



Diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Cobeña Govea, Tomas Lecxinton y Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo, Mgtr.

21 de agosto de 2023

Latacunga

Reporte de Verificación de Contenidos



Tesis Cobeña - Guamanquispe _ ML.pdf

Scan details

Scan time:
August 21th, 2023 at 16:16 UTC

Total Pages:
113

Total Words:
28118

Plagiarism Detection



5%

Types of plagiarism		Words
Identical	1.7%	465
Minor Changes	0.9%	251
Paraphrased	2.5%	697
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection

N/A

Text coverage

- AI text
- Human text

🔍 Plagiarism Results: (53)

🌐 **¿Qué es la soldadura MIG/MAG?** 0.7%

<https://www.fronius.com/es-es/spain/tecnologia-de-soldadur...>

Fronius Worldwide ...

🌐 **Geometría de los robots** 0.6%

<https://es.slideshare.net/mmastino/geometra-de-los-robots>

InicioExplorarEnviar búsqueda CargarIniciar sesiónRegistrarse Geometría de los robots Denunciar mmastinoSeguir 19 de Oct de...

🌐 **5.4 Robots industriales** 0.5%

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/te...

Firma:

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo, Mgtr.

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: “**Diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga**” fue realizado por los señores **Cobeña Govea, Tomas Lecxinton y Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 21 de agosto de 2023

Firma:

.....
Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo, Mgtr.

C.C.: 0501627889

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cobeña Govea, Tomas Lecxinton** con cédula de ciudadanía n° 1312188665, y **Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo** con cédula de ciudadanía n° 1805193438, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 21 de agosto de 2023

Firma:

Cobeña Govea, Tomas Lecxinton

C.C.: 1312188665

Firma:

Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo

C.C.: 1805193438



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Cobeña Govea, Tomas Lecxinton** con cédula de ciudadanía n° 1312188665, y **Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo** con cédula de ciudadanía n° 1805193438, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 21 de agosto de 2023

Firma:

.....
Cobeña Govea, Tomas Lecxinton

C.C.: 1312188665

Firma:

.....
Guamanquispe Yanzapanta, Andrés Leonardo

C.C.: 1805193438

Dedicatoria

El presente trabajo de integración curricular se lo dedico a mi padre, Edison Cobeña, que con su ejemplo y enseñanzas me ayudo a convertirme en la persona que soy, y hoy en día desde el cielo me sigue enseñando cómo afrontar el mundo.

A mi madre y abuelita, Jessenia Govea y Leova Párraga, por demostrarme durante toda mi vida cariño y buenas costumbres, además de siempre trabajar arduamente por mi bienestar, de la misma manera a mis tíos, Cristian Cobeña y Eliana Cobeña.

A mi hermano, Michael que a pesar de las discusiones y la distancia me sirve de ejemplo para esforzarme más cada día, a mi mejor amigo, Esteban Navas, por apoyarme en los momentos más difíciles, a mi compañero de tesis, Andrés, por ayudarme a culminar este proyecto.

Y finalmente a todos mis amigos y docentes, que siempre me apoyaron, les estoy eternamente agradecido, gracias por su ayuda.

Tomas Lecxinton Cobeña Govea

Dedicatoria

A mi amado padre, Patricio, por ser mi guía y mi inspiración desde que tengo criterio propio. Tu apoyo incondicional y sabios consejos han sido fundamentales en este camino hacia el logro de mis metas.

A mi amada madre, Marina, aunque ya no estés físicamente a mi lado, siempre estarás en mi corazón. Te extraño profundamente y este logro es un homenaje a ti, mi eterna fuente de inspiración.

A mi segunda madre, Doña Paty, por su amor, comprensión y paciencia en cada etapa de mi vida, ya que, una madre no es solo quien da a luz, sino quien cría, nutre y ama con un corazón infinito.

A mis queridos hermanos y hermanas, en especial a Wagner, quien ha estado siempre junto a mí y juntos hemos superado obstáculos y celebrado logros. A pesar de la distancia, siempre estás en mi corazón querido hermano.

A toda mi familia, en especial a mi tía Clara, quienes han estado ahí en cada paso de este camino. Su amor y aliento me han impulsado a esforzarme siempre por ser mejor.

A mis leales amigos, quienes han compartido risas, lágrimas y momentos inolvidables a lo largo de esta travesía. Su amistad ha sido un faro en las noches oscuras y un motivo de alegría en los días brillantes.

Andrés Leonardo Guamanquispe Yanzapanta

Agradecimiento

En primer lugar, a las personas que estuvieron conmigo en el principio de mi carrera y hasta el día de hoy me siguen apoyando a pesar de las adversidades.

A mis docentes que llegaron a ser grandes amigos, y me ayudaron con sus consejos, Luis Mena, Héctor Terán, Guido Torres, Oscar Arteaga, además a los amigos que conocí en el transcurso de toda mi carrera, y junto a ellos compartí gratos momentos.

A mis compañeros de la robótica de competencia, con los cuales conocí muchos lugares y me apoyaron en todo momento en el ámbito estudiantil.

A mi tutor, Ing. Marco Singaña, por ser punto clave en el desarrollo del proyecto y gracias a su guía permitirnos llegar al final de esta etapa.

Y, por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí, por creer en mí, por tener pocos días libres y así poder enfocarme en mis metas, por no renunciar cuando los días fueron más difíciles.

¡Gracias!

Tomas Lecxinton Cobeña Govea

Agradecimiento

A mi padre y hermano Wagner, por hacer todo lo posible, a veces hasta lo imposible por ayudarme a terminar este escalón de vida. Su ejemplo de determinación y perseverancia me ha guiado a lo largo de esta travesía académica.

A mi familia en general, por su comprensión, paciencia y constante aliento. Su invaluable apoyo significó y aportó en gran medida la finalización de esta etapa.

A mis incontables amigos, quienes han sido un refugio en las tormentas y una fuente de alegría en los días soleados. Quienes cuando tiré la toalla, estuvieron ahí, recogieron la toalla y me ayudaron a continuar. A mi amigo y compañero de tesis, Tomas, por su apoyo a la culminación del presente proyecto.

A mis estimados docentes y tutor, sus conocimientos, orientación y apoyo han sido invaluable en mi desarrollo académico. Cada uno de ustedes ha dejado una huella significativa en mi formación y ha contribuido de manera sustancial a este logro.

Y, finalmente, a mí mismo. Por mi dedicación, perseverancia y el compromiso constante de superarme. Este logro es un testimonio de lo que soy capaz de lograr lo que me propongo.

Andrés Leonardo Guamanquispe Yanzapanta

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	1
Reporte de Verificación de Contenidos	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	19
Índice de tablas	25
Índice de ecuaciones.....	26
Resumen	28
Abstract.....	29
Capítulo I: Introducción	30
Antecedentes.....	30
Planteamiento del Problema.....	31
Justificación e Importancia.....	32
Alcance.....	33
Objetivos	33

<i>Objetivo General</i>	33
<i>Objetivos Específicos</i>	33
Hipótesis	34
<i>Variable Independiente</i>	34
<i>Variable Dependiente</i>	34
Capítulo II: Fundamentación Teórica	35
Robot Industrial.....	35
<i>Componentes del Robot Industrial</i>	36
Estructura Mecánica.....	37
Sistema Sensorial.....	37
Sistema de Transmisión.	37
Sistema de Potencia y Control.....	38
Sistema de Accionamiento.....	38
Elementos Terminales.....	39
<i>Características del Robot Industrial</i>	40
Repetibilidad.	40
Precisión.....	40
Grados de Libertad (GDL).....	41
Programabilidad.....	41
Capacidad de Carga.	41
Campo de Trabajo.....	41

<i>Clasificación de los Robots Industriales</i>	42
SCARA (RRP)	42
Geometría Cartesiana (PPP)	43
Geometría Cilíndrica (RPP)	43
Geometría Esférica (RRP)	44
Geometría Articulada (RRR)	45
Aplicaciones del Robot Industrial	45
<i>Soldadura Industrial</i>	46
Soldadura por Arco	47
Soldadura por Puntos	47
Soldadura por Resistencia	48
Soldadura por Arco TIG	49
<i>Manipulación de Materiales</i>	49
<i>Pintura Industrial</i>	50
<i>Ensamblaje de Piezas y Elementos</i>	51
<i>Inspección y Control de Calidad</i>	51
Celdas Robotizadas	52
<i>Elementos Activos y Pasivos</i>	53
<i>Disposición del Robot en la Celda Robotizada</i>	53
Robot en el Centro	54
Robot en Línea	54

Robot Móvil.....	55
Robot Suspendido.....	55
<i>Tipos de Celdas Robotizadas</i>	<i>56</i>
Celda de Soldadura.....	57
Celda de Manufactura.....	58
Celda de Paletizado.....	58
<i>Medidas de Seguridad</i>	<i>59</i>
Fase de Diseño del Robot.....	60
Fase de Implementación de la Celda Robotizada.....	60
Fase de Operación del Sistema.....	61
Mesas para Soldadura Robotizada	61
<i>Tipos de Mesa para Soldadura Robotizada</i>	<i>62</i>
Mesas Modulares.....	62
Mesas de Superficie Adaptable.....	64
Mesa Circular Modular de un Eje KP1-MB.....	64
Unidad de Acondicionamiento Modular KP1-MDC de un Solo Eje.....	65
Posicionador KP2-HV de Dos Ejes.....	66
Posicionador KP2-SV HW de Dos Ejes.....	66
Posicionador KP3-V2H de Tres Ejes.....	66
Posicionador KP3-V2MD de Tres Ejes.....	67
Mesa Posicionadora de Dos Ejes.....	68

	14
<i>Unidad Lineal KUKA KL 4000.</i>	69
Soldadura MIG/MAG	70
<i>Gases para Soldadura MIG/MAG</i>	70
Soldadura MIG.....	70
Soldadura MAG.....	70
<i>Proceso de Soldadura MIG/MAG</i>	71
<i>Equipo para Soldadura MIG/MAG</i>	72
<i>Parámetros de Soldadura</i>	74
Intensidad y Tiempo.....	74
Resistencia Eléctrica de la Unión.....	74
Longitud Correcta del Arco.....	74
Ángulo Correcto del Arco.....	74
Velocidad Apropriada de Avance.....	74
<i>Tipos de Transferencia de Metal en el Proceso MIG</i>	75
Transferencia en Spray.....	75
Transferencia Globular.....	76
Transferencia en Cortocircuito.....	77
Capítulo III: Diseño, Selección e Implementación de Componentes	78
Especificaciones Técnicas para el Diseño e Implementación	78
Diseño Mecánico	79
<i>Selección del Husillo de Bolas</i>	80

<i>Selección de Guías y Rieles Lineales</i>	88
<i>Selección del Material para la Estructura</i>	91
<i>Diseño de la Mesa de Trabajo</i>	93
<i>Modelamiento Utilizando Software CAD/CAE</i>	95
Tensión de Von Mises.....	95
Desplazamiento Resultante.....	95
Diseño Eléctrico y Electrónico	98
<i>Selección de los Elementos de Protección</i>	100
<i>Selección del PLC</i>	101
<i>Controlador del Servo Motor</i>	102
<i>Selección de Indicadores, Selectores y Relés</i>	104
Luz Piloto.....	104
Selector de Encendido.....	104
Relés.....	105
<i>Conductor para Elementos de Control</i>	105
<i>Selección de Elementos Adicionales</i>	105
<i>Selección de Pantalla HMI</i>	106
Implementación y Montaje del Sistema Mecánico	107
<i>Paredes Principales de la Estructura</i>	107
<i>Soportes Laterales de la Estructura</i>	108
<i>Soporte Deslizante</i>	111

<i>Mesa de Trabajo</i>	111
<i>Soporte del Servo Motor</i>	114
<i>Elementos Adquiridos en su Totalidad</i>	114
<i>Ensamble de la Mesa Lineal</i>	115
<i>Despiece de la Mesa Lineal de Soldadura</i>	116
<i>Partes de la Mesa Lineal de Soldadura</i>	119
Implementación y Conexión del Sistema Eléctrico y Electrónico	119
Capítulo IV: Desarrollo del Sistema de Control	123
Parámetros de Control	123
<i>Control de Velocidad y Desplazamiento</i>	123
Control de Velocidad.....	123
Control de Desplazamiento.	125
<i>Algoritmo de Programación</i>	126
Programación Principal.	126
Subrutina Movimiento Derecha.....	127
Subrutina Movimiento Izquierda.....	128
Subrutina Home Parte 1.....	128
Subrutina Home Parte 2.....	129
Subrutina Modo Automático.	130
Programación del PLC.....	131
<i>Instalación del Software Xinje XC Series Program Tool</i>	132

<i>Entorno de Trabajo del Software Xinje XC Series Program Tool</i>	132
<i>Configuración del Puerto Serial</i>	133
<i>Configuración del Controlador del Cable RS323 a USB</i>	135
<i>Creación de un Nuevo Proyecto</i>	137
<i>Programación Ladder en el Software Xinje XC Series Program Tool</i>	137
Diseño de la Interfaz de Comunicación (HMI)	138
<i>Uso del Software TouchWin Edit Tool</i>	139
<i>Diseño de las Ventanas de la Interfaz Visual</i>	140
Configuración de Comunicación Mesa-Brazo Robótico	143
Implementación y Configuración del Sistema Mecatrónico	145
<i>Sincronización Mesa –Brazo Robótico</i>	145
<i>Programación en el Controlador KR C2</i>	149
Capítulo V: Pruebas y Análisis de Resultados	151
Pruebas de Funcionamiento Parciales	151
<i>Pruebas de Velocidad</i>	151
<i>Pruebas de Desplazamiento</i>	152
Pruebas de Funcionamiento de Sincronización Mesa-Brazo Robótico	154
Pruebas Totales	155
Análisis de Resultados	156
Aplicación de Soldadura Lineal en Posición 1G	159
<i>Análisis de Resultados</i>	160

