gira, por su forma elíptica, deforma al Flexspline y hace que con sus dientes toque en dos puntos del Circular spline, éste a su vez realiza un giro mínimo en comparación con el giro del Wave generator. En la Figura A.1b se muestra un ejemplo de cómo funciona el sistema y como se reduce la velocidad de giro. En el ejemplo, se distingue claramente que después de una rotación completa del Wave generator, el Circular spline solo se movió la rotación equivalente a dos dientes.

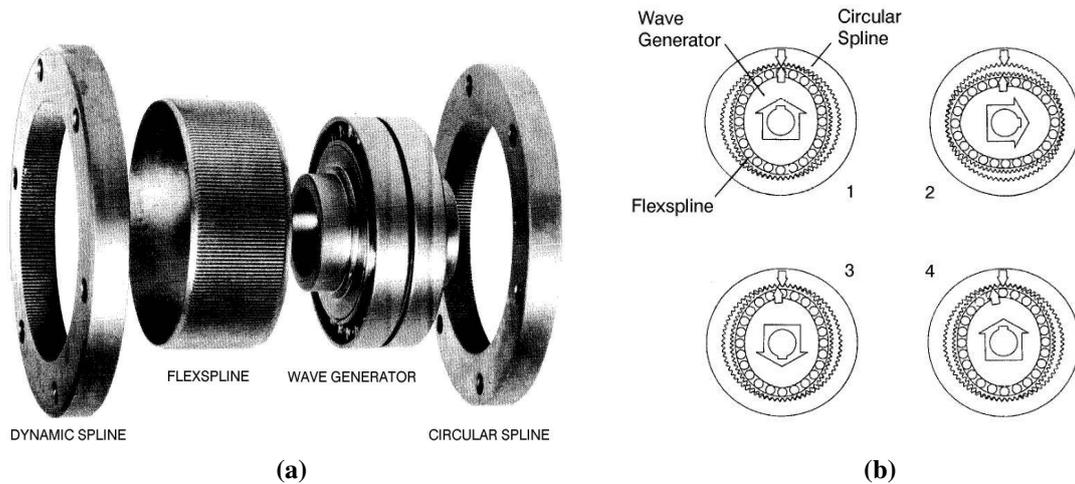


Figura A.1. Sistema de reducción mecánica Harmonic Drive. Fuente [33]. **a)** Componentes del sistema. **b)** Funcionamiento del sistema.

A.4. Encoders

Los encoders usados en el Scrobot ER 9Pro contienen un solo LED como fuente de luz. Opuesto al LED se ubica un circuito integrado de detección de luz (Figura A.2b), que contiene varios foto-detectores con circuitos que producen una señal digital. Mientras el disco del encoder (Figura A.2a) gira, el haz de luz del LED se interrumpe y no llega a los foto-detectores. Esto da como resultado una serie de pulsos recibidos, que después son alimentados mediante un circuito de procesamiento de señal y generan las señales A , \bar{A} , B , \bar{B} , I y \bar{I} .

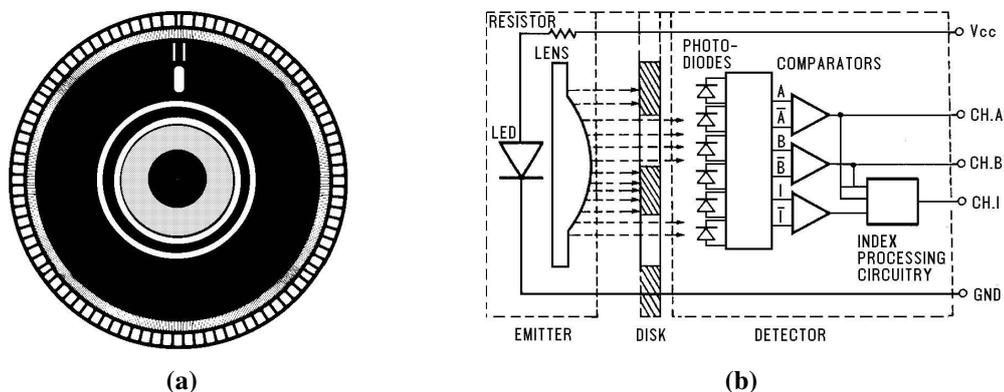


Figura A.2. Esquemización del sistema de encoders. Fuente [33]. **a)** Disco perforado del encoder. **b)** Circuito del encoder.

Finalmente, los comparadores reciben las señales y producen tres salidas digitales para los

canales A, B e I. Los canales A y B tienen un desfase de 90 grados que indica el sentido de giro: si A llega primero que B, el sentido es anti horario, e inversamente, el sentido de giro es horario si B lidera a A.

B. Especificaciones Técnicas GALA MIG 1810

Los siguientes datos, figuras y tablas fueron tomados del manual de la Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810 [46].

B.1. Especificaciones Generales

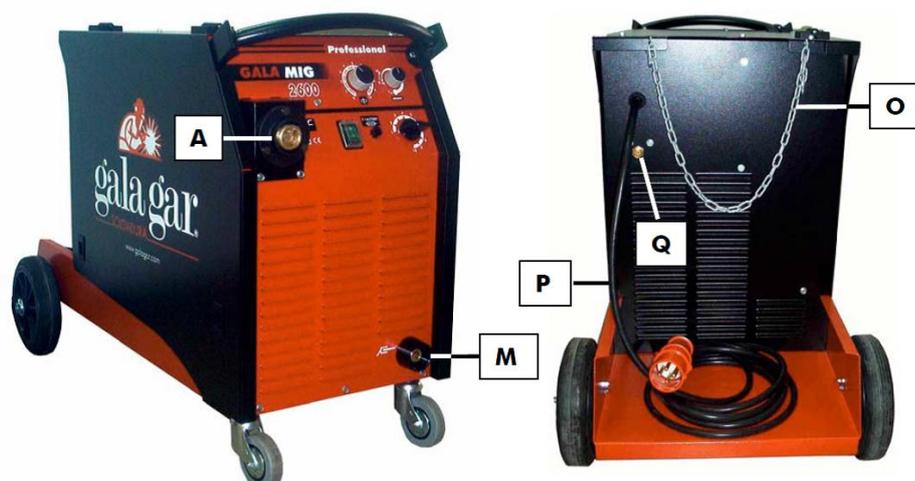
Tabla B.1. Especificaciones. Fuente [46].

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Ref. 53100000
	GALA MIG 1810
Tensión de entrada U_1 (50/60hz)(1)	(1 Ph) 230 V
Intensidad máxima de entrada I_{1max}	25 A
Intensidad efectiva de entrada I_{1eff}	15 A
Margen de regulación continuo $I_{2min} \div I_{2max}$	25 ÷ 150 A
Intensidad de soldadura equivalente al 35%.	150 A
Intensidad máxima de soldadura I_{2max} .	150 A / 35%
Tensión de soldadura $U_{2min}-U_{2máx}$.	17.5-35 V
Número de escalonamientos U_2	7
Diámetros de hilo aplicables. (mm)	0.6-0.8
Velocidad máxima de hilo.	15 m/min
Aislamiento térmico.	H (180° C)
Ventilación.	FORZADA
Dimensiones totales (▲ → ↗) mm.	685x532x900
Aplicación soldadura por puntos (SPOT).	SI
Peso.	69 Kg

B.2. Mandos de Operación

En la Figura B.1 se pueden apreciar los distintos mandos para el correcto funcionamiento de la soldadora.

- A: Conector hembra para la antorcha de soldadura.
- M: Toma de masa para la soldadura MIG.



(a)



(b)

Figura B.1. Soldadora Gala Gar GALA MIG 1810. Fuente [46]. **a)** Conexiones en la unidad principal de la soldadora. **b)** Panel de control de la soldadora.

- O: Cadena de seguridad para sujeción de la botella de gas.
- P: Cable de alimentación eléctrica.
- Q: Entrada de gas de protección.
- B: Potenciómetro para el control de la velocidad de salida del electrodo.
- C: SPOT TIME: Potenciómetro para el control del tiempo de soldadura.
- D: Conmutador selector de la tensión de soldadura.
- E: Portafusibles.
- F: Indicador de sobrecarga térmica.
- G: Interruptor general ON/OFF luminoso.

C. Especificaciones Técnicas Controlador USB-Pro

Los siguientes datos, figuras y tablas fueron tomados del manual del Controlador USB-Pro [35].

C.1. Especificaciones Generales

Tabla C.1. Especificaciones. Fuente [35]. (*continúa*)

Item	Specification
Storage Temperature	-20°C-85°C (-4°F-185°F)
Ambient Operating Temperature	0°C-55°C (32°F-131°F)
Ambient Temperature for Long-term Reliability	45°C (113°F) max.
Storage Humidity	35%-65%
Operating Humidity	35%-90%
Vibration	0.5G (4.9m/s ²)
Condensation and Freezing	None
Type of control	Real-time; PID; PWM
Servo axis drivers	8 axes for robot and peripherals
Path control	Joint; Linear; Circular
Speed control	10 speed settings; Travel time definitions
Control parameters	160 parameters, many are user-accessible; Servo control; PID; speed; velocity profile; axis position error; gripper operation; impact; limit protection; homing; Cartesian calculations.
Power requirements	110-220 VAC ±10%, 50-60Hz, 1000 W
Internal power supplies	Servo: 48V Digital: 5V/12V/24V
MicroController	MicroController ARM7TDMI Processor: 32-bit RISC Architecture with 256 Kbytes of Internal High-speed Flash
Communication	USB type A cable connection to PC; Plug and play without rebooting; Integrated RS232 for Teach Pendant;

Tabla C.1. (continuación) Especificaciones. Fuente [35].