Pruebas de Calibración de Soldadura lineal en Posición 2F.....	162
<i>Análisis de Resultados</i>	<i>163</i>
Calibración de Parámetros para Soldadura Lineal en Posición 2F	163
<i>Análisis de Resultados</i>	<i>164</i>
Aplicación de Parámetros para Soldadura Lineal en Posición 2F.....	166
<i>Análisis de Resultados</i>	<i>166</i>
Validación de la Hipótesis.....	167
<i>Pruebas No Destructivas.....</i>	<i>169</i>
<i>Resultados de las Pruebas No Destructivas.....</i>	<i>172</i>
<i>Pruebas Destructivas.....</i>	<i>173</i>
<i>Resultados de las Pruebas Destructivas</i>	<i>174</i>
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	176
Conclusiones.....	176
Recomendaciones	179
Bibliografía	182
Anexos	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes básicos de un robot manipulador	36
Figura 2 Comparación de la anatomía humana con la estructura del robot industrial.....	37
Figura 3 Unidad de control KR C4.....	38
Figura 4 Ventosa de vacío.....	39
Figura 5 Campo de trabajo de un robot industrial.....	42
Figura 6 Manipulador SCARA ABB IRB910SC.....	43
Figura 7 Configuraciones básicas de los robots manipuladores	44
Figura 8 Visualización de soldadura por arco de un brazo robótico.....	47
Figura 9 Robot de soldadura por puntos.....	48
Figura 10 Robot de soldadura por resistencia	48
Figura 11 Robot de soldadura por arco TIG.....	49
Figura 12 Robot adaptado para manipular materiales.....	50
Figura 13 Brazos robóticos aplicando capas de pintura.....	50
Figura 14 Control de calidad con robot colaborativo UR5.....	51
Figura 15 Ejemplo de celda robotizada.....	52
Figura 16 Disposición del robot en el centro de la celda	54
Figura 17 Disposición del robot móvil.....	55
Figura 18 Robot suspendido.....	56
Figura 19 Celda de soldadura robotizada	57
Figura 20 Celda robotizada de mecanizado.....	58
Figura 21 Celda robotizada de paletizado.....	59
Figura 22 Mesa para soldadura robotizada.....	62
Figura 23 Modelo de mesa modular.....	63
Figura 24 Modelo de mesa con superficie adaptable	63
Figura 25 Mesa posicionadora circular de un eje tipo KUKA KP1-MB.....	64

Figura 26 <i>Unidad de acondicionamiento modular tipo KUKA KP1-MDC</i>	65
Figura 27 <i>Mesa posicionadora tipo KUKA KP2-HV – 2 ejes</i>	65
Figura 28 <i>Mesa posicionadora tipo KUKA KP2-SV – 2 ejes</i>	66
Figura 29 <i>Mesa posicionadora tipo KUKA KP3-V2H – 3 ejes</i>	67
Figura 30 <i>Mesa posicionadora tipo KUKA KP3-V2MD – 3 ejes</i>	67
Figura 31 <i>Mesa posicionadora de soldadura</i>	68
Figura 32 <i>Unidad lineal KUKA KL 4000</i>	69
Figura 33 <i>Efecto del tipo de gas en la soldadura MIG/MAG</i>	71
Figura 34 <i>Proceso de soldadura MIG/MAG</i>	71
Figura 35 <i>Sistema de soldadura MIG/MAG</i>	72
Figura 36 <i>Sistema de soldadura robotizada MIG/MAG</i>	73
Figura 37 <i>Condiciones de corriente y tensión para diferentes formas de transferencia</i>	75
Figura 38 <i>Transferencia de metal de tipo Spray</i>	76
Figura 39 <i>Transferencia de metal de tipo Globular</i>	76
Figura 40 <i>Transferencia de metal de tipo Cortocircuito</i>	77
Figura 41 <i>Servo motor 110SJT - M040D (A)</i>	80
Figura 42 <i>Diferentes tipos de husillos de bolas</i>	81
Figura 43 <i>Especificaciones de longitud y paso en un husillo</i>	82
Figura 44 <i>Par de accionamiento y potencia de accionamiento para el motor</i>	86
Figura 45 <i>Modelo de guías y rieles lineales a implementar</i>	88
Figura 46 <i>Diseño preliminar de base de mesa de acople</i>	89
Figura 47 <i>Diagrama de cuerpo libre de la mesa de análisis</i>	92
Figura 48 <i>Diagrama de momento máximo</i>	92
Figura 49 <i>Jigs de soldadura</i>	94
Figura 50 <i>Step Clamps</i>	94
Figura 51 <i>Mesa de trabajo para soldadura lineal</i>	95

Figura 52 <i>Tensión de Von Mises en la estructura lateral</i>	97
Figura 53 <i>Desplazamiento máximo en la estructura lateral</i>	97
Figura 54 <i>Tensión de Von Mises en la pared principal</i>	98
Figura 55 <i>Desplazamiento máximo en la pared principal</i>	98
Figura 56 <i>Tabla de clasificación del calibre de cables según sus características</i>	100
Figura 57 <i>Interruptor termomagnético CHINT</i>	101
Figura 58 <i>Partes de la unidad de servo controlador</i>	103
Figura 59 <i>Modelo de Luz piloto tipo verde y roja</i>	104
Figura 60 <i>Selector dinámico de dos posiciones</i>	104
Figura 61 <i>Relé de 24 V a 10 A</i>	105
Figura 62 <i>Canaletas ranuradas Dexson</i>	106
Figura 63 <i>Pantalla HMI TOUCHWIN TG765-MT 7"</i>	106
Figura 64 <i>Estructura posterior de la pantalla HMI TOUCHWIN TG765-MT 7"</i>	107
Figura 65 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: pared principal</i>	108
Figura 66 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: soporte lateral</i>	108
Figura 67 <i>Diagrama de proceso de la pared principal</i>	109
Figura 68 <i>Diagrama de proceso de los soportes laterales</i>	110
Figura 69 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: soporte deslizante</i>	111
Figura 70 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: mesa de trabajo</i>	111
Figura 71 <i>Diagrama de proceso del soporte deslizante</i>	112
Figura 72 <i>Diagrama de proceso de la mesa de trabajo</i>	113
Figura 73 <i>Modelo diseñado en software CAD/CA: soporte Servo motor</i>	114
Figura 74 <i>Diagrama de proceso del soporte del servo motor</i>	115
Figura 75 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: ensamble mesa lineal</i>	116
Figura 76 <i>Modelo diseñado en software CAD/CAE: ensamble general</i>	116
Figura 77 <i>Diagrama del ensamble de la estructura principal</i>	117

Figura 78 <i>Diagrama del ensamble de la mesa lineal</i>	118
Figura 79 <i>Tablero de control del sistema eléctrico y electrónico</i>	120
Figura 80 <i>Clasificación interna del tablero de control</i>	120
Figura 81 <i>Esquema de conexión general de la máquina</i>	121
Figura 82 <i>Diagrama de parámetros principales del algoritmo de programación</i>	126
Figura 83 <i>Diagrama de flujo de la subrutina Movimiento Derecha</i>	127
Figura 84 <i>Diagrama de flujo de la subrutina Movimiento Izquierda</i>	128
Figura 85 <i>Diagrama de flujo de la subrutina Home parte 1</i>	129
Figura 86 <i>Diagrama de flujo de la subrutina Home parte 2</i>	130
Figura 87 <i>Sistema de coordenadas para el movimiento de la mesa</i>	130
Figura 88 <i>Diagrama de flujo de la subrutina Modo Automático</i>	131
Figura 89 <i>Características del software Xinje XC Series PLC Program Tool</i>	132
Figura 90 <i>Entorno de trabajo del software de programación</i>	133
Figura 91 <i>Configuración del puerto serial</i>	134
Figura 92 <i>Auto conexión del PLC</i>	134
Figura 93 <i>Mensaje informativo de falla de conexión del PLC</i>	135
Figura 94 <i>Configuración del controlador del cable RS232 a USB</i>	136
Figura 95 <i>Creación de nuevo proyecto</i>	137
Figura 96 <i>Programación Ladder de la mesa lineal</i>	138
Figura 97 <i>Características del software específico TouchWin Edit Tool</i>	139
Figura 98 <i>Creación de un nuevo proyecto en el software de diseño del HMI</i>	139
Figura 99 <i>Entorno de trabajo del software de diseño del HMI</i>	140
Figura 100 <i>Diagrama de flujo de la interfaz de comunicación</i>	141
Figura 101 <i>Ventanas de operación del HMI</i>	141
Figura 102 <i>Ventanas de información del HMI</i>	142
Figura 103 <i>Ventanas de advertencia y precaución</i>	143

Figura 104 <i>Conexión del módulo WAGO de entradas y salidas digitales</i>	144
Figura 105 <i>Entrada y salida utilizadas del módulo WAGO</i>	144
Figura 106 <i>Funciones para encendido y apagado del arco</i>	145
Figura 107 <i>Movimiento relativo entre la mesa lineal y la antorcha del robot</i>	146
Figura 108 <i>Posiciones de soldadura</i>	147
Figura 109 <i>Nomograma de frecuencia – longitud de trama – velocidad de soldadura</i>	148
Figura 110 <i>Parámetros de longitud de trama y velocidad de trayectoria calculados</i>	148
Figura 111 <i>Programación del brazo robótico con la mesa lineal</i>	149
Figura 112 <i>Parámetros de soldadura en la instrucción ARC OFF</i>	150
Figura 113 <i>Alineación del acero rectangular para su posterior soldadura</i>	155
Figura 114 <i>Prueba de soldadura número 1</i>	157
Figura 115 <i>Prueba de soldadura número 2</i>	157
Figura 116 <i>Prueba de soldadura número 3</i>	158
Figura 117 <i>Prueba de soldadura número 4</i>	158
Figura 118 <i>Prueba de soldadura número 5</i>	159
Figura 119 <i>Aplicación de soldadura número 1, en la posición 1G</i>	160
Figura 120 <i>Aplicación de soldadura número 2, en la posición 1G</i>	161
Figura 121 <i>Aplicación de soldadura número 3, en la posición 1G</i>	161
Figura 122 <i>Aplicación de soldadura número 4, en la posición 1G</i>	162
Figura 123 <i>Prueba de soldadura número 1, en la posición 2F</i>	163
Figura 124 <i>Prueba de soldadura número 1, en la posición 2F, modificada</i>	164
Figura 125 <i>Prueba de soldadura número 2, en la posición 2F, modificada</i>	165
Figura 126 <i>Prueba de soldadura número 3, en la posición 2F, modificada</i>	165
Figura 127 <i>Prueba de soldadura número 4, en la posición 2F, modificada</i>	166
Figura 128 <i>Aplicación de soldadura número 1, en la posición 2F, optimizada</i>	167
Figura 129 <i>Aplicación de soldadura número 2, en la posición 2F, optimizada</i>	167

Figura 130 <i>Preparación de la probeta A</i>	169
Figura 131 <i>Aplicación de las tintas penetrantes en la probeta A</i>	170
Figura 132 <i>Aplicación del revelador en la probeta A</i>	170
Figura 133 <i>Preparación de probeta B</i>	171
Figura 134 <i>Aplicación de las tintas penetrantes en la probeta B</i>	171
Figura 135 <i>Aplicación del revelador en la probeta B</i>	171
Figura 136 <i>Resultados de inspección visual y tintas penetrantes aplicada a la probeta A</i>	172
Figura 137 <i>Resultados de inspección visual y tintas penetrantes aplicada a la probeta B</i>	173
Figura 138 <i>Ensayo de rotura realizado en la probeta A</i>	174
Figura 139 <i>Ensayo de rotura realizado en la probeta B</i>	174
Figura 140 <i>Resultado del ensayo de rotura realizado en la probeta A</i>	175
Figura 141 <i>Resultado del ensayo de rotura realizado en la probeta B</i>	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Sistemas de sujeción para robots</i>	39
Tabla 2 <i>Herramientas terminales para robots</i>	40
Tabla 3 <i>Detalle de aplicaciones de robots industriales</i>	46
Tabla 4 <i>Ejemplos de elementos activos y pasivos de una celda robotizada</i>	53
Tabla 5 <i>Tipos de mecanismos de elementos de transmisión</i>	80
Tabla 6 <i>Modelos disponibles de cajas reductoras a utilizar</i>	83
Tabla 7 <i>Condiciones a las que será sometido el husillo de bolas</i>	84
Tabla 8 <i>Flexión máxima permitida en vigas</i>	96
Tabla 9 <i>Entradas y salidas del PLC Xinje</i>	102
Tabla 10 <i>Datos del encoder para obtener velocidades, en sentido antihorario</i>	151
Tabla 11 <i>Datos del encoder para obtener velocidades, en sentido horario</i>	152
Tabla 12 <i>Desplazamiento gradual desde 300 hasta 1100 mm, sentido horario</i>	153
Tabla 13 <i>Desplazamiento gradual desde 300 hasta 1100 mm, sentido antihorario</i>	153
Tabla 14 <i>Pruebas de desplazamiento entre mesa y brazo robótico</i>	154
Tabla 15 <i>Valores de calibración para el controlador Fronius</i>	156
Tabla 16 <i>Datos de aplicación de soldadura lineal en la posición 1G</i>	160
Tabla 17 <i>Datos de prueba de soldadura lineal en la posición 2F</i>	163
Tabla 18 <i>Datos de prueba de soldadura lineal en la posición 2F, modificados</i>	164
Tabla 19 <i>Datos de aplicación de soldadura lineal en la posición 2F</i>	166

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Velocidad lineal máxima</i>	82
Ecuación 2 <i>Relación de transmisión</i>	82
Ecuación 3 <i>Torque de salida del reductor</i>	83
Ecuación 4 <i>Torque debido a pérdidas de transmisión</i>	84
Ecuación 5 <i>Velocidad promedio del husillo</i>	84
Ecuación 6 <i>Carga operativa promedio</i>	85
Ecuación 7 <i>Vidal útil esperada del husillo</i>	85
Ecuación 8 <i>Fuerza axial</i>	85
Ecuación 9 <i>Carga dinámica promedio</i>	86
Ecuación 10 <i>Inercia del husillo</i>	87
Ecuación 11 <i>Inercia de la carga</i>	87
Ecuación 12 <i>Inercia total</i>	87
Ecuación 13 <i>Torque necesario para la aceleración angular</i>	87
Ecuación 14 <i>Carga máxima del bloque lineal</i>	89
Ecuación 15 <i>Carga dinámica del bloque lineal</i>	90
Ecuación 16 <i>Conversión de masa a fuerza</i>	91
Ecuación 17 <i>Esfuerzo flexionante máximo</i>	93
Ecuación 18 <i>Módulo de sección del material</i>	93
Ecuación 19 <i>Flexión máxima permitida</i>	96
Ecuación 20 <i>Corriente nominal del motor</i>	99
Ecuación 21 <i>Corriente de arranque del motor</i>	100
Ecuación 22 <i>Corriente de protección</i>	101
Ecuación 23 <i>Velocidad de desplazamiento lineal</i>	123
Ecuación 24 <i>Velocidad angular del motor</i>	124
Ecuación 25 <i>Frecuencia de control del motor</i>	124

Ecuación 26 <i>Factor de conversión de frecuencia</i>	124
Ecuación 27 <i>Velocidad máxima de desplazamiento lineal de la mesa</i>	125
Ecuación 28 <i>Pulsos necesarios para desplazamiento</i>	125
Ecuación 29 <i>Factor de conversión para desplazamiento de la mesa</i>	125
Ecuación 30 <i>Velocidad de desplazamiento del brazo robótico KUKA KR5Arc</i>	147
Ecuación 31 <i>Longitud de trama</i>	147

Resumen

El presente trabajo detalla el diseño y la implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con el brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga. El proyecto engloba diversas etapas, desde el diseño inicial hasta la aplicación práctica, incluyendo actividades de diseño, análisis CAE, programación PLC, etiquetado, sincronización y aplicación de soldadura lineal utilizando el brazo robótico y la soldadora Fronius. El desenlace del proyecto tiene como resultado una comunicación óptima entre los dispositivos empleados en el sistema mecatrónico. Asimismo, se realiza el diseño de una interfaz gráfica que permite el control de la mesa lineal a través de un panel táctil. Se demuestra la sincronización mediante pruebas parciales y totales con el objetivo de validar el correcto funcionamiento. También se ejecutan aplicaciones de soldadura en las posiciones 1G y 2F, detallando la calibración de los parámetros utilizados. La validez de los resultados se verifica mediante pruebas de laboratorio destructivas y no destructivas, realizadas por un inspector de soldadura debidamente certificado.

Palabras clave: Soldadura lineal, sincronización, mesa con desplazamiento, pruebas no destructivas, pruebas destructivas, brazo robótico, soldadora Fronius.

Abstract

This paper presents the design and implementation of a linear displacement table in a Cartesian coordinate system for linear welding applications using the KUKA KR5Arc robotic arm, situated in the Industrial Robotics Laboratory at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga. The project encompasses several stages, ranging from initial design to practical application. This includes design activities, CAE analysis, PLC programming, labeling, synchronization, and the execution of linear welding using both the robotic arm and the Fronius welder. The project's culmination yields optimal communication between the devices employed within the mechatronic system. Additionally, a graphical interface is designed to facilitate control of the linear table via a touch panel. Synchronization is demonstrated through partial and complete testing to validate proper functionality. Welding applications are also conducted in 1G and 2F positions, detailing parameter calibration. The validity of the outcomes is verified through both destructive and non-destructive laboratory tests, overseen by a duly certified welding inspector.

Keywords: Linear welding, synchronization, displacement table, non-destructive testing, destructive testing, robotic arm, Fronius welder.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La soldadura mediante brazos robóticos es una técnica eficaz para la fabricación y montaje de productos que se utiliza en numerosos sectores industriales a nivel mundial. En la actualidad, los brazos robóticos se han vuelto capaces de realizar una amplia gama de tareas; han sido utilizados en industrias: automotriz, aeroespacial, militar y de construcción, cuyo objetivo principal es la capacidad de producir piezas metálicas de alta calidad en un tiempo mucho menor que el requerido por el proceso tradicional de soldadura (Timings, 2008).

Aportando así beneficios, como el desarrollo de proyectos más complejos con mayores estándares de calidad, mayor eficiencia y mayor flexibilidad, además de la reducción de costos de mano de obra y otros costos indirectos, como son costos de seguridad y de compensación por lesiones, de acuerdo con Cook et al. (2004).

Yusupov et al. (2015) indican que una de las aplicaciones más frecuentes en dichas industrias es el cordón de soldadura recto, el cual, se forma cuando las piezas de metal a unir, tienen bordes rectos y paralelos, y se sueldan en una sola pasada, cuyo resultado es una unión soldada en línea recta. Es importante que el manipulador mantenga una velocidad y ángulo constantes durante todo el trayecto para lograr un cordón de soldadura recto y uniforme.

Por otra parte, Montenegro y Yaguachi (2020) mencionan que, en Ecuador, como en cualquier país en vías de desarrollo, los procesos robotizados como soldadura pueden variar dependiendo de la industria y la disponibilidad de tecnología. En general, se espera que sean menos comunes debido a limitaciones económicas y de infraestructura. Sin embargo, existen industrias específicas, como la manufactura, que están adoptando cada vez más esta tecnología, para mejorar la eficiencia y la competitividad (Stinchcomb, 1989).

Un ejemplo de esto es la empresa "Inllyaku", dedicada a la fabricación de calefones eléctricos; mediante estudios de mercado, la empresa determinó que los costos y tiempos de

producción son demasiados altos en función a su demanda, para agilizar una etapa del proceso implementó una estación de soldadura para tubos de cobre mediante la utilización de un robot soldador FANUC 120I, que cumple con la tarea de soldar piezas de cobre de diferentes formas y tamaños (Gómez, 2017).

Según la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP, 2020), ubicada en la Zona 3 del Ecuador, la corporación estima que a mediados del 2021 se inicie la etapa conclusiva de la implementación completa del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas y componentes industriales (CIRT), mediante la indexación de la nueva área para el sistema de Metalizado, este sistema (actualmente en operación) cuenta con un avanzado conjunto de equipamiento que incluye un robot especializado en metalizado, el cual presenta la aptitud de ser programado considerando los requerimientos específicos de la entidad, permitiendo así la intervención de diferentes componentes que requieren este servicio.

Mediante la implementación del presente proyecto se contribuye en parte al desarrollo tecnológico del país, evitando la dependencia tecnológica internacional y generando nuevas alternativas de solución a problemas y procesos industriales, en especial a la industria manufacturera que tiene la necesidad de soldadura lineal.

Planteamiento del Problema

La celda robotizada de soldadura disponible en el Laboratorio de Robótica Industrial, incluye el brazo robótico de la marca KUKA modelo KR5Arc y accesorios como sistema de soldadura, mesa posicionadora de dos ejes y extractor de humo de soldadura; con los cuales se realizan aplicaciones y prácticas de soldadura robotizada.

El problema radica en que, para realizar cordones de soldadura lineales el brazo robótico KUKA KR5Arc desplaza su TCP en forma lineal mediante la combinación de trayectorias en arco de sus articulaciones, limitando el rango de movimiento del robot y su desplazamiento a una velocidad constante.

Además, la ausencia de accesorios y componentes que complementen la celda robotizada de soldadura, no permiten desarrollar nuevas aplicaciones de mejor calidad en procesos de soldadura.

Como mencionan Norberto Pires et al. (2003) la calidad de dicho proceso es altamente dependiente de factores fundamentales como la corriente, el nivel de voltaje, la rapidez con la que se realiza la soldadura, la cantidad de hilo expuesto fuera de la boquilla de contacto, el gas utilizado para proteger la soldadura y la duración del arco eléctrico.

El autor también menciona que un pequeño cambio en la distancia entre la antorcha de soldadura y el componente que se está soldando puede producir una variación considerable en la corriente y la tensión.

Debido a esto, se diseñará e implementará un accesorio a la celda robotizada de soldadura para la realización de cordones de soldadura lineales de mejor calidad, dicho accesorio consiste de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano, permitiendo reducir tiempos de proceso y mejorar la calidad de soldadura, lo cual es importante en aplicaciones en la industria. Los módulos industriales tienen costos elevados, por lo cual la implementación del accesorio resulta innovadora ya que puede solventar las necesidades requeridas sin altos costos de adquisición.

Justificación e Importancia

El proyecto se justifica al incorporar un accesorio a la celda robotizada de soldadura para la realización de cordones lineales, lo cual se propone como una solución innovadora, al utilizar un diseño simplificado que pueda cumplir la función de módulos industriales, además utilizando elementos que se encuentran a disposición del mercado ecuatoriano, ya que adquirir un módulo de unidad lineal de la marca KUKA presenta costos elevados y un rediseño completo de la celda robotizada actual.

La implementación del proyecto es importante porque se podrán realizar nuevas aplicaciones como construcción de piezas de máquinas y equipos, reparación de estructuras

metálicas, soldadura de vigas y láminas de acero, utilizando un módulo de bajo costo en comparación con las soluciones que ofrece la marca KUKA en sus unidades lineales. Un accesorio con estas características, y que es económicamente accesible representa un beneficio al área de manufactura que utiliza brazos robóticos para soldar.

Alcance

El alcance de este proyecto consiste en implementar como accesorio un sistema mecatrónico que permita el desplazamiento longitudinal de una pieza con un peso máximo de 20 kg a lo largo de un eje cartesiano con un recorrido de hasta 1100 mm, para realizar cordones de soldadura en estructuras metalizas ubicadas en las posiciones 2F y 1G, utilizando el alambre 70S-6, el cual se utiliza para aceros corrientes de baja aleación, considerando que los espesores de la junta no superen los 4 mm debido a las corrientes máximas de la soldadora.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano para soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Objetivos Específicos

- Realizar el estado del arte en relación a mesas lineales.
- Realizar el diseño mecánico de la mesa lineal para movimientos de alta precisión utilizando software CAD/CAE.
- Seleccionar e implementar sensores y actuadores.
- Diseñar el sistema de control para aplicaciones de soldadura con brazo robótico.
- Configurar el sistema de comunicación entre dispositivos.
- Realizar pruebas parciales de configuración y funcionalidad de dispositivos.

- Realizar pruebas de funcionalidad de la aplicación de soldadura, con movimientos sincronizados entre diferentes dispositivos.

Hipótesis

Mediante el diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano, se podrá realizar soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Variable Independiente

Mesa con desplazamiento en un eje cartesiano.

Variable Dependiente

Soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Capítulo II

Fundamentación Teórica

Robot Industrial

La definición de robot industrial no se encuentra unificada a nivel mundial, ya que dicho término ha sido tema de debate a lo largo de los años debido a la evolución de la tecnología y los requisitos de las industrias y fabricantes de robots industriales.

Una de las más aceptada surge por parte de la *Robotic Industry Association* (RIA, 1974), la cual refiere al robot industrial como "manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas".

Sin embargo, es importante mencionar que existen definiciones propuestas por otras organizaciones. De acuerdo con la *International Organization for Standardization* (ISO, 2012), un robot industrial es "un manipulador multifuncional reprogramable, controlado automáticamente, programable en tres o más ejes, que puede estar fijo o en una plataforma móvil, para su uso en aplicaciones de automatización industrial". Las definiciones de estas dos organizaciones resaltan la capacidad de los robots industriales para realizar movimientos programados según las necesidades de la producción y su versatilidad en el manejo de diferentes elementos.

En la actualidad, con el florecimiento del aprendizaje autónomo y el apogeo de la inteligencia artificial, los robots industriales han adquirido capacidades de percepción, toma de decisiones más acertadas y la predicción de intenciones mediante el uso de sensores propioceptivos y exteroceptivos, como sensores de visión, tacto, movimiento, etc.

Debido a esto, algunos autores incluyen aspectos de *Human–Robot Collaboration* (HRC), tal es el caso de El Zaatari et al. (2019), en su investigación culminan que un robot industrial es un sistema compuesto por un manipulador, un controlador y sensores, que se centra en permitir que el robot y el humano operen en conjunto para completar tareas de

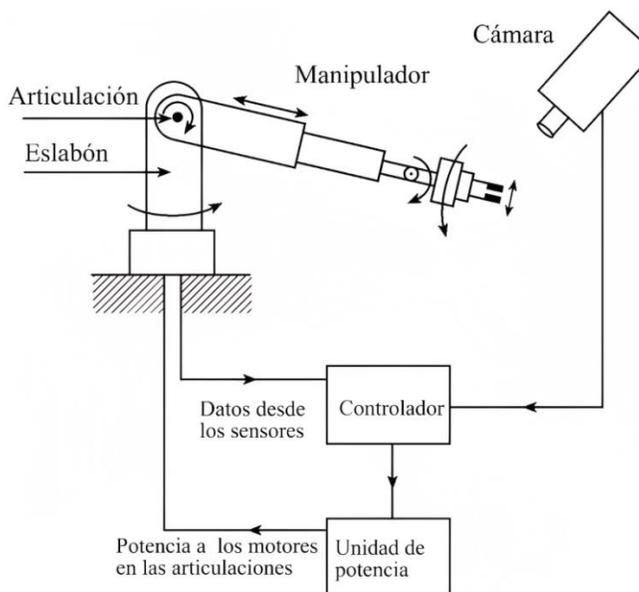
manera segura; esta definición enfatiza la importancia de la colaboración segura entre humanos y robots en el entorno de trabajo. A continuación, se explican los componentes esenciales mencionados por el autor.

Componentes del Robot Industrial

Teniendo en cuenta a Iñigo y Vidal (2002), dentro del mundo de la robótica es indispensable entender que un robot industrial puede ser caracterizado de muchas maneras, el caso más común de ver en la industria, es el robot manipulador, el cual se indica en la Figura 1, con sus respectivos componentes elementales para su funcionamiento.

Figura 1

Componentes básicos de un robot manipulador



Nota. Tomado de (Iñigo y Vidal, 2002, p. 2).

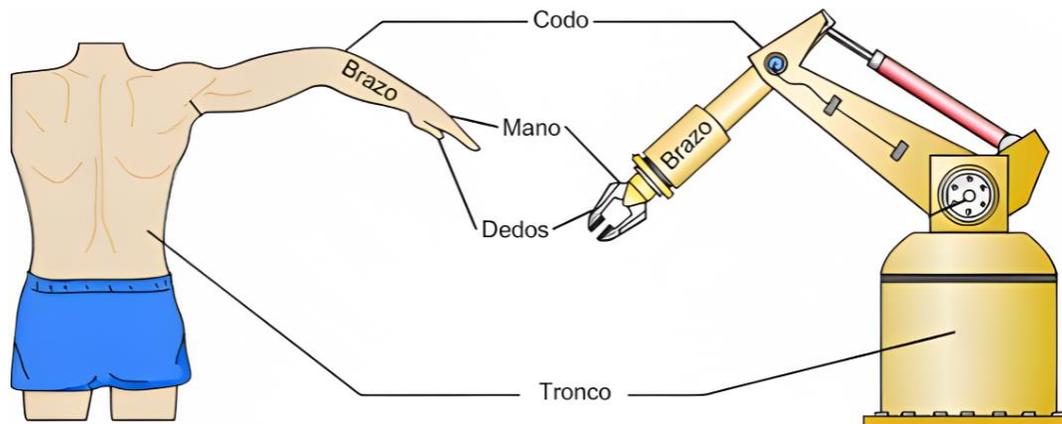
Existen elementos que complementan al robot con funcionalidades adicionales para el desarrollo de aplicaciones específicas. Barrientos et al. (2007) sugiere que “un robot industrial está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de potencia y control, y elementos terminales” (p. 31), los cuales se detallan a continuación.

Estructura Mecánica.

Se refiere a su estructura física que se asemeja con la anatomía humana, compuesta básicamente por eslabones (brazo) y articulaciones (codo) como se indica en la Figura 2 con más detalle, los cuales le permiten moverse y realizar tareas en el entorno de trabajo. Estos elementos proporcionan resistencia y movilidad al robot. Cabe señalar que cada estructura mecánica es diseñada de acuerdo con los requerimientos de las industrias para aplicaciones específicas, asegurando un rendimiento óptimo y seguro del robot en su tarea.

Figura 2

Comparación de la anatomía humana con la estructura del robot industrial



Nota. Tomado de (Sasig, 2021).

Sistema Sensorial.

El sistema sensorial en un robot industrial permite capturar y procesar información sobre el entorno de trabajo. Gracias a una variedad de sensores internos y externos, como los de posición, presión, fuerza, temperatura y visión; el sistema sensorial permite al robot detectar objetos, medir fuerzas, regular la temperatura y evitar colisiones. El uso correcto de los sensores mejora la autonomía y la seguridad del robot y su operario.