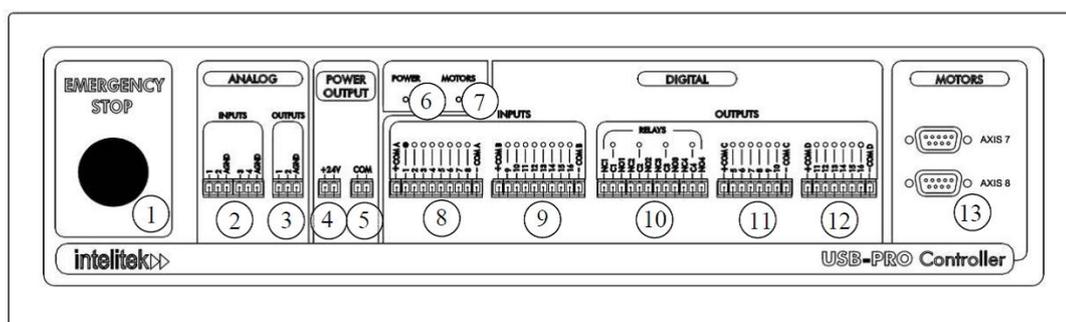
Inputs	16 digital inputs: 24V max., Sink/Source configurable; 4 analog inputs: input voltage 0-10V
Outputs	16 digital outputs: 24V max.; 4 relays; 12 open collector, sink/source configurable; 2 analog outputs: output voltage 0-10V
User power supply	12 VDC (1A) and 24 VDC (2A) terminals, for connection of remote switches, sensors, etc.
Programming	Scorbase for ER 9Pro/ER 14Pro software, with Multi tasking – Up to 100 concurrent programs; In-program parameter manipulation.; Built in Scripting; ON line Graph With PWM and position error; Robocell for ER 9Pro/ER 14Pro: 3D simulation software (optional); Teach Pendant for Controller USB and USB-Pro: (optional); Programming Interface
Position definition	XYZ coordinates; Joint coordinates (degrees); Encoder counts; Absolute and relative positions; In program position manipulation
LED indicators	Main power, power on, communicating with PC; Motor on; Digital Inputs / Digital Outputs; Emergency
Weight	7.5 kg (16.5 lb)
Dimensions	460x140x245 mm (18.1''x5.5''x9.6'')
Operating temperature	2° - 40°C (36° - 104°F)
Safety features	Certified for CE safety compliance; Emergency Button on Controller front panel/ Teach Pendant/remote; Input/Output short-circuit protection; Over-current protection; Communication error; impact; thermic overload

C.2. Paneles y Puertos de Conexión

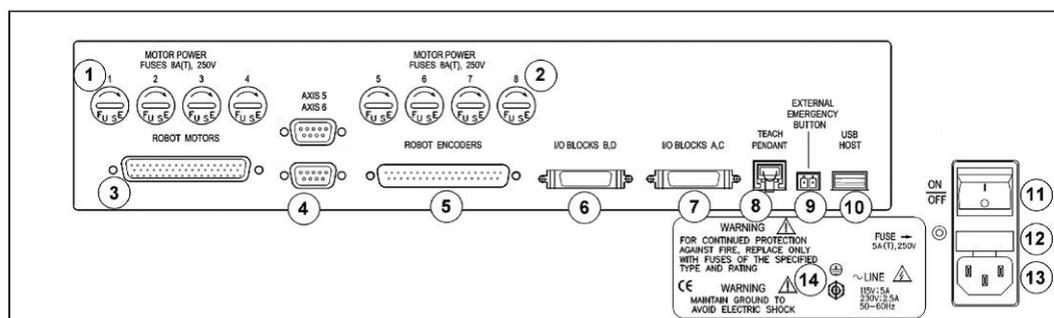
El panel frontal del controlador (Figura C.1a) tiene las siguientes conexiones:

1. Botón de emergencia
2. Entradas análogas 1 a 4
3. Salidas análogas 1 y 2
4. Salida de poder para el usuario de 24 VDC

5. Terminal común de la salida de poder para el usuario de 24V
6. Indicador del estado del controlador
7. Indicador del estado de los motores
8. Entradas digitales 1 a 8
9. Entradas digitales 9 a 16
10. Salidas digitales (de relé) 1 a 4
11. Salidas digitales (de Open Collector) 5 a 10
12. Salidas digitales (de Open Collector) 11 a 16
13. Conectores para ejes auxiliares 7 y 8



(a)



(b)

Figura C.1. Controlador Intelitek USB-Pro del robot. Fuente [35]. **a)** Panel frontal de conexiones. **b)** Panel trasero de conexiones.

El panel posterior del controlador (Figura C.1b) tiene las siguientes conexiones:

1. Fusibles de Motores en ejes 1 al 4
2. Fusibles de Motores en ejes 5 al 8
3. Conexión de poder para los motores del robot
4. Conectores para ejes auxiliares 5 y 6
5. Conexión de los encoders del robot
6. Bloques B y D de I/O

7. Bloques A y C de I/O
8. Conexión para Teach Pendant
9. Conexión para botón de emergencia externo
10. Conector USB Host
11. Switch de poder ON/OFF
12. Fusible para la entrada de energía
13. Conector para energía
14. Terminal para Tierra

C.3. Circuitos de Conexión

En el proyecto se utilizaron 2 entradas digitales, 3 salidas digitales, 1 entrada análoga y la fuente de poder de 24 VDC. Para el correcto funcionamiento de las entradas y salidas, fue necesario realizar los siguientes circuitos eléctricos.

C.3.1. Entradas Digitales

Para las entradas, el controlador está configurado en modo de funcionamiento “Source” y Fuente de Poder Interna. El circuito de conexión está descrito en la Figura C.2.

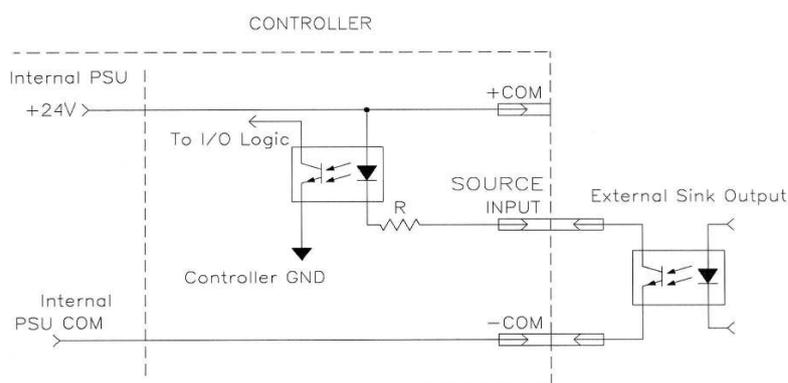


Figura C.2. Circuito para las entradas digitales. Fuente [35].

Para los pulsadores de la caja de control, se utilizaron las entradas digitales 15 y 16, y se aprovechó un solo terminal común “-COM B”.

C.3.2. Salidas Digitales

El controlador maneja dos tipos de salidas digitales: salidas tipo Relé (1–4) y salidas tipo Open Collector (5–16). Es más fácil usar las salidas tipo Relé, ya que se encuentran en su estado final y pueden funcionar hasta con corrientes de 5 A (Figura C.3a). Antes de empezar el proyecto, el controlador estaba utilizando 3 de las 4 salidas Relé en otras tareas, por lo tanto se debieron usar las salidas de tipo Open Collector.

Para este tipo de salidas, el controlador está configurado en modo de funcionamiento “Sink” y Fuente de Poder Interna. El circuito de conexión se muestra en la Figura C.3b.

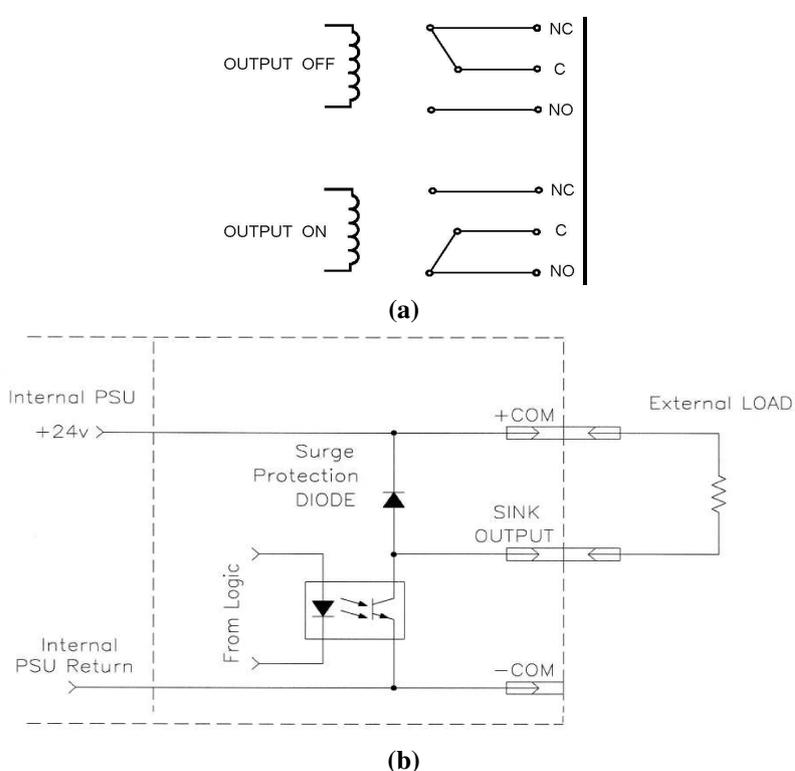


Figura C.3. Circuitos necesarios para las salidas digitales. Fuente [35]. **a)** Tipo Relé. **b)** Tipo Open Collector.

Las salidas tipo Open Collector emplean un transistor en este modo, por lo tanto su corriente se limita a 200 mA, por esta razón se debe destinar un relé intermedio para poder trabajar en aplicaciones con corrientes más altas. Cuando se conectan estos relés intermedios o solenoides, es necesario conectar también un diodo en sentido contrario para evitar descargas hacia el transistor cuando se apaga la salida.

Para el funcionamiento de la caja de control, se utilizaron las salidas digitales 11, 12 y 13, y se aprovechó un solo terminal común “+COM D”.

C.3.3. Entradas Análogas

Este tipo de entradas leen señales entre 0 y 10 VDC, y son convertidas a señales digitales con una resolución de 8 bits.

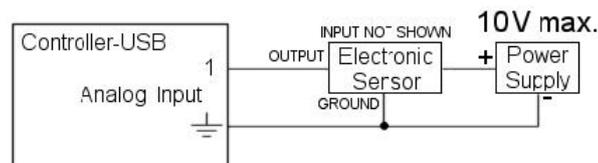


Figura C.4. Circuito para las entradas análogas. Fuente [35].

Para el proyecto, se efectuaron pruebas simulando un sensor de corriente en este tipo de entradas, pero no fue posible adaptarlo por las razones explicadas en la Sección 3.4.9.

D. Especificaciones Técnicas Equipo de Medición de Temperaturas

Los siguientes datos, figuras y tablas fueron tomados de los manuales de cada producto desde la página web del fabricante **omega.com**[®].

D.1. Especificaciones Generales Termómetro RDXL4SD

El modelo RDXL4SD es un termómetro/registrador de datos con opción de hasta 4 canales diferentes de temperaturas, con las especificaciones de la Tabla D.1.

Tabla D.1. Especificaciones. Fuente [36]. (*continúa*)

SPECIFICATIONS

Embedded Microcontroller:
Custom one-chip LSI device

LCD Display: 82 x 61 mm
(3.23 x 2.40") with green color backlight

4 Channels: T1, T2, T3, T4, T1-T2

12 Channels: T1, T2, T3, T4, T5, T6,
T7, T8, T9, T10, T11 and T12.

Sensor: Type J, K, T, E, R/S
thermocouple probe Pt100 Ω (european
curve) for RDXL4SD model only

Resolution: 0.1/1°C or °F

Sampling Time: 1 to 3600 seconds

Memory Card: SD memory card
1 to 16 GB

Offset Adjustment: Available for
Type K, J, T, E, R/S and Pt100 Ω

Memory Recall: Max and min value

Sampling Time of Display:
Approx 1 second

Data Output: RS232/USB PC
computer interface

Power Off: Auto shut off saves battery
life or manual off by push button

Operating Temperature: 0 to 50°C
(32 to 122°F)

Operating Humidity: Less than
85% RH

Power Supply: Alkaline or heavy-duty
DC 1.5V battery (UM3, AA) x 6 "AA",
(RDXL4SD) or 8 "AA" (RDXL12SD)

Power Current: Approx DC 30 mA

Weight: 489 g (1.08 lb)

Dimensions: 177 H x 68 W x 45 mm D
(7 x 2.7 x 1.9")

D.2. Especificaciones Generales de las Termocuplas

Las termocuplas usadas en el proyecto son del fabricante **omega.com**[®] y fueron los siguientes modelos:

- CHAL-032-BW (Sin recubrimiento)

Tabla D.1. (continuación) Especificaciones. Fuente [36].

Sensor Type	Resolution	Range	Accuracy*
K	0.1°C	-50.1 to -999.9°C	±(0.4% + 1°C)
	1°C	1000 to 1300°C	±(0.4% + 1°C)
	0.1°F	-58.1 to -999.9°F	±(0.4% + 1.8°F)
	1°F	1000 to 2372°F	±(0.4% + 2°F)
J	0.1°C	-50.1 to -999.9°C	±(0.4% + 1°C)
	1°C	1000 to 1150°C	±(0.4% + 1°C)
	0.1°F	-58.1 to -999.9°F	±(0.4% + 1.8°F)
	1°F	1000 to 2102°F	±(0.4% + 2°F)
T	0.1°C	-50.1 to -400°C	±(0.4% + 1°C)
	0.1°F	-58.1 to -752°F	±(0.4% + 1.8°F)
E	0.1°C	-50.1 to -900°C	±(0.4% + 1°C)
	0.1°F	-58.1 to -999.9°F	±(0.4% + 1.8°F)
	1°F	1000 to 1652°F	±(0.4% + 2°F)
RS	1°C	0 to 1500°C	±(0.4% + 1°C)
	1°F	32 to 2732°F	±(0.4% + 2°F)

* Accuracy value is specified for the meter only at 23°C (73.4°F).

- 5TC-GG-K-20-36 (con recubrimiento de fibra de vidrio *Glass Braid*)
- SC-TT-K-30-36-PP (con recubrimiento de teflón *PFA*)

Estas termocuplas son de tipo *K* (código ANSI), con un rango de temperaturas entre -200°C y 1250°C , con una tolerancia de 1.1°C o 0.4% . Sin embargo, las temperaturas máximas de trabajo dependen del recubrimiento de las termocuplas. El *PFA* tiene una temperatura máxima de trabajo continuo de 260°C ; y por su lado el recubrimiento *Glass Braid* tiene un máximo de 482°C . Para esta aplicación en que las temperaturas altas son de poca duración (menos de 2 segundos), los tres tipos de termocuplas sirvieron para el trabajo.

E. Panel y Circuito de Control

E.1. Introducción

Como se explicó en la Sección 3.3, el panel de control y su circuito se desarrollaron e implementaron para tener señalización, control e interacción entre el operador, el software, el controlador y la máquina de soldadura.

El panel de control cuenta con 5 elementos:

– Dos pulsadores

- Uno verde (P1), para iniciar cada ciclo de trabajo. Este pulsador tiene solo un contacto NO.
- Uno rojo de emergencia con retención (P2), para detener la ejecución del programa, parar el robot y, si fuera necesario, apagar el arco eléctrico de soldadura. Este pulsador tiene dos contactos diferentes, un NO y otro NC.

– Tres luces piloto de 110 VAC

- Una verde (L1), que se enciende cuando el robot está listo para trabajar.
- Una amarilla (L2), que se enciende cuando se está soldando.
- Una roja (L3), que se enciende cuando ha finalizado el programa o cuando surja una emergencia.

Para el desempeño funcional y seguro de este panel con los demás equipos, se emplearon 5 relés intermedios, uno de 110 VAC y cuatro de 24 VDC, considerando corrientes y voltajes de trabajo tanto de salidas del controlador como de la máquina soldadora. Así entonces, se realizó el circuito electrónico explicado en la siguiente sección.

Los relés son de diferentes tipos:

- Relé (K1), se enciende con 110 VAC y tiene 3 pares de contactos NO y NC con su respectivo terminal común.
- Relé (K2), (K4) y (K5) se encienden con 24 VDC, y tienen un par de contactos NO y NC con su respectivo terminal común.

- Relé (K3), se enciende con 24 VDC, y tiene 2 pares de contactos NO y NC con su respectivo terminal común.

E.2. Circuito de Control

Para conectar los pulsadores al controlador, solamente se siguió los circuitos explicados en el manual del controlador (figura C.2 en la página 131). La Figura E.1 muestra las conexiones de los dos pulsadores.

El modo de funcionamiento es simple; cuando el pulsador cierra el contacto, la señal llega al controlador y enciende la entrada digital.

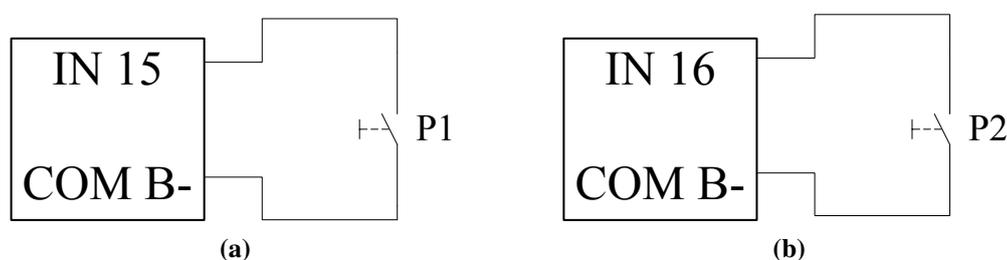


Figura E.1. Conexión de los pulsadores. **a)** Pulsador verde (P1). **b)** Pulsador de emergencia (P2).

Para lograr que las salidas del controlador enciendan las luces y activen el contactor de la soldadora, se utilizaron los mencionados relés intermedios. Estos se conectaron de la forma indicada por el manual del controlador, y su circuito se muestra en la Figura E.2.

El modo de funcionamiento es igual de simple; cuando la salida se enciende, la bobina del relé se energiza, cambiando de estado sus contactos. El caso especial es el relé de soldadura, ya que para que éste pueda ser energizado, necesita que la salida del controlador a la que está conectado se encienda y además que el relé K1 también esté energizado y cierre su contacto.

Esto se debe a que el relé K1 está conectado en serie con el contacto NC del pulsador de emergencia P2 (Figura E.3). Por lo tanto, en caso de emergencia, cuando el pulsador rojo de emergencia es presionado, es necesario que el arco de soldadura se apague, y por ende, el relé K3 que controla la activación debe ser desenergizado.

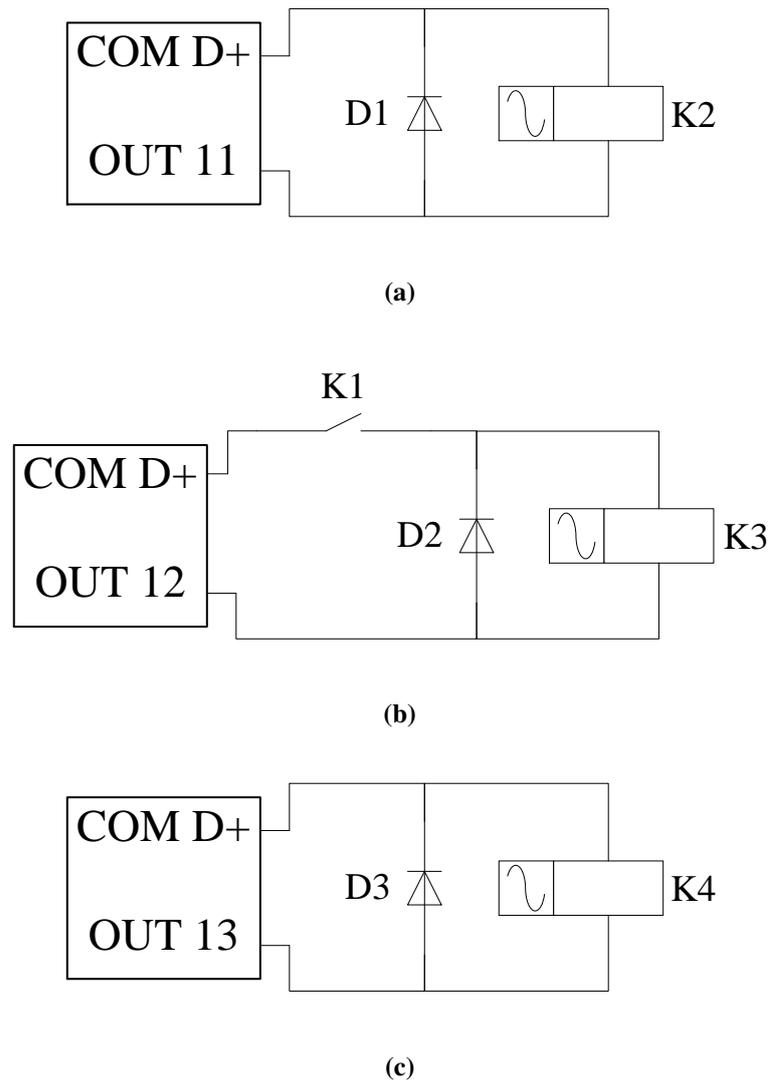


Figura E.2. Conexiones de las salidas del controlador para la caja de control. **a)** Relé principal. **b)** Relé de soldadura. **c)** Relé de luz roja.