Sistema de Transmisión.

Este sistema desempeña un papel crucial al transmitir el movimiento y la potencia desde los actuadores a las partes móviles del robot. Mediante el uso de componentes como

engranajes, cadenas o correas, este sistema garantiza la precisión y durabilidad requeridas para realizar las tareas asignadas.

Sistema de Potencia y Control.

Se encarga de controlar el movimiento del robot y suministrar la energía necesaria al mismo, logrado garantizar un rendimiento eficiente y preciso con el uso de componentes eléctricos y electrónicos. El sistema de potencia proporciona la energía eléctrica necesaria, mientras que el sistema de control basado en un microcomputador, recibe las señales enviadas por los sensores y coordina los movimientos y acciones del robot. Actualmente existe unidades de control más eficientes y flexibles, como es el caso del controlador KR C4 de la Figura 3, desarrollada por la empresa KUKA.

Figura 3

Unidad de control KR C4



Nota. Cinco variantes disponibles la unidad de control KR C4 para la integración de distintos entornos de trabajo. Tomado de (KUKA, 2017).

Sistema de Accionamiento.

Este sistema está diseñado para convertir la energía suministrada en movimiento a través de actuadores eléctricos, hidráulicos o neumáticos, que permiten el control necesario para que el robot realice sus tareas con precisión y eficiencia. Es importante destacar que la implementación de un buen sistema de accionamiento es esencial para lograr un funcionamiento óptimo del robot en su entorno de trabajo.

Elementos Terminales.

También conocidos como efectores finales, son componentes esenciales ubicados en el extremo del brazo robótico y son los responsables de realizar tareas específicas según la aplicación. Existen desde garras o pinzas para la manipulación de objetos, hasta herramientas de soldadura, corte o mecanizado. En la Tabla 1 se enlista los elementos de sujeción más comunes, detallando su accionamiento y uso.

Tabla 1

Sistemas de sujeción para robots

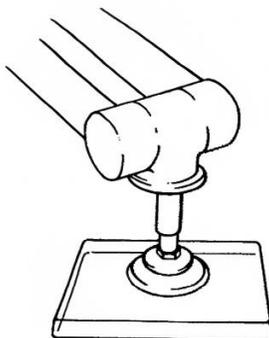
Tipo de sujeción	Accionamiento	Uso
Pinza de presión	Neumático o eléctrico	Manipulación de piezas sobre las que no importe presionar
Ventosa de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Nota. Tomado de (Barrientos et al., 2007, p. 58).

Uno de los efectores más usados en la industria, es la ventosa de vacío de la Figura 4, cuyo trabajo es la manipulación de objetos con superficie lisa.

Figura 4

Ventosa de vacío



Nota. Funcionamiento de una ventosa de vacío. Tomado de (Ollero, 2005, p. 25).

En la Tabla 2 se tabula ejemplos de herramientas terminales que puede tener un robot industrial.

Tabla 2*Herramientas terminales para robots*

Tipo de herramienta	Característica
Pinza de soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar
Soplete de soldadura por arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde
Fresa – lija	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc.
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales

Nota. Tomado de (Barrientos et al., 2007, p. 60).

Los robots industriales poseen una serie de características particulares que, indudablemente los hacen adecuados para varias aplicaciones industriales, aportando una serie de ventajas como mayor eficiencia, calidad, precisión y seguridad en la zona de trabajo.

Características del Robot Industrial

De acuerdo con Reyes (2011) una de las características principales del robot industrial es la habilidad de repetir un proceso durante las 24 horas del día sin descansar y sin disminuir la calidad de la producción. Además, Barrientos et al. (2007) analizan algunas de las características más significativas, las mismas que, en conjunto se traducen en una mejora en la productividad y rentabilidad de la industria, descritas a continuación:

Repetibilidad.

Es la capacidad de efectuar una misma tarea de forma consistente en cada ciclo de trabajo, esta característica es fundamental para garantizar calidad, eficiencia y productividad en tareas que requieren altos niveles de precisión y calidad, mediante el uso de actuadores precisos y sistemas de control avanzados.

Precisión.

Es la habilidad de realizar tareas y movimientos con exactitud y mínima tolerancia, generando la destreza de manipular y posicionar objetos con gran nivel de detalle, asegurando resultados confiables y reduciendo los desperdicios generados en el proceso.

Grados de Libertad (GDL).

Miden la capacidad que tiene un robot para moverse, es decir, representa cada movimiento independiente controlable que puede realizar el robot. Según la definición, para que un robot se considere industrial, debe tener más de tres grados de libertad. Los múltiples grados permiten realizar movimientos complejos, influyendo en la versatilidad del robot y su autoadaptabilidad al entorno de trabajo.

Programabilidad.

La programabilidad del robot permite usar diferentes dispositivos al operador para determinar secuencias de movimiento, velocidad, fuerza y otras variables modificables a través de variedad de programas o lenguajes de programación.

Capacidad de Carga.

Es la máxima carga que un robot puede manipular de manera segura. La capacidad de carga se determina considerando la aplicación específica. Se debe cautelar que el robot pueda manejar las cargas requeridas sin comprometer la seguridad y rendimiento.

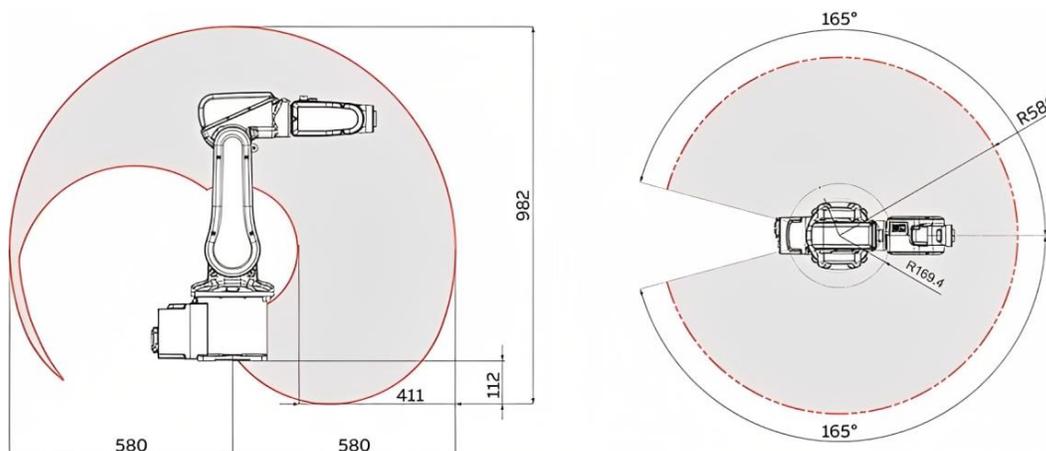
Campo de Trabajo.

Es el volumen espacial donde el robot puede realizar todos sus posibles movimientos sin generar puntos de singularidad, el mismo que está delimitado por el tamaño, la geometría y tipo de los eslabones. En el espacio de trabajo existen puntos en los que exclusivamente se puede posicionar mediante orientaciones específicas, normalmente estos puntos son los que se encuentran más cerca y lejos del robot, en la Figura 5 se ejemplifica un campo de trabajo.

Cuando un robot se encuentra en funcionamiento, el campo de trabajo debe estar condicionado a invasiones, mediante sensores de presencia o vallas de seguridad con el fin de salvaguardar la integridad de los operadores.

Figura 5

Campo de trabajo de un robot industrial



Nota. Vista vertical y superior del espacio de trabajo de un robot industrial de 6 GDL, modelo ABB IRB120. Tomado de (Bhatt et al., 2019).

Estas características generan gran efectividad en los robots industriales para la automatización de distintos procesos y la identificación de las mismas determina el modelo más óptimo para una tarea específica, debido a que existe varias clasificaciones de robots industriales detalladas a continuación.

Clasificación de los Robots Industriales

Spong et al. (2020) señalan que existen diferentes criterios para clasificar a un robot industrial, basándose desde perspectivas puntuales como sus grados de libertad, la fuente de energía para el accionamiento de sus articulaciones o su método de control, hasta conceptos básicos como su geometría. Según Ollero (2005), la forma más común de clasificar a un manipulador es mediante su geometría, por consiguiente, se detalla los cinco tipos de geometrías de un robot industrial.

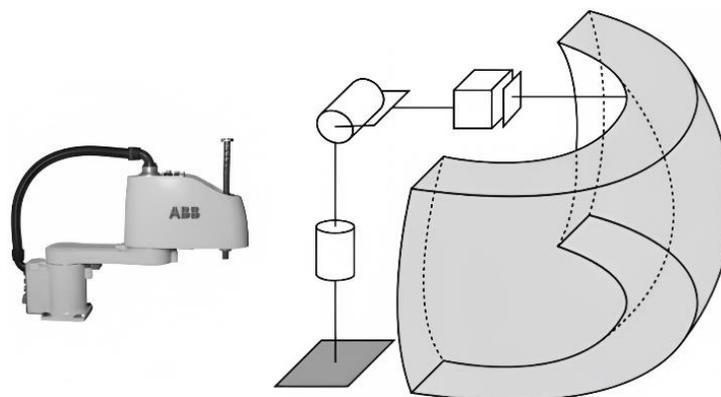
SCARA (RRP).

El manipulador SCARA (*Selective Compliant Assembly Robot Arm*) que se muestra en la Figura 6 tiene dos articulaciones rotativas y una prismática tal como el manipulador de

geometría esférica, a pesar de esto, es bastante diferente a dicho manipulador, ya que los ejes de las articulaciones rotativas son paralelos y el desplazamiento de la articulación prismática es perpendicular al plano. El diseño de este tipo de robots es óptimo para aplicaciones de pick and place y ensamblaje de piezas en procesos rápidos y repetitivos, gracias a su alta velocidad y precisión en movimientos planos.

Figura 6

Manipulador SCARA ABB IRB910SC



Nota. A la izquierda robot SCARA ABB IRB9910SC y a la derecha la representación simbólica de su espacio de trabajo. Tomado de (Spong et al., 2020, p. 16).

Geometría Cartesiana (PPP).

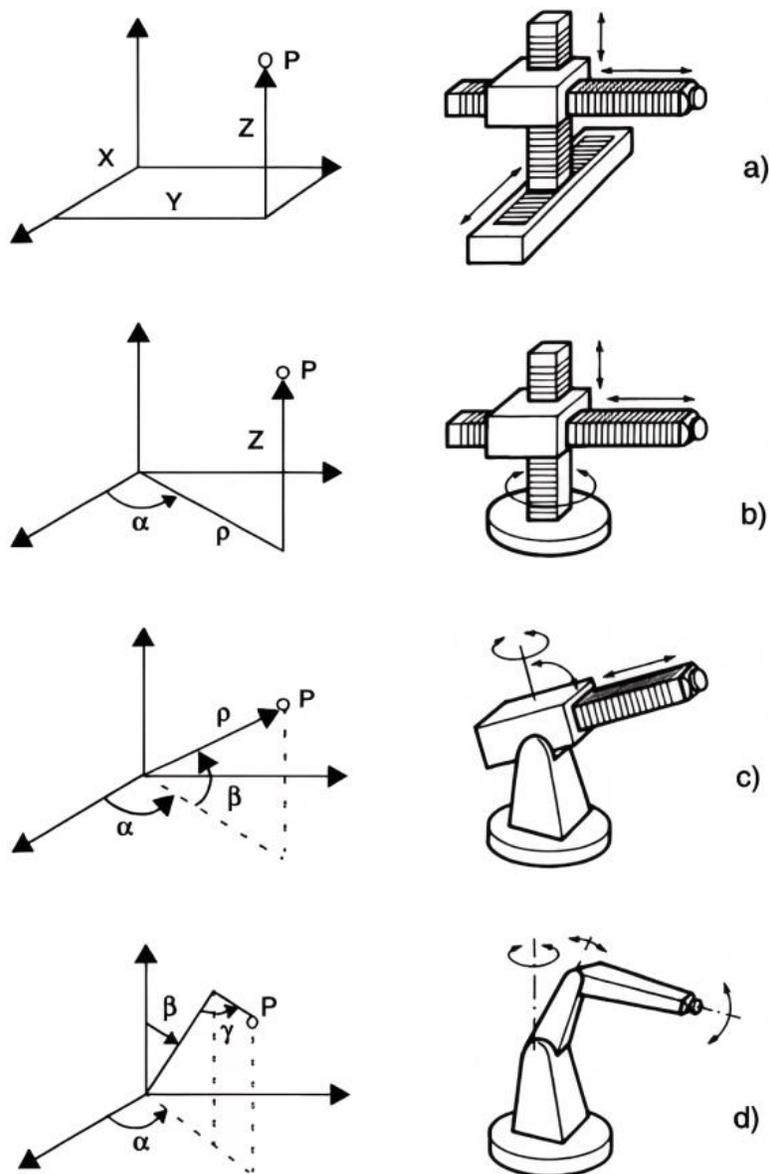
Un manipulador con esta geometría consta de tres articulaciones prismáticas, lo que se traduce a movimientos lineales a lo largo de un eje específico, además, las variables de cada articulación del manipulador son las coordenadas cartesianas (x , y , z) del efector final con respecto a la base del robot como se muestra en la Figura 7a.

Geometría Cilíndrica (RPP).

Esta geometría está constituida por una articulación rotativa, la cual produce una rotación alrededor de la base, seguida de dos articulaciones prismáticas, generando un desplazamiento lineal, las variables de cada articulación del manipulador son las coordenadas cilíndricas del efector final con respecto a la base del robot como se muestra en la Figura 7b.

Figura 7

Configuraciones básicas de los robots manipuladores



Nota. Representación en el plano (izquierda) y gráfica (derecha) de las geometrías de los manipuladores. Tomado de (Ollero, 2005, p. 19).

Geometría Esférica (RRP).

También llamada geometría polar, cuenta con dos articulaciones rotativas, seguidas de una prismática, esta última permite un movimiento lineal del efector final como se muestra en la Figura 7c, logrando la manipulación de objetos en diferentes posiciones y orientaciones.

Geometría Articulada (RRR).

A esta geometría también se la conoce con el nombre de angular o antropomórfica por su estrecha similitud al movimiento del brazo humano, gracias a sus tres articulaciones rotativas, las cuales pueden girar en un eje específico, generando movimientos en múltiples direcciones como se muestra en la Figura 7d. Son adecuados para aplicaciones que demandan un gran alcance y movilidad, permitiendo la manipulación de objetos en grandes espacios y en posiciones variadas.

Una vez revisado la definición de robot industrial, sus componentes, características y su clasificación, se puede analizar las aplicaciones más comunes de estos. Cada robot tiene características y componentes especiales para una aplicación específica, a continuación, se detalla las aplicaciones del robot industrial.