En el circuito de la Figura E.3, cuando el relé principal K2 se activa, energiza al relé de emergencia K1 y prende la luz verde L1. Cuando el robot empieza a soldar, se activa el relé K3, y debido a que el relé K1 está activado, se prende la luz amarilla L2. Finalmente la luz roja L3 se enciende cuando el relé K4 se activa o el K1 se desactiva. Lo primero ocurre cuando se acaba de realizar los trabajos del programa, y lo segundo sucede cuando el pulsador de emergencia ha sido presionado.

Para la activación del contactor de la máquina soldadora, se usó un último relé K5, el cual se encuentra fuera de la caja de control, ya que va conectado a los terminales del switch de

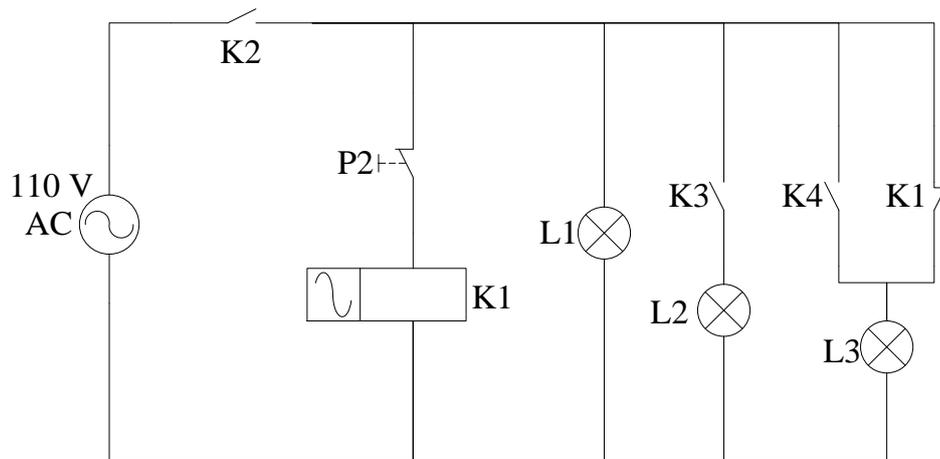


Figura E.3. Relé de emergencia y luces piloto

la antorcha, como se mostró en la figura 2.7b en la página 52, y su circuito se muestra en la Figura E.4. Este relé se activa únicamente cuando los relés K1 y K3 están activados al mismo tiempo, y se energiza mediante la fuente de 24 VDC del controlador.

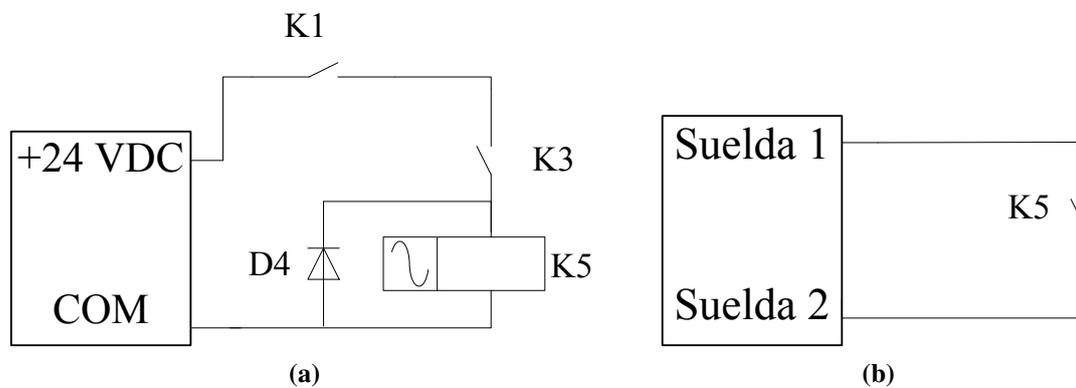


Figura E.4. Circuito de activación de la soldadora. a) Relé de soldadura. b) Conexión de los terminales de la antorcha.

Como información adicional, el circuito está diseñado específicamente para el programa realizado, en consecuencia, si no se coloca el panel de control, el programa no funciona.

De igual forma, el circuito se diseñó para que funcione conectado a una toma eléctrica de 110 VAC, si esto no sucede, el programa funciona pero no se ejecutará la soldadura.

Finalmente, el circuito fue diseñado para que cuando el sistema del robot y su controlador se apaguen, éste pueda quedar conectado tanto al controlador como a la fuente de 110 VAC

y sin causar ningún consumo de energía.

E.3. PCB

Para la implementación del circuito diseñado en la sección anterior se elaboró una PCB. En esta placa se soldaron relés, diodos y borneras para acoplarlos con los diferentes componentes como luces o pulsadores. La placa tiene un tamaño de $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$, y está dentro del panel de control, atornillada junto con el relé K1. Los diagramas de la placa y sus pistas se presentan en la Figura E.5.

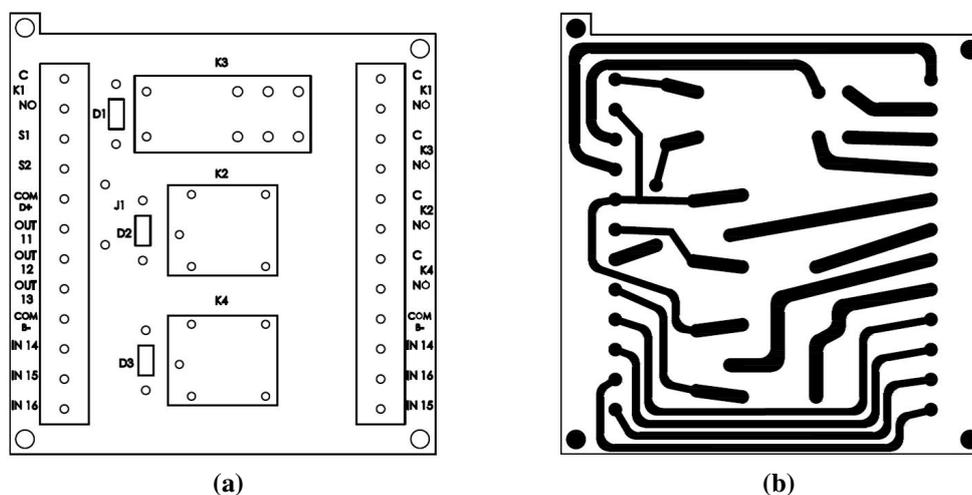


Figura E.5. Diseño de la PCB. **a)** Esquema de posiciones de los componentes en la placa. **b)** Esquema de las pistas de cobre.

E.4. Cableado

Como se muestra en la Sección E.2, se precisaron 10 cables que salgan desde el panel y se conecten al controlador, y otros dos para la toma de energía eléctrica a 110 VAC. Para mantener el orden y estética en la caja de control, se incluyó un conector de 15 pines y un cable de 10 hilos. De este modo, se tiene un solo cable con el conector de 15 pines, y en el otro lado el cable se abre y cada hilo se conecta a su respectiva entrada o salida del controlador. Los tipos de conectores y cables se muestran en la Figura E.6.

Los conectores y el cable de 110 VAC están a la venta en cualquier almacén de equipos electrónicos. Sin embargo, el cable de 10 hilos y su conector de 15 pines, fue fabricado



Figura E.6. Conectores para el panel de control. **a)** Conector de 15 pines. **b)** Conector y cable 110 VAC.

únicamente para el proyecto, por lo que, se espera que no sufra ningún desperfecto y funcione por largo tiempo.

El relé K5 fue ubicado fuera del panel de control ya que es conectado directamente a los terminales de la soldadora. Por razones de seguridad, se decidió conectar los contactos este relé con los terminales de la soldadora mediante un cable eléctrico grueso para prevenir altas corrientes desde la soldadora.



(a)



(b)

Figura E.7. Conexión final y completamente funcional. **a)** Conexión en la caja de control. **b)** Conexión en el controlador del robot.

F. Programación del Robot

F.1. Introducción

La programación de los comandos para que el robot funcione correctamente y realice las tareas requeridas para el proyecto fue realizada en el software Scorbace y además se utilizó la compatibilidad con Visual Basic Script por su facilidad en la realización de cálculos y en la interacción con el usuario mediante cuadros de diálogo.

El programa se encuentra guardado y debe ser ejecutado desde la computadora WS2 del Laboratorio de Robótica de la Universidad San Francisco de Quito. La carpeta “Suelda” en “Mis Documentos” debe contener 4 archivos, los cuales son necesarios para el apropiado funcionamiento del robot.

El archivo “Suelda.WS” es un archivo de proyecto de Scorbace, y por lo tanto, contiene datos acerca del proyecto y su ejecución, y es el único que debe ser abierto para iniciar la ejecución. Este archivo no debe ser modificado ni eliminado. El archivo “Suelda.SBP” contiene toda la programación y sus comandos, por lo tanto tampoco debe ser modificado ni eliminado.

El archivo “Suelda.PNT” contiene datos sobre las coordenadas de las posiciones guardadas necesarias para la ejecución del proyecto, por lo tanto este archivo debe estar en la misma carpeta y no ser modificado ni eliminado. El archivo “Suelda.VBS” es la programación en Visual Basic Script, y es necesario para la correcta ejecución del programa.

Asimismo, existen 2 archivos más, que son archivos de texto y brindan información al usuario acerca del funcionamiento y acciones que se han realizado durante las ejecuciones del programa. Estos dos archivos pueden ser movidos o eliminados de la carpeta sin tener ninguna repercusión en el funcionamiento del programa. El archivo “historia_ciclos.txt” es un archivo de texto que contiene los datos de las variables usadas para los diferentes ciclos realizados. El archivo puede ser abierto, copiado, movido o eliminado, pero no se debe modificar nada del texto.

Finalmente, el archivo “robot_log.txt” contiene el listado de los diferentes mensajes que Scorbace ha mostrado al usuario. Este archivo se crea por cada sesión de trabajo, por lo tanto, si se desea guardar los datos de alguna sesión específica, solo se podrá hacer al final de dicha sesión, caso contrario, los datos serán sobrescritos con los de la sesión más reciente.

Para que el programa funcione correctamente, la mesa de la cámara de soldadura no debe moverse en ningún momento ya que esto cambiaría totalmente las posiciones usadas. Igualmente, la placa de trabajo, de dimensiones 28 cm × 15 cm × 4 mm, debe ser perforada en las posiciones indicadas en la Figura F.1a, ubicada en la plancha con agujeros de la cámara de soldadura, y fijada con pernos en los puntos que muestra la Figura F.1b. Así se asegura que los cordones se realicen de la manera como fueron programados inicialmente.

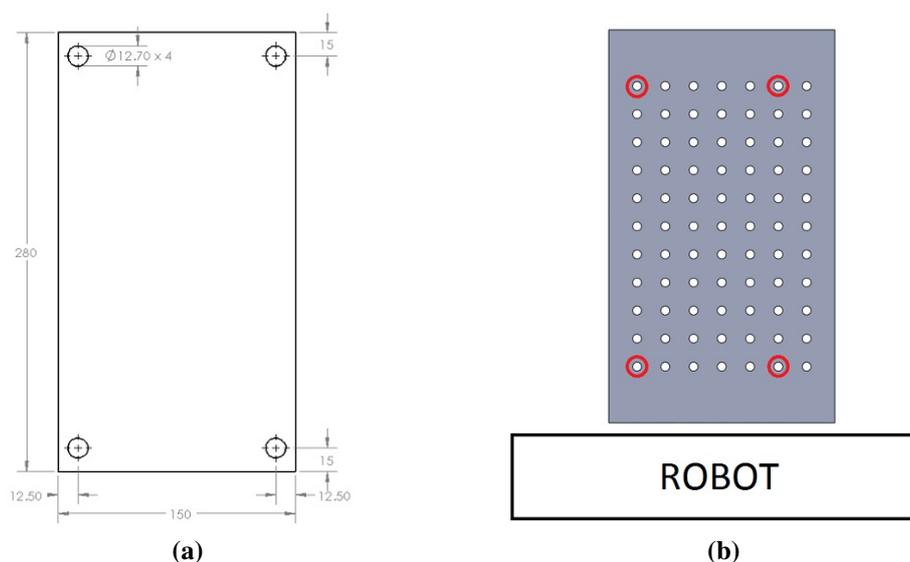


Figura F.1. Posiciones necesarias para la ejecución del programa. **a)** Perforación de la placa para su sujeción. **b)** Ubicación de la placa.

F.2. Programación Scorbace

Como se explicó en la Sección 3.4.1, antes de ejecutar el siguiente programa “Suelda”, el robot ya debe haber inicializado encoders mediante la rutina “HOME”  y tener colocada la antorcha de soldadura mediante la subrutina “COLOCAR/RETIRAR” con el icono “Run Subroutine” . Una vez cumplidas estas dos condiciones, se puede ejecutar el programa desde la línea 1, mediante el botón “Run Single Cycle” .

Código F.1 Programa en Scorbse

```

1 Remark: *****
2 Remark:           Suelta.SBP
3 Remark:           Programa para Scorbot ER 9Pro
4 Remark:           de la Universidad San Francisco de Quito
5 Remark:           en su aplicacion de soldadura.
6 Remark:
7 Remark:   Autor: Gustavo Tapia Imbaquingo
8 Remark:   Ultima Modificacion: Nov 21,2012
9 Remark: *****
10 INICIALIZACION:
11 Remark: ***** Cargar Archivo VBS *****
12 Load script file: SUELDA.VBS
13 Remark: ***** Variables *****
14 Set Variable INVERDE = 15
15 Set Variable INEMERGENCIA = 16
16 Set Variable OUTLUCES = 11
17 Set Variable OUTSUELDA = 12
18 Set Variable OUTROJO = 13
19 Remark: ***** Crear Archivo de Historia de Ciclos *****
20 Call Subroutine SCRIPT.CREAR_ARCHIVO
21 Remark: ***** Emergencia *****
22 Enable Input Interrupt INEMERGENCIA
23 On Input Interrupt INEMERGENCIA On Call Subroutine EMERGENCIA
24 Remark: ***** Apagar Salidas *****
25 Call Subroutine APAGAR_OUTS
26 Remark: ***** Posicion Inicial *****
27 Print to Screen & Log: Moviendo a Posicion Inicial
28 Go to Position 1 Speed 25 (%)
29 Remark: ***** Luces Control *****
30 Turn On Output OUTLUCES
31 Print to Screen & Log: Robot listo para trabajar
32 Remark: ***** Verificar Ciclo de Trabajo *****
33 Set Variable CICLO = SCRIPT.VERIFICAR_CICLO
34 Remark: *****
35 INICIO:
36 Remark: *****Velocidad, Longitud y tiempos por ciclo *****
37 Set Variable VELOCIDAD = SCRIPT.INPUT_VELOCIDAD
38 If VELOCIDAD < 0 Jump to ERROR
39 Set Variable LONGITUD = SCRIPT.INPUT_LONGITUD
40 If LONGITUD < 0 Jump to ERROR
41 Print to Screen & Log: Velocidad = 'VELOCIDAD' [/100] mm/s
42 Print to Screen & Log: Longitud de Cordon = 'LONGITUD' [/100]mm
43 Call Subroutine SCRIPT.CALC_TIEMPO(VELOCIDAD, LONGITUD)
44 Remark: ***** Esperar Puls Verde *****
45 Set Variable USUARIO = 0
46 Run Subroutine ALERTAR
47 Print to Screen & Log: Esperando confirmacion del usuario
48 Wait Until Digital Input INVERDE is ON
49 Set Variable USUARIO = 1

```

```
50 Remark: *****
51 EMPEZAR:
52 Remark: ***** Inicio Ciclo *****
53 If CICLO > 19 Jump to FINAL
54 Print to Screen & Log: Inicio ciclo 'CICLO' de trabajo
55 Go to Position 4 Speed 25 (%)
56 Remark: ***** Calcular posiciones *****
57 Call Subroutine POSICIONES
58 Remark: ***** Ir a posiciones *****
59 Go to Position 17 Speed 15 (%)
60 Wait 25 (10ths of seconds)
61 Remark: ***** Soldar *****
62 Run Subroutine SOLDAR
63 Go Linear to Position 18 Duration SCRIPT.TIEMPO (1/10 sec.)
64 Turn Off Output OUTSUELDA
65 Remark: ***** Levantar un poco el brazo *****
66 Go Linear to Position 10 Duration 20 (1/10 sec.)
67 Remark: ***** Posicion Inicial *****
68 Go to Position 4 Speed 25 (%)
69 Remark: ***** Verificar Ciclo *****
70 If CICLO == 19 Jump to FINAL
71 Set Variable CICLO = CICLO + 1
72 Remark: ***** Fin Ciclo de Trabajo *****
73 Print to Screen & Log: Fin Ciclo de Trabajo
74 Jump to INICIO
75 Remark: *****
76 ERROR:
77 Call Subroutine SCRIPT.ERROR
78 Print to Screen & Log: Error en datos. Ejecutar nuevamente el
  programa
79 Remark: *****
80 FINAL:
81 Go to Position 1 Speed 25 (%)
82 Print to Screen & Log: Fin de Trabajo
83 Set Variable USUARIO = 0
84 Run Subroutine ALERTAR
85 Wait 40 (10ths of seconds)
86 Set Variable USUARIO = 1
87 Wait 20 (10ths of seconds)
88 Turn On Output OUTROJO
89 Turn On Output OUTLUCES
90 Call Subroutine SCRIPT.COPIAR_LOGFILE
91 End
92 Remark: *****
93 Set Subroutine APAGAR_OUTS
94 Turn Off Output OUTLUCES
95 Turn Off Output OUTSUELDA
96 Turn Off Output OUTROJO
97 Return from Subroutine
98 Remark: *****
```

```
99 Set Subroutine SOLDAR
100 Set Variable LIMITE = 8582-34*(CICLO-1)-700
101 VER_POS_INICIO:
102 Set Variable X to the Cartesian 1 Coordinate at Position
    CURRENT
103 If X <= LIMITE Jump to PRENDER_SOLDADORA
104 Jump to VER_POS_INICIO
105 PRENDER_SOLDADORA:
106 Print to Screen & Log: Inicio Suelta
107 Turn On Output OUTSUELDA
108 Set Variable ESTADO = 1
109 Wait SCRIPT.TIEMPO_S (10ths of seconds)
110 Turn Off Output OUTSUELDA
111 If ESTADO <> 1 Jump to TERMINAR
112 Print to Screen & Log: Suelta Finalizada
113 Call Subroutine SCRIPT.DATOS_SUELDA (ESTADO, VELOCIDAD, LONGITUD,
    CICLO)
114 TERMINAR:
115 Return from Subroutine
116 Remark: *****
117 Set Subroutine EMERGENCIA
118 Disable Input Interrupt INEMERGENCIA
119 Turn Off Output OUTSUELDA
120 Turn On Output OUTROJO
121 Set Variable ESTADO = 2
122 Print to Screen & Log: Boton Emergencia accionado
123 Enable Input Interrupt INEMERGENCIA
124 Call Subroutine SCRIPT.DATOS_SUELDA (ESTADO, VELOCIDAD, LONGITUD,
    CICLO)
125 Call Subroutine SCRIPT.COPIAR_LOGFILE
126 End
127 Return from Subroutine
128 Remark: *****
129 Set Subroutine COLOCAR/RETIRAR
130 Go to Position 1 Speed 25 (%)
131 Go to Position 7 Speed 25 (%)
132 End
133 Return from Subroutine
134 Remark: *****
135 Set Subroutine APAGAR
136 Go to Position 8 Speed 25 (%)
137 End
138 Return from Subroutine
139 Remark: *****
140 Set Subroutine POSICIONES
141 Remark: ***** Calcular Posiciones de Ciclo *****
142 Set Variable X = -34*(CICLO-1)
143 Set Variable Y = 1027*(CICLO-1)
144 Set Variable Z = -21*(CICLO-1)
145 Set Variable R = 26*(CICLO-1)
```

```

146 Teach Position 17 by XYZ. Relative to: 11 Coordinates:X Y Z O R
147 Set Variable X = 28*(CICLO-1)
148 Set Variable Y = 1029*(CICLO-1)
149 Set Variable Z = -28*(CICLO-1)
150 Set Variable R = -26*(CICLO-1)
151 Teach Position 18 by XYZ. Relative to: 12 Coordinates:X Y Z O R
152 Return from Subroutine
153 Remark: *****
154 Set Subroutine ALERTAR
155 PRENDER_LUCES:
156 Turn On Output OUTROJO
157 Turn On Output OUTLUCES
158 Wait 7 (10ths of seconds)
159 Turn Off Output OUTROJO
160 Wait 7 (10ths of seconds)
161 If USUARIO == 0 Jump to PRENDER_LUCES
162 Turn Off Output OUTROJO
163 Turn On Output OUTLUCES
164 Return from Subroutine
165 Remark: *****