Aplicaciones del Robot Industrial

Una investigación proporcionada por Diaz-Cano et al. (2021), indica que cada vez se está tomando mayor importancia al desarrollo de los robots, por lo que, las aplicaciones de los robots industriales se están expandiendo a gran velocidad por grandes fábricas a nivel mundial y también en empresas grandes, medianas y pequeñas que requieran su uso.

Desde el punto de vista de Ikusi (2022), la robótica industrial ha sido de gran ayuda en la mayoría de procesos de manufactura, debido a que pueden desarrollar múltiples tareas adaptadas a una variedad de empresas, sin embargo, es necesario considerar que este tipo de cambios conllevan riesgos que se debe fortalecer, como es la transformación digital que en la actualidad incluso ha sido de gran ayuda para que muchas empresas sigan con su funcionamiento. Existe una gran variedad de robots industriales, los mismos que dependerán del objeto a manipular o la actividad a realizar, en la Tabla 3 se enlista las aplicaciones más destacadas en la industria de la robótica.

Tabla 3*Detalle de aplicaciones de robots industriales*

Aplicaciones
Manipulación de materiales
Soldadura
Pick and Place
Agricultura
Plegado
Generación de trayectoria
Pintura
Ingeniería inversa
Verificación de procesos
Ensamblaje
Paletizado
Pulido
Modelado por inyección
Mecanizado

Nota. En la tabla se observa las distintas aplicaciones consideradas como principales que pueden realizar los robots industriales. Tomado de (Ikusi, 2022).

Para esta ocasión se aplica como objeto principal de estudio a la soldadura que se puede realizar gracias a los robots industriales, se utiliza como punto de partida a la Revista de Robots (2020) donde se menciona la importancia en la industria de la soldadura robotizada para poder optimizar un trabajo, además de favorecer la competitividad de las empresas.

Soldadura Industrial

Algunas de las ventajas que ofrecen los robots soldadores a las empresas, se puede identificar como realizar este proceso con la mayor eficiencia posible, además que se le puede incluir los estándares de calidad necesarios para cada proceso; se destacan también porque se pueden adaptar a diversos procesos y capacidad de realizar una soldadura en un ángulo

específico. Los tipos de soldaduras más comunes utilizadas en la industria de detallan a continuación:

Soldadura por Arco.

Al producir un arco eléctrico, entre cualquier superficie metálica y un electrodo, se le conoce como soldadura por arco, en este estado se pueden fundir dos materiales, con la finalidad de unirlos, este fenómeno sucede al ser sometidos a altas temperaturas, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Visualización de soldadura por arco de un brazo robótico



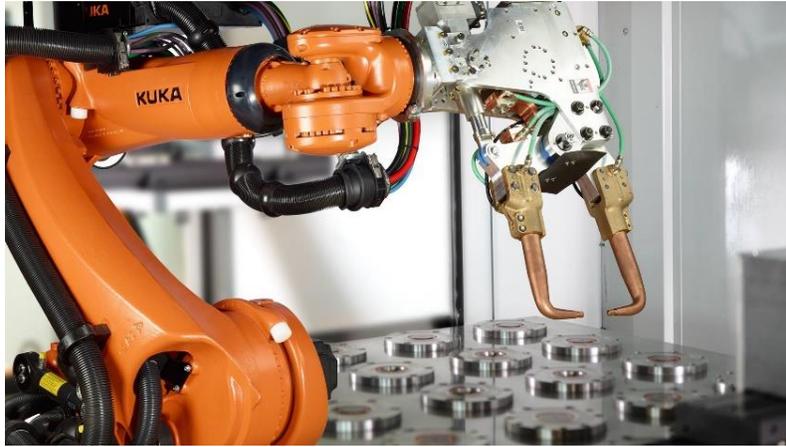
Nota. Tomado de (Owen-Hill, 2018).

Soldadura por Puntos.

Este tipo de soldadura implica que la herramienta a utilizar en el extremo del brazo, será una pinza dedicada a la soldadura por puntos como se indica en la Figura 9. Se debe considerar como primordial que las partes a soldar deben mantener una medida referencial, con la finalidad de evitar que la suelda se desplace o salga con errores.

Figura 9

Robot de soldadura por puntos



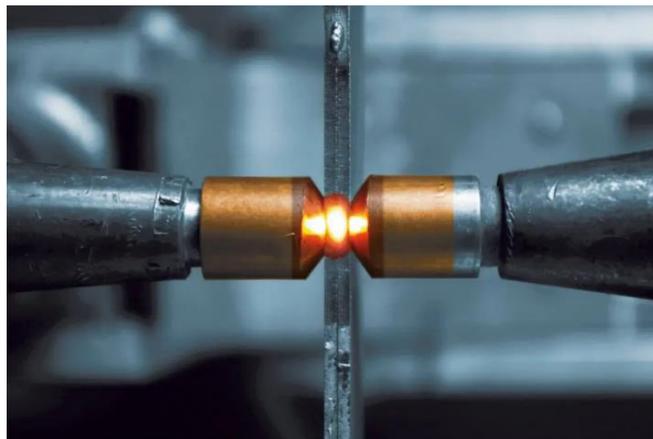
Nota. Efecto final instalado para soldadura por puntos. Tomado de (KUKA AG, 2017).

Soldadura por Resistencia.

Teniendo en cuenta a British Federal México (2017), como se muestra en la Figura 10, la soldadura por resistencia se trata de un proceso termoeléctrico en el que se genera calor mediante el paso de una corriente eléctrica en la zona de unión de las partes que se desea unir, durante un tiempo controlado, con precisión y presión controlada.

Figura 10

Robot de soldadura por resistencia



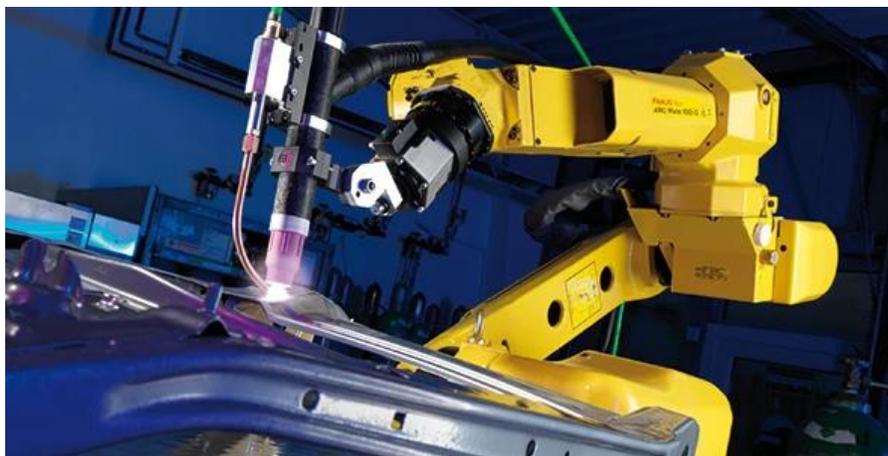
Nota. Ilustración del funcionamiento de la soldadura por resistencia al generar un proceso termoeléctrico. Tomado de (British Federal México, 2017).

Soldadura por Arco TIG.

Se debe considerar que toda la soldadura realizada por brazos robóticos tiene un mínimo porcentaje de error, siendo la precisión un factor que se debe considerar; al hablar de la soldadura por arco, pero haciendo algo de énfasis en “TIG”, se entiende que se sustituye el electrodo convencional por un electrodo de tungsteno, en la Figura 11, se muestra una aplicación de este tipo de soldadura.

Figura 11

Robot de soldadura por arco TIG



Nota. Soldadura por arco TIG de chasis vehicular. Tomado de (Reips, 2021).

También existe la soldadura MIG/MAG, la cual se utiliza en el desarrollo de este proyecto y se detalla más a profundidad en la parte final de este capítulo, a continuación, se analizan otras aplicaciones comunes de los robots industriales enlistadas en la Tabla 3.

Manipulación de Materiales

De acuerdo con Iñigo y Vidal (2002), esta aplicación puede parecer la más sencilla y fácil de todas, sin embargo, la complejidad de esta aplicación radica en agarrar y colocar los materiales de manera correcta. Las características necesarias para este proceso son: la capacidad de carga, precisión y repetibilidad, con las cuales se puede clasificar, mover y seleccionar materiales pesados, pequeños o voluminosos como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Robot adaptado para manipular materiales



Nota. Robot marca Fanuc ordenando esferas en su respectiva caja. Tomado de (Fanuc, 2016).

Pintura Industrial

Esta aplicación principalmente es utilizada en la industria automotriz como se ilustra en la Figura 13, los movimientos del robot deben ser suaves y continuos para que la pintura se impregne de manera uniforme generando un acabado de calidad. Los robots industriales tienen hasta seis GDL, logrando pintar superficies de difícil acceso.

Figura 13

Brazos robóticos aplicando capas de pintura



Nota. Línea de pintura automotriz con robots ABB. Tomado de (Fairchild, 2021).

Ensamblaje de Piezas y Elementos

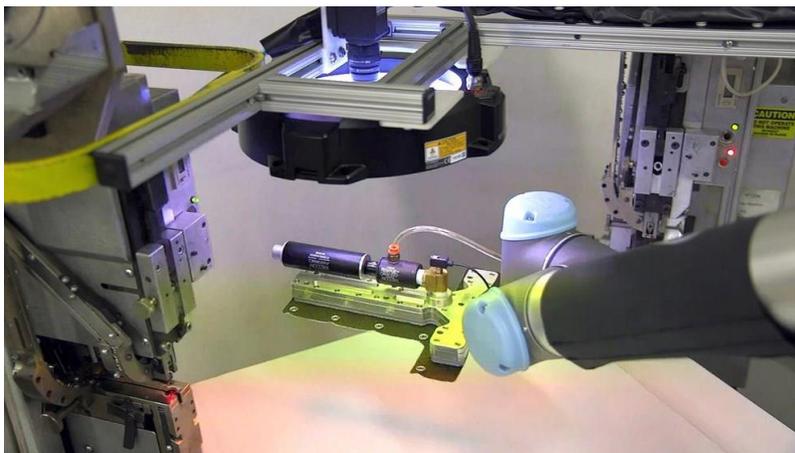
Esta aplicación revolucionó la industria manufacturera, mejorando la flexibilidad y eficiencia del proceso, mediante la unión de elementos individuales para generar sistemas más completos con gran precisión y rapidez, aportando mayor calidad y productividad.

Inspección y Control de Calidad

Teniendo en cuenta a Valencia y Amaya (2014) en su trabajo de titulación, la importancia de los robots en este tipo de tareas es determinante para una empresa, minimizando errores en la producción. Equipados generalmente con sensores y herramientas especiales para la detección de defectos, verificación de tolerancias y dimensiones mediante visión artificial, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Control de calidad con robot colaborativo UR5



Nota. Control de calidad de tubo termo retráctil con cremallera producido por la empresa Zippertubing. Tomado de (Cobot Trends Staff, 2019).

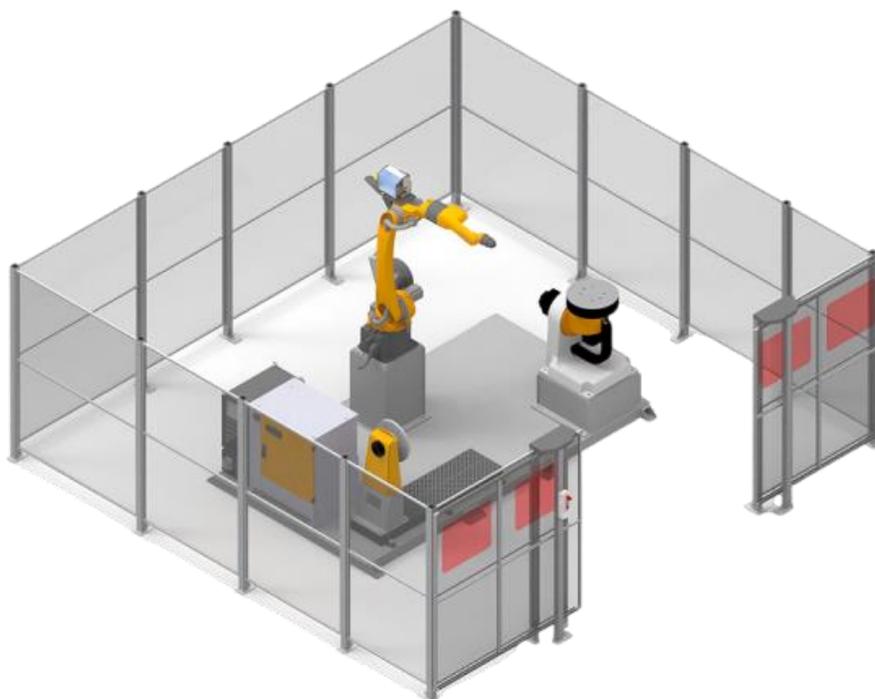
Todas las aplicaciones descritas anteriormente tienen su propio espacio de trabajo, denominando celda robotizada, el diseño de una celda es crítico para el funcionamiento óptimo y sincronizado del robot en conjunto con equipos especializados. A continuación, se profundiza con más detalle el tema.

Celdas Robotizadas

Según la *International Organization for Standardization* (ISO, 2016) una celda robotizada es aquella que se compone de uno o más sistemas robóticos incluyendo la maquinaria correspondiente, el espacio de seguridad y las medidas de protección correspondientes, como se indica en la Figura 15.

Figura 15

Ejemplo de celda robotizada



Nota. Ilustración gráfica de una celda de mecanizado con plato giratorio y mesa posicionadora. Tomado de (Wollmann, 2021).

Además, también se concreta que “una celda robotizada, es aquella que comprende el robot industrial, los elementos terminales y los equipamientos auxiliares que ayudan al robot a realizar su tarea” (Barbecho, 2020).

De alguna manera, se puede describir la celda robotizada como aquella área restringida donde trabaja el robot y quedan recogidos todos los elementos necesarios para que trabaje, estos elementos se pueden clasificar en activos y pasivos, detallados a continuación.

Elementos Activos y Pasivos

Estos elementos periféricos son vitales para garantizar que la celda robotizada ejecute sus funciones de manera correcta y segura. Según Balseca y Cisneros (2022) en su trabajo de titulación, aquellos elementos que están en continua relación con el robot y el material se les denomina activos, mientras que los elementos pasivos no tienen una colaboración directa con el robot, no obstante, proporcionan soporte a la celda facilitando su funcionamiento. Ejemplos de estos componentes se enlistan en la Tabla 4.

Tabla 4

Ejemplos de elementos activos y pasivos de una celda robotizada

Elementos Activos	Elementos Pasivos
Brazo robótico	Extractor de humo
Cabezal fresador	Banda transportadora
Mesa posicionadora	Mesa de trabajo
Antorcha de soldadura	Intercambiador de herramientas
Ventosa	Accesorios de sujeción

Nota. Ejemplos de componentes activos y pasivos disponibles en el Laboratorio de Robótica Industrial.