```

El programa inicia cargando variables y datos necesarios para la ejecución. En la parte INICIALIZACION (línea 10), el programa carga el archivo Suelda.VBS (línea 12) y las variables de las entradas y salidas digitales usadas por los elementos de la caja de control (líneas 14-18). Para este caso, las entradas 15 y 16, y las salidas 11, 12 y 13 fueron usadas.

A continuación, se verifica que el archivo de texto “historias_ciclos.txt” exista, y se lo crea en el caso de que no exista (línea 20). En las líneas 22 y 23, se establece la subrutina de interrupción “EMERGENCIA”. Esto genera que en caso de que la entrada a la que se conectó el pulsador de emergencia se active, se pare la ejecución normal del programa y se ejecute solo la subrutina “EMERGENCIA”.

Seguidamente, se ejecuta la subrutina “APAGAR_OUTS”, que realiza un chequeo y apaga todas las salidas en caso de que hayan sido prendidas manualmente, y así se evita que se encienda la soldadora antes de que sea necesario. Finalmente, el robot se mueve a la posición de “Stand By” (posición 1), enciende la luz verde del control e indica en la pantalla que el robot está listo para trabajar (líneas 26-31).

En la parte “INICIO”, se ejecuta la subrutina “VERIFICAR_CICLO” que establece el último ciclo de trabajo que se realizó, y pregunta al operador si desea continuar con el último trabajo

o si desea empezar una nueva pieza de trabajo. Seguidamente, se establecen las variables de velocidad de avance (línea 37), longitud de cordón (línea 39) y de tiempos de soldadura (línea 43) para el presente ciclo. En caso de que se introduzcan valores erróneos para las variables, la ejecución salta hacia la parte ERROR en donde se indica que existen errores en los datos y es necesaria la reejecución del programa. Una vez introducidas correctamente estas variables, el programa ejecuta la subrutina “ALERTAR” (línea 46), que indica mediante el parpadeo de la luz roja del panel, que el programa necesita la confirmación del operador, mediante el pulsador verde, para que se inicie el ciclo de trabajo (líneas 47-48).

En la parte EMPEZAR, el usuario ha confirmado la ejecución del ciclo. Primeramente se confirma que el número de ciclo sea el adecuado (línea 53), y se procede a mover el robot a la posición de cámara de soldadura (posición 4). Inmediatamente en la línea 57, se llama a la subrutina “POSICIONES” que calcula las posiciones de inicio y fin de cordón (posiciones 17 y 18 respectivamente) en función del ciclo en el que se encuentra trabajando el robot.

A continuación, se mueve el robot a la posición de inicio del cordón (línea 59), se espera 2.5 segundos y se ordena la ejecución de la subrutina “SOLDAR” concurrentemente con programa principal (línea 62). A partir de este momento, tanto los comandos de la subrutina “SOLDAR” como los del programa principal son ejecutados simultáneamente. Así entonces, se ordena al robot moverse con una trayectoria lineal hacia la posición final de cordón, con un tiempo de duración calculado en el script VBS (línea 63). Finalmente, se ordena que se apague la salida de la soldadora, en caso de que no se haya apagado previamente, y se levanta el brazo robótico (posición 10). Finalmente, se mueve el robot hacia la posición de cámara de soldadura (posición 4) y se calcula el siguiente ciclo, si existe, o se envía la orden de finalizar el programa si el ciclo era el 19 (líneas 69-74). Si el ciclo no es el último, la ejecución continua nuevamente desde la parte INICIO, caso contrario se ejecuta la parte FINAL.

En la línea 76, se encuentra la parte ERROR, la cual solo se ejecuta cuando se produjo un error en la introducción de los datos de velocidad de avance y longitud de cordón, e informa al usuario que se existe un error y que es necesario volver a correr el programa.

En la parte FINAL, se envía al robot a la posición de “Stand By” (posición 1), se avisa al operador que el trabajo ha concluido, mediante la subrutina “ALERTAR”, se encienden las luces verde y roja (líneas 81-89). Seguidamente, se copia el archivo log de la sesión en la carpeta Suelda y se termina la ejecución del programa (líneas 90-91).

Hasta este punto pudieron suceder dos eventos: se ingresó mala información de velocidad o longitud, y el programa necesita ser reejecutado desde el inicio; o, se realizaron los 19 cordones de soldadura y por ende el trabajo ha terminado, y es necesario el cambio de pieza de trabajo y el reinicio del programa.

A partir de la línea 92, los comandos son definiciones de las diferentes subrutinas usadas en el programa.

La subrutina “APAGAR_OUTS” (línea 93), apaga todas las salidas que el programa utiliza, para iniciar la ejecución con todas estas apagadas.

En la línea 99, se define la subrutina “SOLDAR”. Esta subrutina primeramente analiza la posición del efector final en la coordenada x , y cuando ésta coordenada ha llegado a un límite establecido (líneas 100-104), se ejecuta la parte PRENDER_SOLDADORA. En esta parte, se activa la salida digital que controla la máquina soldadora (línea 107), y por lo tanto, se inicia el arco eléctrico (si no existe alguna complicación exterior al programa). La activación de la soldadura se mantiene durante el tiempo previamente calculado (línea 109), tras el cual, la salida del controlador es apagada y, por ende, el arco eléctrico. Una vez finalizado el cordón, y si es que no se activó el botón de Emergencia, se ejecuta la subrutina “DATOS_SUELDA”, mediante la cual se guardan las variables utilizadas en el cordón en el archivo de texto “historia_ciclos.txt” (líneas 111-113).

La subrutina “EMERGENCIA”, programada desde la línea 117, se ejecuta únicamente cuando el pulsador rojo de emergencia es presionado y detiene la ejecución de cualquier comando que se esté realizando en ese momento. Esta subrutina detiene cualquier movimiento del robot, apaga la salida que activa la soldadora, en el caso de que esté encendida, y prende la luz roja del panel de control. Finalmente, guarda los datos del cordón que se estaba realizando en el archivo de texto pero teniendo en cuenta que sucedió una emergencia (línea 124), copia

el archivo log de la sesión, y termina la ejecución del programa. Por lo tanto, si se desea volver a trabajar, es necesario el reejecución del programa desde la línea 1.

En la subrutina “COLOCAR/RETIRAR” de la línea 129, solamente se mueve el robot a las posiciones de fácil acceso para colocar o retirar la antorcha.

Igualmente en la línea 135, subrutina “APAGAR”, se envía al robot a la posición de reposo (posición 8) en la que es permitido desenergizar los motores y apagar todo el sistema robótico del laboratorio. Si el sistema del robot es apagado antes de que el robot no sea llevado a esta posición, el robot se caerá y golpeará dependiendo en qué posición se encuentre, debido al peso de los eslabones. Por lo tanto, es obligatorio enviar al robot a esta posición, después de haber retirado la antorcha, para apagar el sistema.

La subrutina “POSICIONES” (línea 140) calcula las posiciones iniciales y finales de cada cordón, mediante una interpolación, dependiendo el ciclo en el que se encuentra trabajando. Los valores usados de la interpolación fueron determinados experimentalmente y luego de realizar varias pruebas. Las posiciones calculadas se guardan como posición 17 (inicio de cordón) y 18 (fin de cordón), y son relativas a las posiciones absolutas 11 y 12, las cuales son los puntos donde inicia el trabajo en la placa.

En último lugar, la subrutina “ALERTAR” enciende y apaga la luz roja del panel, es decir alerta al operador cuando es necesaria su atención hacia los mensajes en la pantalla. La subrutina continua ejecutándose hasta que se realiza la acción necesaria que hace que esta termine, dependiendo la situación en la que se activa.

F.3. Programación VBS

El programa a continuación, en lenguaje VBS, complementa al programa explicado en la sección anterior, ya que incorpora funciones y comandos que Scorbaser no tiene.

Código F.2 Implementación con VBS

```

1 'Suelda.VBS
2 'Para usar exclusivamente con el programa Suelda.WS
3 'y con el robot Scorbaser ER 9Pro de la Universidad
4 'San Francisco de Quito en su aplicacion de soldadura.