Estos elementos son utilizados para diferentes aplicaciones, y su funcionamiento puede variar dependiendo de cómo y donde estén ubicados, es decir, su disposición en la celda robotizada. La disposición estratégica del robot y sus complementos garantizan un funcionamiento eficiente y seguro.

Disposición del Robot en la Celda Robotizada

Según (Barrientos et al., 2007), al momento de implementar una celda robotizada, se debe considerar cuatro disposiciones básicas que puede tener un robot en una celda robotizada descritas a continuación:

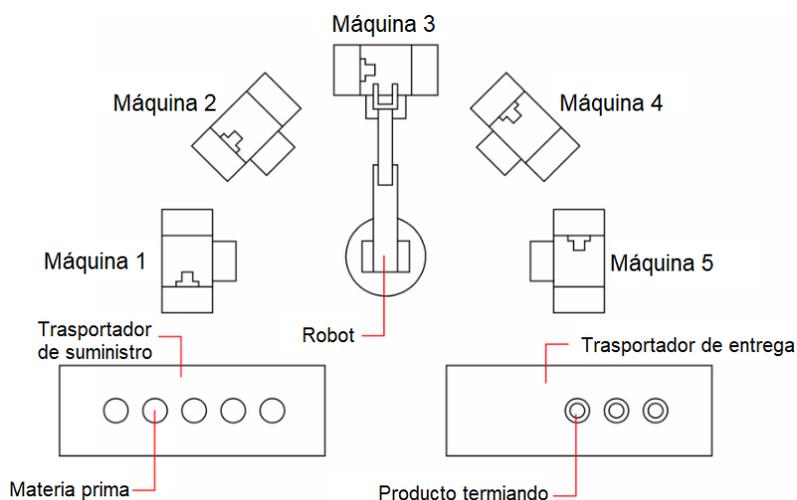
Robot en el Centro.

Es una disposición comúnmente utilizada en la industria, el robot se sitúa en el centro de la celda quedando rodeado por el resto de elementos facilitando su interacción. Los robots con geometría articulada, cilíndrica, polar o SCARA, son ideales para este tipo de disposición debido a que hacen uso de su máximo campo de trabajo.

Entre las ventajas claras de esta disposición, se tiene: accesibilidad y alcance máximo, eficiencia en el flujo de trabajo y distribución equitativa del espacio, con su principal aplicación en la carga y descarga material de máquinas herramientas, como se ilustra en la Figura 16.

Figura 16

Disposición del robot en el centro de la celda



Nota. Tomado de (Murugan, 2016)

Robot en Línea.

Los robots se colocan en línea recta o en paralelo a lo largo de la celda, trabajando sobre elementos que son abastecidos por un sistema de transporte, normalmente una banda transportadora. Entre sus aplicaciones más tradicionales, sobresale la aplicación de pintura en carrocerías de vehículos, donde existen robots ubicados en paralelo como se ilustra en la Figura 13, los cuales pueden llegar con una orientación adecuada a todos los puntos del vehículo que necesitan ser cubierto por pintura.

Una de las características de este tipo de disposición en la secuencia de trabajo continua, es decir, con los robots en línea, los componentes pueden pasar de un robot al siguiente en una línea de ensamblaje, ya que cada robot se especializa en una tarea, siendo otra característica que conduce a una mayor eficiencia y reducción de tiempo de trabajo.

Robot Móvil.

Esta disposición prácticamente aumenta un GDL al robot industrial, ya que se implementa una vía que posibilita un recorrido lineal del mismo. La ventaja de los robots colocados en esta disposición es el aumento de su campo de trabajo, un ejemplo claro es la soldadura de piezas de extensas dimensiones, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Disposición del robot móvil



Nota. Soldadura de platinas metálicas a tubería de acero. Tomado de (Shery, 2022).

Robot Suspendido.

Esta disposición implica que el robot se encuentre en una posición colgante en el techo o superficie en el espacio de trabajo como se muestra en la Figura 18, como su principal característica se tiene el ahorro de espacio en el suelo de la celda, ideal para áreas de trabajo con espacio limitado.

Las operaciones de adhesivos, sellantes o corte, son las aplicaciones habituales para este tipo de disposición, debido a que el robot puede posicionarse en puntos que se encuentran sobre su eje vertical, obteniendo una mayor flexibilidad en sus movimientos.

Figura 18

Robot suspendido



Nota. Robot marca Fanuc dentro de una celda con tres centros de mecanizado. Tomado de (Danford, 2020).

Para garantizar un funcionamiento adecuado dentro de la celda, una de las cuatro disposiciones fundamentales descritas previamente debe estar implementadas en todos los tipos de celdas robotizadas, algunos tipos de celdas se analizan a continuación.

Tipos de Celdas Robotizadas

MaqMetal (2021) menciona que se puede implementar una celda a diferentes sistemas y procesos de varios sectores de la industria, debido a que existen celdas prediseñadas para una variedad de aplicaciones, las cuales, si se modifican, se puede diseñar celdas especiales para manipulación de máquinas herramientas, carga y descarga de materiales, soldadura, paletizado, pintura, entre otras. A continuación se detalla de manera general los tres tipos de celdas robotizadas disponibles en el Laboratorio de Robótica Industrial.

Celda de Soldadura.

Es un sistema integrado por un robot industrial y equipos diseñados especialmente para realizar el proceso de forma automática como se ilustra en la Figura 19. En comparación con el método tradicional, la celda ofrece beneficios como mayor velocidad y precisión, además de mejorar las condiciones de trabajo de los operarios, protegiéndolos de posibles quemaduras y el humo de soldadura.

Figura 19

Celda de soldadura robotizada



Nota. Celda implementada en el Laboratorio de Robótica Industrial.

Castro et al. (2017) indican que alrededor de los años noventa, la celdas robotizadas de soldadura se limitaban normalmente a la industria automotriz, sin embargo, en la pasada década varios investigadores han trabajado para mejorar los procesos de soldadura en todo tipo de industrias, esto se puede notar en el trabajo de Makris et al. (2012) que comprobaron que la técnica RFID mejoró la flexibilidad del proceso. Lo mismo ocurre con Ferradás y Salonitis (2013), quienes utilizaron la metodología SMED (*Single Minute Exchange of Dies*) para reducir los tiempos de cambio de material en la celda, y como último ejemplo, se tiene el caso de Caggiano et al. (2014) que mejoraron la calidad de las uniones y minimizaron el tiempo de preparación de material, identificando la posición de las piezas mediante visión artificial.

Celda de Manufactura.

Teniendo en cuenta a Wiese et al. (2022), este tipo de celdas como se indica en la Figura 20, son la solución más eficiente a la creciente demanda de las industrias manufactureras, ya que se automatiza las tareas de fabricación de varios productos en la misma celda, sin la necesidad de implementar un celda por cada producto diferente. El diseño de la celda varía según las necesidades de industria, pudiendo tener equipos auxiliares como intercambiador de herramientas, plato giratorio o bandas transportadoras o cabezal fresador.

Figura 20

Celda robotizada de mecanizado



Nota. Celda implementada en el Laboratorio de Robótica Industrial.

Celda de Paletizado.

El objetivo principal de esta celda es la organización de productos, ya sea para empacar, apilar o mover los mismos. Algunos de los beneficios de la celda son, aumento de velocidad en el proceso, disminución de daños del producto durante su manipulación o capacidad de operar con cargas pesadas. Según Moura y Silva (2018), en las etapas finales de las cadenas de suministro, es fundamental el proceso de manipulación, siendo la actividad que predomina en las aplicaciones de robots industriales en el mercado europeo. Un factor clave para este dominio, son sus elementos diseñados para la correcta manipulación de piezas o

productos, tales como efectores finales de sujeción detallados anteriormente en la Tabla 1, además de equipos especiales como bandas transportadoras, montacargas y elevadores.

Figura 21

Celda robotizada de paletizado



Nota. Celda implementada en el Laboratorio de Robótica Industrial.

Todas las celdas robotizadas deben ser correctamente implementadas, con una selección previa de elementos activos y pasivos, disposición adecuada para la aplicación y con las medidas de seguridad correspondientes, dichas medidas de seguridad se profundizan en el siguiente apartado.

Medidas de Seguridad

Uno de los criterios fundamentales en el diseño de celdas robotizadas, es la seguridad de las instalaciones, teniendo como finalidad, prevenir accidentes y proteger a los operarios y equipos. Según Gayet Del Estal (2023), aunque la incorporación de un robot en un proceso de producción suele reducir la cantidad de accidentes laborales, la posibilidad de que ocurra un accidente grave incrementa.

Estos accidentes según Relucio de la Fuente (2005) son causados por diferentes factores y motivos, entre los más comunes se tiene: mal funcionamiento del sistema, errores

humanos, acceso no autorizado en la zona de trabajo y falta de mantenimiento en piezas y elementos mecánicos.

Existen tres fases detalladas a continuación, en las que se debe implementar y garantizar las medidas de seguridad bajo estándares internacionales.

Fase de Diseño del Robot.

Las medidas de seguridad en esta fase son inherentes del robot y su sistema de control, siendo responsables de éstas el fabricante del mismo. En lo que se refiere a estándares internacionales, la (ISO, 2011) en su norma ISO 10218-1 especifica los requisitos de seguridad para los robots industriales, entre los temas clave que se abordan en la norma se encuentran los siguientes: el diseño seguro de los robots, los sistemas de control y los dispositivos de seguridad asociados; detección y prevención de colisiones; requisitos para los sistemas de parada de emergencia; y pautas para la comunicación de seguridad entre los robots y otros equipos complementarios.

Existen normas relacionadas con la ISO 10218-1, Expósito (2018) da como ejemplo la norma ISO 12100, donde se habla sobre los principios generales de diseño de maquinaria, incluyendo los robots industriales, también proporciona directrices generales sobre la evaluación y reducción de riesgos. La norma ISO 13849, actualizada en abril de 2023, de igual manera menciona los requisitos de diseño, pero principalmente aporta una metodología de validación para la integración de partes de sistemas de control relacionadas con la seguridad.

Fase de Implementación de la Celda Robotizada.

En este caso se implementa la continuación de la norma aplicada en la fase previa, siendo la ISO 10218-2 parte fundamental en la implementación de una celda robotizada, ya que esta norma se centra específicamente en los requisitos de los sistemas integrados de los robots, es decir, los elementos y equipos de una celda. El cumplimiento de esta norma es fundamental para garantizar un espacio de trabajo seguro, mediante el diseño, instalación y mantenimiento de la celda.

Como parte complementaria, la norma ISO 11161 especifica los requisitos de seguridad de los sistemas que incorporan dos o más máquinas interconectadas, brindando lineamientos de suma importancia para la interconexión de máquinas y equipos. Otras medidas que se puede implementar de manera general son: barreras de acceso, sistema intercambiador de herramientas y zonas de reparación.

Fase de Operación del Sistema.

Tiene estrecha relación con la fase de implementación de la celda, ya que se puede aplicar la misma norma, teniendo en cuenta medidas de seguridad extras como: abstenerse de ingresar a la zona de trabajo, señalética correcta, capacitación de personal y prueba progresiva de velocidad del programa del robot. Se puede considerar la norma ISO/TR 20218-2 como apoyo de la norma ISO 10218-2 ya que proporciona información y orientación adicional sobre cómo reducir el riesgo de invasión en las zonas que se consideran peligrosas.

Al empezar algún proyecto, se debe considerar que en su mayoría se requerirán piezas metálicas, por lo que es indispensable considerar una mesa con superficie de trabajo que sea robusta, resistente y rígida; una vez establecido estos indicadores, es cuando resulta útil una mesa de soldadura, pues servirá para realizar un trabajo de manera segura y cómoda (Rueda, 2022).

A continuación, se analiza el estado del arte de las principales mesas diseñadas para soldadura robotizada, sus características, tipos y aspectos generales para la selección de las mismas.

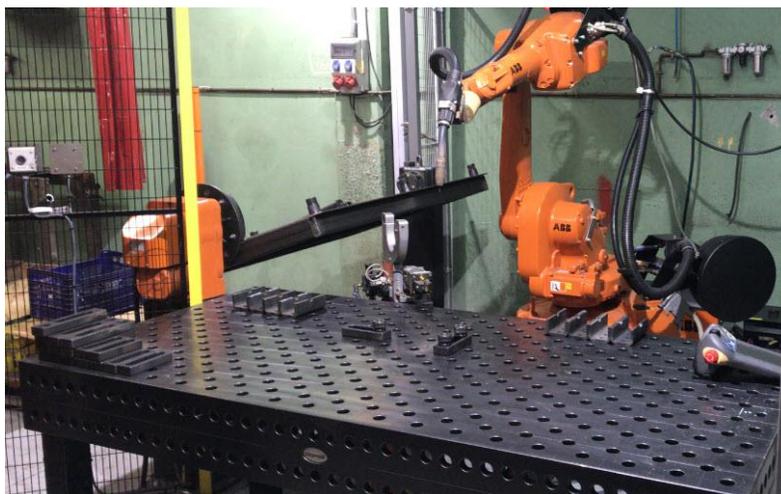
Mesas para Soldadura Robotizada

Para realizar una aplicación típica con robots industriales se requiere la selección de una mesa adecuada para la soldadura, como se indica en la Figura 22, es un tema que demanda un análisis del entorno, donde de manera principal se debe que establecer parámetros de selección, ya sea: tamaño, accesorios, superficies y movilidad de la misma, para

permitir una mayor protección contra las proyecciones de soldadura, rayaduras o contaminación del material (Solyman, 2020).

Figura 22

Mesa para soldadura robotizada



Nota. Tomado de (Metronic Metal, 2021).

En la actualidad existen diferentes tipos de mesas que pueden ser instaladas en celdas de soldadura por robot, incluso, un detalle adicional es que se puede elegir el tamaño que se acomode a las necesidades de la empresa, según la capacidad y disponibilidad del mercado (Metronic Metal, 2021).

Tipos de Mesa para Soldadura Robotizada

Según Solyman (2020) existe una gran variedad de mesas para soldar, las mismas que se adaptan a la necesidad del usuario, mesas que van desde las más sencillas y de un solo uso, hasta diferentes tipos de mesas posicionadoras, entre las principales mesas que existen en el mercado se nombra las siguientes opciones:

Mesas Modulares.

Tienen una característica donde no se necesita un trabajo de soldadura definida, y con esta consideración se puede acoplar a la necesidad que requiera en el transcurso del proceso de soldadura; se puede encontrar con indicadores que determinen estas necesidades como

son: el volumen, longitud o el diámetro de la pieza. Al tener la característica principal de ser modulares, este tipo de mesas pueden adquirir una gran área de trabajo, debido a su flexibilidad de unión, como se observa en la Figura 23.

Figura 23

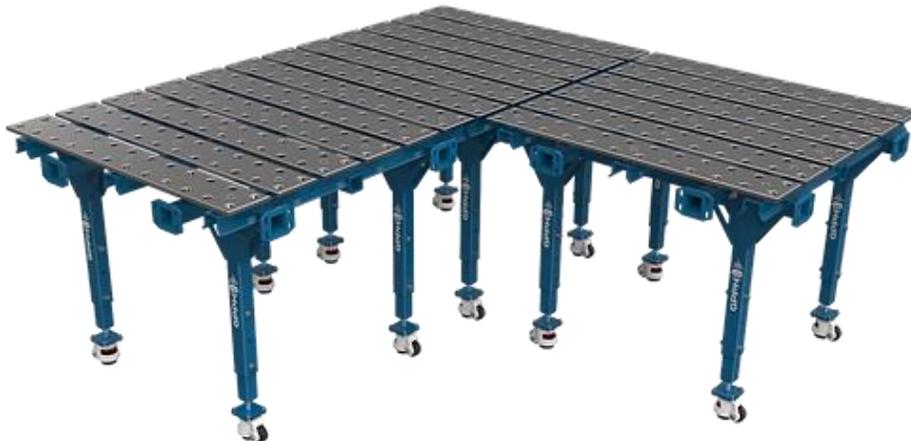
Modelo de mesa modular



Nota. Mesa modular marca GPPH. Tomado de (GPPH, 2021).

Figura 24

Modelo de mesa con superficie adaptable



Nota. Mesas de superficie adaptable marca GPPH. Tomado de (MetaWelding, 2021).

Mesas de Superficie Adaptable.

Cuando las piezas a soldar tienen una forma irregular, grandes tamaños, entre otras, se puede optar por elegir una de estas mesas adaptables, según se necesite, como se observa en la Figura 24.

En un aspecto industrial la marca KUKA dispone de varios tipos de mesas que se pueden ajustar para cualquier necesidad de la industria, entre las principales se tiene:

Mesa Circular Modular de un Eje KP1-MB.

Al ser un modelo con gran robustez, se puede aplicar a proyectos más fuertes, adicionalmente posee un centro de abastecimiento de material, donde se genera un considerable ahorro de tiempo, por último, es importante considerar que este diseño posee una precisión óptima, generando una garantía en el posicionamiento de la pieza, véase la Figura 25, para una mejor comprensión del mecanismo (KUKA, 2023).

Figura 25

Mesa posicionadora circular de un eje tipo KUKA KP1-MB



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Unidad de Acondicionamiento Modular KP1-MDC de un Solo Eje.

Al poseer una estructura con diseño modular, puede garantizar la flexibilidad de su aplicación, y su estructura compacta permite una rotación sin fin que no genera restricciones de trabajo, como se indica en la Figura 26.

Figura 26

Unidad de acondicionamiento modular tipo KUKA KP1-MDC



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Figura 27

Mesa posicionadora tipo KUKA KP2-HV – 2 ejes



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Posicionador KP2-HV de Dos Ejes.

Este diseño posee un área de trabajo reducida, sin embargo, este detalle ayuda a una mejor integración de aplicaciones debido a su forma sencilla, gracias a su tamaño tiene la facilidad de colocarse en cualquier sitio sin problema; también posee un suministro de material central y tiene el plato aislado de manera eléctrica, véase la Figura 27, donde se puede visualizar el tipo de acabado de este posicionador.

Posicionador KP2-SV HW de Dos Ejes.

Lo interesante de este posicionador es su aplicación, donde su disco giratorio genera mayor accesibilidad a zonas en específico, de componentes normales y complejos, lo que no impide la colocación de piezas de gran tamaño, inclusive en el suministro de material, la potencia de soldadura también es muy alta, soportando hasta 1000 A, en la Figura 28, se visualiza su diseño característico.

Figura 28

Mesa posicionadora tipo KUKA KP2-SV – 2 ejes



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Posicionador KP3-V2H de Tres Ejes.

La principal diferencia de este posicionador radica en la capacidad de carga, siendo el que mejor se adapta a este parámetro con una capacidad máxima de 1500 Kg, se adapta con

facilidad a las dimensiones de manera precisa en su estructura, además que gracias a sus 3 ejes brinda una planificación óptima y posee al igual que sus antecesores un alto servicio de soldadura continua de hasta 1000 A, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Mesa posicionadora tipo KUKA KP3-V2H – 3 ejes



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Posicionador KP3-V2MD de Tres Ejes.

Este posicionador posee la capacidad máxima de carga de 2000 Kg, Además, lo hace característico es su habilidad para ubicar tubos dentro de su horquilla, garantizando una mejor integración de estructuras, véase la Figura 30.

Figura 30

Mesa posicionadora tipo KUKA KP3-V2MD – 3 ejes



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Mesa Posicionadora de Dos Ejes.

Se incorpora este tipo de mesa en el análisis, debido a que ofrece una sola configuración de pieza de trabajo para todas las operaciones, en donde se podrá recurrir al uso de menos espacio de suelo, menos accesorios de soldado y una mayor capacidad de producción.

Según indica Arias y Toapanta (2013), el diseño modular, con pocas piezas móviles, pero de alta resistencia, ayuda a que el sistema de posicionamiento sea muy fácil; donde, el operador debe tener el conocimiento necesario para entender que este tipo de mesas están diseñadas para realizar operaciones mientras la pieza se mantenga estática y la mesa adquiera una nueva posición, o rotación según corresponda.

En la Figura 31, se observa el modelo de mesa posicionadora, la misma que es adaptable para múltiples aplicaciones de soldadura de todo tipo; desde trabajos con pequeños subconjuntos de piezas de poco espesor, hasta soldadura con robot, sin embargo, se aplica en soldadura con brazo robótico KUKA KR5Arc.

Figura 31

Mesa posicionadora de soldadura



Nota. Mesa posicionadora disponible en el Laboratorio de Robótica Industrial. Tomado de (Arias y Toapanta, 2013).

Existe otros accesorios con iguales o mejores características que las mesas posicionadoras, un ejemplo es la unidad lineal de la marca KUKA, también conocida como séptimo eje, descrita a continuación.

Unidad Lineal KUKA KL 4000.

Según KUKA (2023) este accesorio consta como una unidad lineal independiente dentro del mismo brazo robótico de tipo KUKA, consiste en un montaje anclado en el suelo y se sobrepone al brazo robótico, haciendo la función de un eje adicional del robot, más conocido como sétimo eje.

Este tipo de eje lineal soporta una carga máxima de 4000 Kg, y posee un funcionamiento modular, donde cada módulo puede ser de 1.5 y 2 metros sumando como máximo un desplazamiento lineal total de 31.5 metros, lo que genera una ampliación agigantada de su campo de trabajo.

Como dato adicional de esta unidad lineal, es que se puede incluir hasta cuatro carros de desplazamiento a la vez, generando una mayor flexibilidad, además que el anclaje puede ser tanto en el suelo, como en el techo, según sea la manera en la que se va a utilizar el brazo robótico, véase la Figura 32.

Figura 32

Unidad lineal KUKA KL 4000



Nota. Tomado de (KUKA, 2023).

Soldadura MIG/MAG

Fronius (2020) afirma lo siguiente:

La soldadura MIG/MAG se conoce también como GMAW o soldadura de hilo. Es un soldeo por fusión por arco que utiliza un alambre electrodo macizo, en el cual el arco y el baño de soldadura se protegen de la atmósfera por medio de gas suministrado por una fuente externa.

El autor menciona que se clasifica de acuerdo a sus dos tipos de estado del gas:

- MIG (*Metal Inert Gas*)
- MAG (*Metal Active Gas*)

Gases para Soldadura MIG/MAG

De acuerdo al autor mencionado se detalla los tipos de gases:

Soldadura MIG.

En este tipo de soldadura, se utiliza gases inertes, como el argón y el helio de manera individual, sin embargo, también se puede utilizar la combinación de los mismos. Son utilizados para soldar materiales como aluminio, cobre, magnesio y titanio.

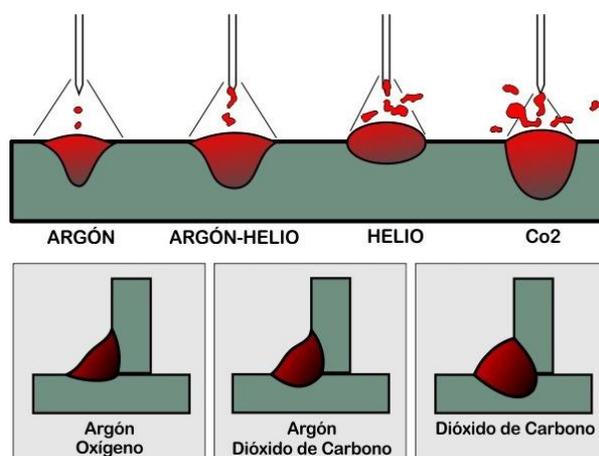
Soldadura MAG.

En este tipo de soldadura, se utiliza el CO₂ como gas activo puro, sin embargo, también se puede utilizar el argón, CO₂, O₂, como gases mezclados de diferente composición, que a su vez son muy reactivos. Son utilizados en materiales no aleados, de baja y alta aleación.

En la Figura 33, se puede observar la morfología de los cordones de soldadura, según el tipo de gas utilizado, ya sea MIG o MAG.

Figura 33

Efecto del tipo de gas en la soldadura MIG/MAG



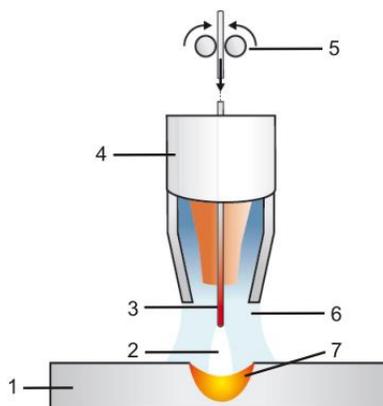
Nota. Según el gas el cordón va adquiriendo una forma propia acorde al mismo. Tomado de (Herrerros Argentinos, 2018).

Proceso de Soldadura MIG/MAG

Como se observa en la Figura 34, el material de aporte es el responsable de iniciar el arco voltaico cuando entra en contacto con la pieza a soldar, es decir, se genera las condiciones necesarias para iniciar la corriente eléctrica (Fronius, 2020).

Figura 34

Proceso de soldadura MIG/MAG



Nota. Pieza de trabajo (1), arco voltaico (2), material de aporte (3), boquilla de gas (4), alimentador (5), gas de protección (6), zona de fusión (7). Tomado de (ewm, 2017).

El hilo fundido se transforma en el material aportado, mientras que por la tobera circula el gas protector con la finalidad de evitar la combinación del arco con el oxígeno del ambiente. El gas protector es el encargado de expulsar el oxígeno durante el proceso, esto evita la oxidación en el cordón de soldadura y en el baño de fusión.

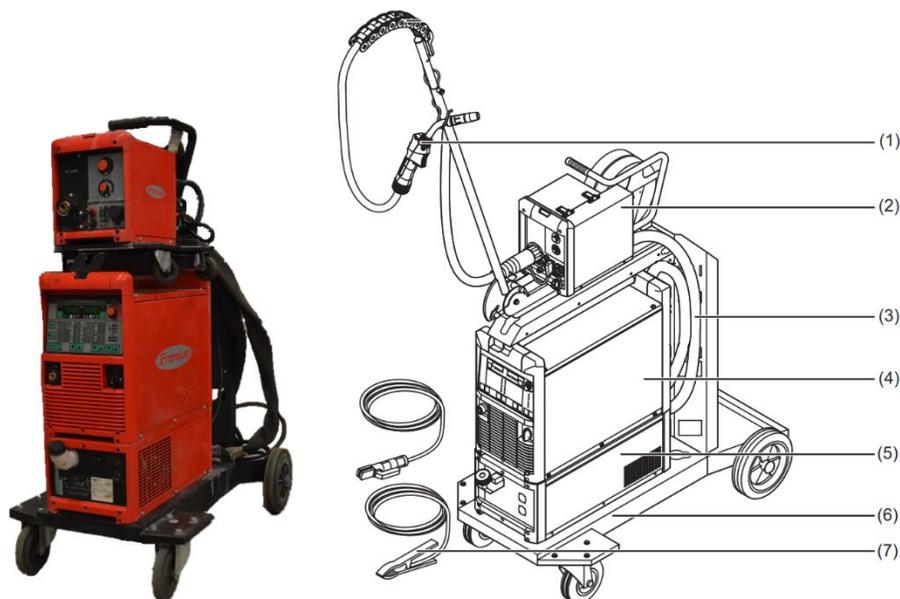
Equipo para Soldadura MIG/MAG

Según menciona el sitio web De Máquinas y Herramientas (2015), en la actualidad existe una gran variedad de soldadoras MIG/MAG, entre las principales se tiene: soldadoras inversoras, electrónicas, sinérgicas y pulsada.

En la Figura 35 se ilustra un ejemplo de una soldadora pulsada con sus respectivas partes: Antorcha (1), sistema de avance de hilo (2), mangueras de conexión (3), fuente de corriente (4), unidad de refrigeración (5), carro para desplazamiento (6) y cable de masa y electrodo (7).

Figura 35

Sistema de soldadura MIG/MAG



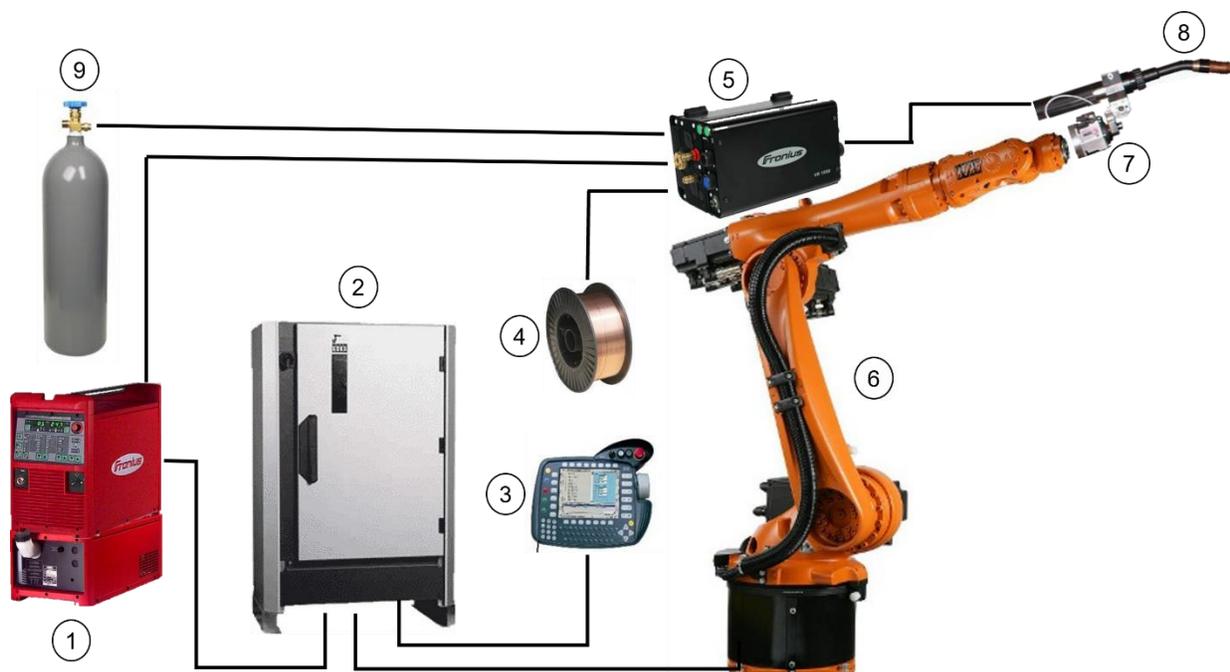
Nota. Equipo de soldadura pulsada marca Fronius TransPuls Synergic 4000. Tomado de (Fronius, 2021).