```

```

5
6 'Autor: Gustavo Tapia Imbaquingo
7 'Ultima Modificacion: Nov 21,2012
8
9 'Declaracion variables
10 Dim velocidad 'velocidad de avance
11 Dim tiempo 'tiempo entre pos inicial y final
12 Dim tiempo_s 'tiempo de soldadura
13 Dim longitud 'longitud de cordon
14 Dim archivo_nuevo 'verifica si existe archivo de texto
15
16 '*****
17 Function INPUT_VELOCIDAD
18   dim numerico, respuesta
19   velocidad = InputBox("Introduzca la velocidad de avance en mm/s (2-10):",
20     "Velocidad")
21   numerico = IsNumeric(velocidad) 'ver si el dato es numerico
22   If numerico = 0 Then
23     velocidad = -1
24   End If
25
26   If velocidad < 2 Or velocidad > 10 Then
27     respuesta = 0
28     Do Until (velocidad >= 2 And velocidad <= 10) Or respuesta = 2
29       respuesta = MsgBox("Velocidad fuera del rango de trabajo." & Chr(13) &
30         "Rango 2 - 10", vbRetryCancel, "Suelta")
31       If respuesta = 4 THEN
32         velocidad = InputBox("Introduzca la velocidad de avance en mm/s
33           (2-10):", "Velocidad")
34         numerico = IsNumeric(velocidad)
35         If numerico = 0 Then
36           velocidad = -1
37         End If
38       End If
39     Loop
40   End If
41
42   INPUT_VELOCIDAD = velocidad*100
43 End Function
44
45 '*****
46 Function INPUT_LONGITUD
47   dim numerico, respuesta
48   longitud = InputBox("Introduzca la longitud de cordón mm (25-115):", "
49     Longitud")
50   numerico = IsNumeric(longitud)

```

```

51  If numerico = 0 Then
52      longitud = -1
53  End If
54
55  If longitud < 25 Or longitud > 115 THEN
56      respuesta = 0
57      Do Until (longitud >= 25 And longitud <= 115) Or respuesta = 2
58          respuesta = MsgBox( "Longitud del cordón fuera del rango de trabajo" &
59              Chr(13) & "Rango 25 - 115", vbRetryCancel, "Suelta")
60          If respuesta = 4 Then
61              longitud = InputBox("Introduzca la longitud de cordón mm (25-115):"
62                  , "Longitud")
63              numerico = IsNumeric(longitud)
64              If numerico = 0 Then
65                  longitud = -1
66              End If
67          End If
68          If respuesta = 2 Then
69              longitud = -1
70          End If
71      Loop
72  End If
73
74  INPUT_LONGITUD = longitud*100
75  End Function
76
77  '*****
78  Sub CALC_TIEMPO(velocidad,longitud)
79      velocidad = velocidad/100
80      longitud = longitud/100
81
82      If (velocidad >= 2 And velocidad <= 2.27) Then
83          tiempo = (825-930)*(velocidad-2)/(2.27-2)+930
84
85      ElseIf (velocidad > 2.27 And velocidad <= 2.5) Then
86          tiempo = (765-825)*(velocidad-2.27)/(2.5-2.27)+825
87
88      ElseIf (velocidad > 2.5 And velocidad <= 3) Then
89          tiempo = (637-765)*(velocidad-2.5)/(3-2.5)+765
90
91      ElseIf (velocidad > 3 And velocidad <= 3.5) Then
92          tiempo = (540-637)*(velocidad-3)/(3.5-3)+637
93
94      ElseIf (velocidad > 3.5 And velocidad <= 4) Then
95          tiempo = (470-540)*(velocidad-3.5)/(4-3.5)+540
96
97      ElseIf (velocidad > 4 And velocidad <= 4.5) Then
98          tiempo = (430-470)*(velocidad-4)/(4.5-4)+470
99
100     ElseIf (velocidad > 4.5 And velocidad <= 5) Then

```

```

99     tiempo = (409-430)*(velocidad-4.5)/(5-4.5)+430
100
101     ElseIf (velocidad > 5 And velocidad <= 6) Then
102         tiempo = (325-409)*(velocidad-5)/(6-5)+409
103
104     ElseIf (velocidad > 6 And velocidad <= 7) Then
105         tiempo = (270-325)*(velocidad-6)/(7-6)+325
106
107     ElseIf (velocidad > 7 And velocidad <= 8) Then
108         tiempo = (242-270)*(velocidad-7)/(8-7)+270
109
110     ElseIf (velocidad > 8 And velocidad <= 9) Then
111         tiempo = (206-242)*(velocidad-8)/(9-8)+242
112
113     ElseIf (velocidad > 9 And velocidad <= 10) Then
114         tiempo = (186-206)*(velocidad-9)/(10-9)+206
115     End If
116
117     tiempo = Int(tiempo)
118     tiempo_s = Int(10*longitud/velocidad)-7
119 End Sub
120
121 '*****
122 Sub ERROR
123     MsgBox "Error en los datos de Velocidad o Longitud. Vuelva a correr el
124     programa", vbOKOnly, "Error"
125 End Sub
126 '*****
127 Sub DATOS_SUELDA(estado, velocidad, longitud, ciclo)
128     Dim objeto, archivo
129     Set objeto = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
130     Set archivo = objeto.OpenTextFile("historia_ciclos.txt", 8, True)
131     Fecha = FormatDateTime(Date, 0)
132     Hora = FormatDateTime(Time, 0)
133
134     Select Case estado
135         Case 1 estado_str = "Terminado"
136         Case 2 estado_str = "Emergencia"
137     End Select
138
139     archivo.WriteLine(" " & ciclo & Chr(9) & " " & Fecha & Chr(9) & Hora & Chr
140         (9) & " " & velocidad/100 & Chr(9) & Chr(9) & " " & longitud/100 & Chr(9)
141         & Chr(9) & estado_str)
142     archivo.Close
143 End Sub
144 '*****
145 Function VERIFICAR_CICLO
146     Dim objeto, archivo, ultimo, ciclo, numerico, ult_estado

```

```
146
147 If archivo_nuevo Then
148     MsgBox "No se pudo obtener datos del último ciclo de trabajo o los datos
           son erróneos." & Chr(13) & "Se reiniciará desde el primer ciclo",
           vbOKOnly, "Suelda"
149     ciclo = 1
150     VERIFICAR_CICLO = ciclo
151     Exit Function
152 End If
153
154 Set objeto = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
155 Set archivo = objeto.OpenTextFile("historia_ciclos.txt", 1, True)
156
157 Do While archivo.AtEndOfStream <> True
158     ultimo = archivo.ReadLine
159 Loop
160
161 ciclo = Mid(ultimo, 4,2)
162 numerico = IsNumeric(ciclo)
163
164 If len(ultimo) < 1 Or numerico = 0 Then
165     archivo.Close
166     MsgBox "No se pudo obtener datos del último ciclo de trabajo o los datos
           son erróneos." & Chr(13) & "Se reiniciará desde el primer ciclo",
           vbOKOnly, "Suelda"
167     ciclo = 1
168     VERIFICAR_CICLO = ciclo
169     Exit Function
170 Else
171     ciclo = CInt(ciclo)
172     archivo.Close
173 End If
174
175 ult_estado = Right(ultimo, 1)
176
177 If ciclo > 0 And ciclo < 19 Then
178     respuesta = MsgBox("Ultimo ciclo de trabajo fue #" & ciclo & "." & Chr
           (13) & "Desea reiniciar desde el primer ciclo?", vbYesNo, "Suelda")
179     Select Case respuesta
180     Case 6 ciclo = 1
181         MsgBox "El trabajo se reiniciará desde el primer ciclo",
           vbOKOnly, "Suelda"
182
183     Case 7 If ult_estado = "o" Then
184         ciclo = ciclo + 1
185         MsgBox "El trabajo continuará desde el ciclo #" & ciclo,
           vbOKOnly, "Suelda"
186     ElseIf ult_estado = "a" Then
187         respuesta = MsgBox("En el último ciclo de trabajo obtenido se
           registró una emergencia. Presione YES si desea repetir el
```

```

ciclo " & ciclo & "." & Chr(13) & "Presione NO si desea
continuar con el siguiente ciclo", vbYesNo, "Suelda")
188
189     Select Case respuesta
190         Case 6 MsgBox "El trabajo continuará desde el ciclo #" &
ciclo, vbOKOnly, "Suelda"
191
192         Case 7 ciclo = ciclo + 1
193             MsgBox "El trabajo continuará desde el ciclo #" &
ciclo, vbOKOnly, "Suelda"
194     End Select
195     Else
196         ciclo = ciclo + 1
197         MsgBox "No se pudo obtener el estado final del último cordón
realizado. El trabajo continuará desde el ciclo #" & ciclo,
vbOKOnly, "Suelda"
198     End If
199 End Select
200
201 ElseIf ciclo = 19 Then
202     If ult_estado = "o" Then
203         MsgBox "Ultimo ciclo de trabajo fue #" & ciclo & "." & Chr(13) & "Se
reiniciará desde el primer ciclo", vbOKOnly, "Suelda"
204         ciclo = 1
205     ElseIf ult_estado = "a" Then
206         respuesta = MsgBox("El último ciclo de trabajo fue el #19 pero se
registró una emergencia." & Chr(13) & "Presione YES si desea repetir
el ciclo #" & ciclo & "." & Chr(13) & "Presione NO si desea
continuar con el ciclo #1", vbYesNo, "Suelda")
207
208     Select Case respuesta
209         Case 6 MsgBox "El trabajo continuará desde el ciclo #" & ciclo,
vbOKOnly, "Suelda"
210
211         Case 7 ciclo = 1
212             MsgBox "El trabajo continuará desde el ciclo #" & ciclo,
vbOKOnly, "Suelda"
213     End Select
214     Else
215         ciclo = ciclo + 1
216         MsgBox "No se pudo obtener el estado final del último cordón realizado
. El trabajo continuará desde el ciclo #" & ciclo, vbOKOnly, "Suelda
"
217     End If
218
219 ElseIf ciclo <= 0 Or ciclo > 19 Then
220     MsgBox "No se pudo obtener datos del último ciclo de trabajo o los datos
son erróneos." & Chr(13) & "Se reiniciará desde el primer ciclo",
vbOKOnly, "Suelda"
221     ciclo = 1
```

```

222 End If
223
224 VERIFICAR_CICLO = ciclo
225 End Function
226
227 '*****
228 Sub Crear_Archivo
229 Dim objeto, archivo
230 Set objeto = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
231
232 If (objeto.FileExists("historia_ciclos.txt")) Then
233     archivo_nuevo = FALSE
234 Else
235     Set archivo = objeto.CreateTextFile("historia_ciclos.txt", False)
236     archivo.WriteLine(" ")
237     archivo.WriteLine("Robot Soldador - Laboratorio de Robotica y Manufactura
de la Universidad San Francisco de Quito")
238     archivo.WriteLine("Historia de Ciclos de Trabajo")
239     archivo.WriteLine(" ")
240     archivo.WriteLine("*****")
241     archivo.WriteLine("* No editar el texto *")
242     archivo.WriteLine("*****")
243     archivo.WriteLine(" ")
244     archivo.WriteLine(" Ciclo      Fecha      Hora      Velocidad Longitud Estado
")
245     archivo.Close
246     archivo_nuevo = TRUE
247 End If
248 End Sub
249
250 '*****
251 Sub Copiar_LogFile
252 Dim objeto, archivo
253 Set objeto = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
254
255 If (objeto.FileExists("c:\intelitek\scorbase-pro\bin\scbs.log")) Then
256     Set archivo = objeto.GetFile("c:\Intelitek\SCORBASE-PRO\BIN\SCBS.LOG")
257     archivo.Copy ("robot_log.txt")
258     MsgBox "Se ha copiado el archivo log con todos los mensajes de la
presente sesión en el archivo Robot_log.txt", vbOKOnly, "Robot Log File
"
259 Else
260     MsgBox "No se pudo obtener el archivo log de la presente sesión.",
vbOKOnly, "Error"
261 End If
262 End Sub

```

El código inicia con la declaración de las variables que van a ser usadas en el proyecto, como velocidad, longitud, tiempo, tiempo de soldadura, etc.

A continuación, las funciones “INPUT_VELOCIDAD” e “INPUT_LONGITUD”, preguntan al usuario el valor deseado velocidad y longitud, mediante un cuadro de diálogo. Además verifican que los datos proporcionados sean numéricos y estén dentro del rango de trabajo especificado, caso contrario, el programa pide que se introduzca un valor nuevamente o que se cancele la ejecución, por lo tanto, produciendo un error y terminando la ejecución del programa principal en Scorbace también.

La subrutina “CALC_TIEMPO” calcula los tiempos necesarios para cumplir con los requerimientos de velocidad de avance y longitud de cordón. Los valores numéricos presentados fueron obtenidos experimentalmente realizando pruebas a varias velocidades de avance. Así entonces, el valor final de la variable tiempo se calcula mediante la interpolación entre los valores de velocidades y sus respectivos tiempos.

En la subrutina “ERROR”, solamente se muestra un cuadro de dialogo en el que se indica que se produjo un error en los datos y que es necesaria la reejecución del programa.

La subrutina “DATOS_SUELDA” es la encargada de grabar en el archivo de texto “historia_ciclos.txt”, las variables usadas en el cordón de soldadura trabajado, tales como fecha, hora, velocidad de avance, longitud y estado final.

En la siguiente subrutina, “VERIFICAR_CICLO”, se realiza la revisión del último ciclo trabajado por el robot, mediante la lectura de los datos del último cordón y su estado final en el archivo de texto “historia_ciclos.txt”. Entonces se pregunta al usuario si es que desea continuar con el trabajo anterior, o iniciar nuevamente desde el cordón #1. En caso de que no se puede leer los datos, o de que el archivo se haya eliminado, el programa lo indicará y empezará el trabajo desde el cordón #1.

Posteriormente, la subrutina “CREAR_ARCHIVO” verifica si existe el archivo “historia_ciclos.txt” en la carpeta del proyecto. Si el archivo si existe, no se realiza ninguna otra acción, pero si el archivo no existe, se crea uno nuevo y se añaden los títulos y frases necesarias.

Finalmente, en la subrutina “COPIAR_LOGFILE” se copia el archivo log de la sesión de Scorbace en la carpeta de trabajo Suelta, para el fácil acceso a los mensajes proporcionados durante la última ejecución del programa.

Bibliografía

- [1] J. Norberto Pires, Altino Loureiro, y Gunnar Bölmsjö. *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications*. Springer, London, 1 edición, 2006.
- [2] M. P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 3 edición, 2007.
- [3] American Welding Society. American Welding Society (AWS) - home page. Recuperado Octubre 10, 2012 de <<http://www.aws.org/w/a/>>, 2012.
- [4] The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 14 edición, 2000.
- [5] Howard B. Cary. *Modern Welding Technology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 4 edición, 1998.
- [6] Joseph W. Giachino y William Weeks. *Welding Skills and Practices*. American Technical Society, Chicago, 5 edición, 1976.
- [7] Alubook. Lexical knowledge about aluminium. MIG-welding. Recuperado Noviembre 21, 2012 de <<http://www.alu.dk/videnbaser/modul/A00526.htm>>.
- [8] LogFurnitureHowTo.com. Mig-Welding: How to Box Metal Tubing. Recuperado Noviembre 30, 2012 de <<http://logfurniturehowto.com/tutorial/basic-mig-welding-tips-how-to-box-metal-tubing/>>.
- [9] Carolina Llano Uribe. Soldadura GMAW - MIG/MAG: Un proceso rápido, limpio y versátil. *Revista Metal Actual*, (10):18–25, January 2009.
- [10] Edison A. Bonifaz. Finite Element Analysis of Heat Flow in Single-Pass Arc Welds. *Welding Journal*, 79(5):121–125, May 2000.
- [11] Sunarc. Tecnología en Soldadura. Soldadura MIG-MAG. Recuperado Junio 20, 2012 de <<http://www.sunarc.com>>.
- [12] Henry Horwitz. *Welding: Principles and Practice*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1 edición, 1979.
- [13] Leonard Carl Love. *Welding: Procedures & Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NY, 1 edición, 1975.
- [14] Corral.net. Welding over paint. Recuperado Septiembre 10, 2012 de <<http://forums.corral.net/forums/general-mustang-tech/1291193-welding-over-paint.html>>.
- [15] David Hoffman, Kevin Dahle, y David Fisher. *Welding*. Pearson Education, Boston, 1 edición, 2012.
- [16] Lincoln Electric. GMAW Welding Guide. Recuperado Diciembre 13, 2012 de <<http://www.lincolnelectric.com>>, 2012.

- [17] S. Y. Nof, editor. *Springer Handbook of Automation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 1 edición, 2009.
- [18] Laurent Sass. Introducción - Presentaciones Clase Automatismos Industriales USFQ. Recuperado Septiembre 14, 2012 de <http://profesores.usfq.edu.ec/laurents/IEE561/IEE561_Introduccion.pdf>, 2012.
- [19] Wikipedia, the free encyclopedia. Robotics. Recuperado Septiembre 1, 2012 de <<http://en.wikipedia.org/wiki/Robotics>>, 2012.
- [20] ISO. *ISO 8373:1994. Robots and robotic devices – Vocabulary*. ISO, 1994.
- [21] CFIE Valladolid II. Fundamentos de la Robótica. Recuperado Septiembre 14, 2012 de <http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/>.
- [22] Wikipedia, the free encyclopedia. Degrees of freedom (mechanics). Recuperado Octubre 5, 2012 de <[http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_\(mechanics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_(mechanics))>, 2012.
- [23] John J. Uicker, Gordon R. Pennock, y Joseph E. Shigley. *Theory of Machines and Mechanisms*. Oxford University Press, New York, 3 edición, 2003.
- [24] Wikipedia, the free encyclopedia. Mathematical model. Recuperado Octubre 8, 2012 de <http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_model>, 2012.
- [25] Thamo Sutharssan. An Introduction to Mathematical Modelling. Recuperado Octubre 2, 2012 de <<http://staffweb.cms.gre.ac.uk/~st40/Books/MathematicalModelling>>, 2011.
- [26] Peter Corke. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®*. Springer, Berlin, 1 edición, 2011.
- [27] Saeed B. Niku. *Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1 edición, 2001.
- [28] M. W. Spong, S. Hutchinson, y M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1 edición, 2006.
- [29] John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3 edición, 2005.
- [30] Richard M. Murray, Zexiang Li, y S. Shankar Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1 edición, 1994.
- [31] Wikipedia, la enciclopedia libre. Soldadura Robotizada. Recuperado Octubre 18, 2012 de <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_robotizada>, 2012.
- [32] David O’Sullivan. Industrial robotics. Recuperado Agosto 4, 2012 de <http://www.nuigalway.ie/staff-sites/david_osullivan/documents/06._industrial_robotics.ppt>.
- [33] Intelitek. Scorbot ER 9Pro. User Manual. Manchester, NH, January 2008.
- [34] Intelitek. Scorbse. Version 6.1 and Higher for SCORBOT-ER 9Pro & SCORA-ER 14Pro. User Manual. Manchester, NH, August 2009.
- [35] Intelitek. Controller USB-Pro. User Manual. Manchester, NH, January 2008.
- [36] omega.com. RDXL4SD 4-Channel datalogger thermometer. User’s Guide., 2012.

- [37] Centro de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica USFQ. Area de Robótica y Manufactura. Recuperado Septiembre 16, 2012 de <<http://portal.usfq.edu.ec/cidrm/>>.
- [38] P. J. Bouchard. The NeT bead-on-plate benchmark for weld residual stress simulation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(1):ISSN 0308-0161, January 2009.
- [39] ASM International Handbook Committee, editor. *ASM Handbook Volume 04: Heat Treating*. ASM International, Materials Park, OH, 10 edición, 1991.
- [40] Steve Harmer. Heat Treatment of Steels – The Processes. Recuperado Septiembre 28, 2012 de <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=543>>, June 2001.
- [41] William D. Callister. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, New York, 5 edición, 2001.
- [42] H. Bhadeshia. Hardenability of Steel. Recuperado Enero 7, 2013 de <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/practicals/AP3/AP3.html>>, 2000.
- [43] K. Biswas, R. Hermann, H. Wendrock, J. Priede, G. Gerbeth, y B. Buechner. Effect of melt convection on the secondary dendritic arm spacing in peritectic Nd–Fe–B alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 480(2):295–298, July 2009.
- [44] Donald R. Askeland y Pradeep P. Phulé. Principles of Solidification. Recuperado Enero 7, 2013 de <http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class_web/Lecture%20Notes/2004/AskelandPhuleNotes-CH08Printable.ppt>, 2003.
- [45] Sindo Kou. *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2 edición, 2003.
- [46] Gala Gar. GALA MIG. Manual Técnico de Instrucciones. Zaragoza, España.
- [47] ASM International Handbook Committee, editor. *ASM Handbook Volume 06: Welding, Brazing and Soldering*. ASM International, Materials Park, OH, 1 edición, 1993.