El mismo equipo se puede usar de manera manual por un operador capacitado o se puede usar para aplicación de soldadura robotizada mediante un robot industrial, considerando ciertas modificaciones de conexión y ubicación.

En la Figura 36 se muestra un ejemplo de los elementos y la integración necesaria para la aplicación de soldadura robotizada, los mismos con los que cuenta el Laboratorio de Robótica Industrial, entre los más importante se tiene: fuente de corriente Fronius (1), unidad de control KCR2 (2), Teach Pendant (3), material de aporte (4), sistema de avance de hilo (5), robot KR5Arc (6), sensor de colisión (7), antorcha (8) y gas protector (9).

Figura 36

Sistema de soldadura robotizada MIG/MAG



Nota. Elementos y conexión básicos para soldadura robotizada.

Los equipos especializados de soldadura tienen control mediante retroalimentación y parámetros de soldadura preestablecidos por el fabricante con la finalidad de que el usuario consiga los resultados esperados, y que fijar dichos parámetros no sea un contratiempo. A continuación se analizan los parámetros que se deben considerar en la soldadura MIG/MAG.

Parámetros de Soldadura

Según una investigación realizada por BF México (2018), en la soldadura existen ciertos tipos de parámetros que se deben regular para mejorar la calidad de la soldadura, sin embargo, no solo actúan estos parámetros, sino que también se ven involucrados otros factores como se detallan a continuación.

Intensidad y Tiempo.

Siguiendo una secuencia que guarda una relación precisa, este elemento se encuentra entre los más influyentes para lograr la temperatura y calentamiento requeridos para la fusión definitiva. Este criterio adquiere relevancia puesto que a mayor intensidad se corresponderá con un menor tiempo necesario para la soldadura, y viceversa.

Resistencia Eléctrica de la Unión.

Influye en la cantidad de calor producido durante la operación, con los siguientes elementos fundamentales como factores centrales: conservación y superficie del material; temperatura y fuerza generada en el material de aporte.

Longitud Correcta del Arco.

Si la longitud generada no es correcta, se puede tener considerables defectos como escoria, salpicaduras, falta de penetración, porosidad y cordones no uniformes.

Ángulo Correcto del Arco

Hace referencia al ángulo de inclinación de la antorcha con el que se realizará la soldadura, pues éste tendrá relación directa con la forma y aspecto del cordón, así como con el nivel de penetración.

Velocidad Apropiada de Avance

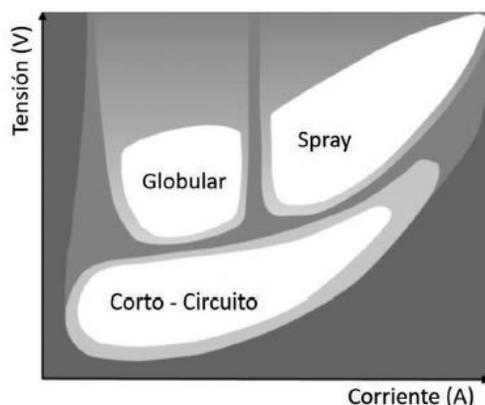
La velocidad de avance del material de aporte debe tener un valor medio, ni lento ni rápido, ya que puede producir falta de penetración, porosidad, acumulación de material y escoria.

Tipos de Transferencia de Metal en el Proceso MIG

Existen algunas investigaciones que se relacionan con el tipo de transferencia de metal, para lo cual la primera interacción con este tema la realiza un estudio de la corriente en transición desarrollado por Moreno-Urbe et al. (2020), donde se identifica que existe una transferencia globular de manera inicial, si se va aumentando la corriente, se puede conseguir un tipo de transferencia globular y spray, donde además va aumentando el diámetro, por último, si se disminuye la tensión y se mantiene el aumento de la corriente se logra una soldadura de tipo corto circuito, como se observa en la Figura 37.

Figura 37

Condiciones de corriente y tensión para diferentes formas de transferencia



Nota. Se toma de base al gas Argón para este tipo de transferencia. Tomado de (Moreno-Urbe et al., 2020).

Posteriormente para entender de mejor manera este tipo de transferencia se utiliza como fuente a otro autor, donde indica de manera específica las diferentes transferencias:

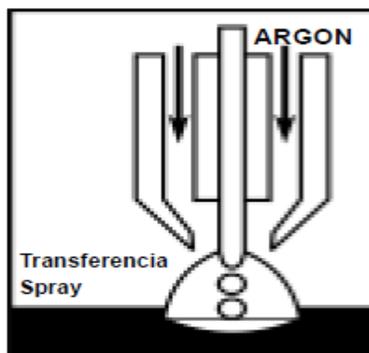
Transferencia en Spray.

Según (OXGASA, 2020), como primer dato se debe considerar que la corriente a utilizar será "Directa Polaridad Invertida", donde el metal fundido va pasando en gotas muy pequeñas a alta velocidad desde el electrodo hasta la pieza. Este tipo de transferencia se recomienda para secciones gruesas que requieran alta velocidad y calidad, como se indicó que el material a

emplear sería el acero, el espesor mínimo recomendado será de 1/8", en la Figura 38, se observa el método de transferencia antes mencionado.

Figura 38

Transferencia de metal de tipo Spray



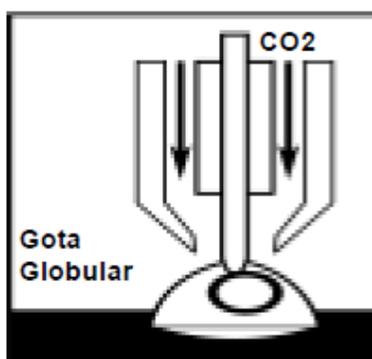
Nota. Tomado de (OXGASA, 2020).

Transferencia Globular.

En este caso de acuerdo al autor mencionado anteriormente, el metal que se funde al igual que el anterior, también pasa a manera de gotas, sin embargo, en este caso son gotas más gruesas que el diámetro del electrodo, este fenómeno ocurre únicamente cuando la corriente es baja; el gas principal que se ocupa en este caso es el CO₂, como se observa en la Figura 39.

Figura 39

Transferencia de metal de tipo Globular



Nota. Tomado de (OXGASA, 2020).

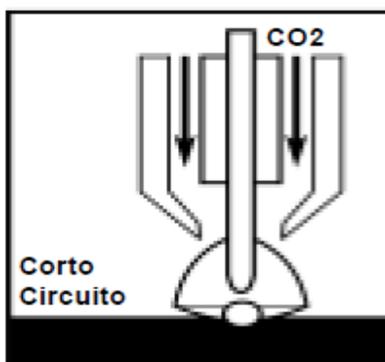
Transferencia en Cortocircuito.

El autor también menciona que el electrodo avanzará hasta entrar en contacto con el metal, generando un cortocircuito ideal, donde se fundirá la punta, al ser la velocidad de fusión mayor a la de la alimentación del alambre donde se producirá un cortocircuito.

Al repetir este proceso, se va generando el fenómeno del cortocircuito de manera sucesiva a altas velocidades, como se indica en la Figura 40. Este tipo de soldadura es recomendada en espesores delgados de chapa, siendo menores a $\frac{1}{4}$ " y con una corriente inferior a 250 A.

Figura 40

Transferencia de metal de tipo Cortocircuito



Nota. Tomado de (OXGASA, 2020).

Capítulo III

Diseño, Selección e Implementación de Componentes

Especificaciones Técnicas para el Diseño e Implementación

Con el presente proyecto se busca optimizar el proceso de soldadura en tramos lineales utilizando componentes económicamente accesibles. Se plantea implementar una mesa lineal que pueda trasladar una pieza en un eje cartesiano, la misma debe controlar la velocidad y posición de forma lineal para realizar soldadura en un rango de 300 a 1200 mm, debido a que el brazo robótico por sí solo, genera cordones menores a 300 mm de manera óptima sin llegar a puntos de singularidad o generar mayor esfuerzo en el movimiento de sus articulaciones.

Partiendo del brazo robótico y equipos disponibles en el Laboratorio de Robótica Industrial, y tomando como referencia los datos de algunas máquinas comerciales similares, se determinó que las principales características que debe poseer la mesa lineal, son las siguientes:

- Sujetadores de fácil acoplamiento
- Capacidad máxima de carga: $60 \text{ Kg} = 588 \text{ N}$
- Rango de desplazamiento de la mesa lineal: $0 \text{ mm} - 1100 \text{ mm}$
- Rango longitudinal del cordón de soldadura: $300 \text{ mm} - 1200 \text{ mm}$
- Precisión de movimiento: $\pm 1 \text{ mm}$
- Sistema de control independiente
- Compatibilidad con el módulo de entradas y salidas WAGO
- Interfaz Humano – Máquina
- Robustez y rigidez mecánica
- Velocidad de desplazamiento lineal: 500 mm/min

En base a las características generales de la mesa lineal, se procede a realizar el diseño y selección de los componentes principales a emplear en este proyecto.

Para poder empezar con esta sección es indispensable partir de lo establecido por (ASME, 2020), para la selección del factor de seguridad donde “considerando las propiedades del material y la naturaleza de la carga, debido a que este sistema está sujeto a una incertidumbre en la carga, se establece que el factor de seguridad mínimo a utilizar es $FS = 3$ ”.

Diseño Mecánico

Se parte del uso de un servo motor modelo “110SJT-M040D (A)”, fabricado por la marca GSK, disponible en el Laboratorio de Robótica Industrial, véase la Figura 41, el presenta las características que se indican a continuación:

- Tipo: servo motor
- Protección: IP65
- Clase: Class B
- Torque nominal: 4 Nm
- Velocidad nominal: 2500 rpm
- Velocidad máxima: 3000 rpm
- Corriente nominal: $4,5 \text{ A}$
- Voltaje de alimentación: 220 VAC
- Inercia: $0,68 \times 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$
- Aceleración angular: 4514 rad/s^2

Figura 41*Servo motor 110SJT - M040D (A)*

Nota. Los datos técnicos del motor se visualizan en el Anexo 01. Tomado de (GSK, 2012).

Selección del Husillo de Bolas

Previo a la selección del husillo de bolas, se debe calcular la fuerza necesaria que se requiere para poder mover la carga máxima establecida, se debe considerar el mecanismo de transmisión de potencia a utilizar, en la Tabla 5, se puede visualizar a detalle sus características y costos aproximados.

Tabla 5

Tipos de mecanismos de elementos de transmisión

Elemento de Transmisión	Características Principales	Costo Aproximado (USD)
Husillo de Bolas	Alta precisión y rendimiento Transmisión directa y eficiente de potencia. Baja fricción y deslizamiento Requiere lubricación adecuada y mantenimiento.	100 – 800
Bandas	Fácil instalación y ajuste. Transmisión flexible y silenciosa No requiere lubricación.	10 – 100

Elemento de Transmisión	Características Principales	Costo Aproximado (USD)
Cadenas	Alta resistencia y capacidad de carga. Transmisión robusta y duradera	20 – 200

Nota. Se menciona los principales elementos de transmisión a considerar para este proyecto. Tomado de (Barbecho, 2020).

Los husillos con hilos triangulares y trapezoidales presentan diversas desventajas en comparación con los husillos de bolas y rodillos, principalmente su vida útil se ve limitada debido a la fricción a la que están sometidos, lo que resulta en una menor durabilidad; además, su nivel de precisión es inferior al requerido para ciertas aplicaciones. Por estas razones, se ha optado por utilizar un husillo de bolas, como se muestra en la Figura 42. La longitud y diámetro del husillo también son factores importantes a considerar, se establece que una longitud mayor puede requerir soportes adicionales o accesorios de montaje para mantener la rigidez y evitar la vibración, mientras que el diámetro del husillo afecta su capacidad de carga y rigidez.

Figura 42

Diferentes tipos de husillos de bolas

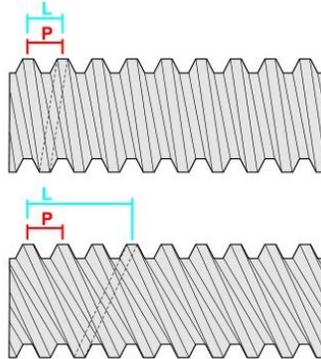


Nota. Husillos de bolas según longitud y diámetro. Tomado de (HIWIN, 2020).

Para consideraciones de diseño se utiliza un husillo de 25 mm con paso de 5 mm, como se visualiza en la Figura 43, y su eficiencia será del 96%, estos datos se han considerado de acuerdo a los husillos comerciales existentes en el país para asegurar su fácil adquisición.

Figura 43

Especificaciones de longitud y paso en un husillo



Nota. Se considera la longitud y paso del husillo. Tomado de (Thomson, 2023).

Teniendo un paso de 5 mm/rev se calcula la velocidad lineal máxima a la que debería girar el husillo acoplado de manera directa al servo motor, como se muestra en la Ecuación 1.

$$vl_{m\acute{a}x} = v_{m\acute{a}x} \cdot l \quad \text{Ecuaci3n 1}$$

$$vl_{m\acute{a}x} = 3000 \cdot 5$$

$$vl_{m\acute{a}x} = 15000 \text{ mm/min}$$

Donde:

- $vl_{m\acute{a}x}$ = Velocidad lineal m\acute{a}xima del husillo acoplado de manera directa (mm/min)
- $v_{m\acute{a}x}$ = Velocidad angular m\acute{a}xima del servo motor (rev/min)
- l = Paso del husillo (mm/rev)

Debido a que la velocidad lineal m\acute{a}xima del husillo acoplado de manera directa al servo motor sobrepasa la velocidad de desplazamiento lineal requerida, se procede a implementar un reductor de velocidad, mediante la Ecuaci3n 2:

$$i = \frac{vl_{m\acute{a}x}}{vl} \quad \text{Ecuaci3n 2}$$

$$i = \frac{15000}{500}$$

$$i = 30$$

Donde:

- i = Relación de transmisión
- vl = Velocidad de desplazamiento lineal requerida (mm/min)

Con esto se considera un valor de reductor comercial de 30:1, mediante la Ecuación 3 se calcula el torque de salida del reductor.

$$\tau_r = \tau_m \cdot i \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\tau_r = 4 \cdot 30$$

$$\tau_r = 120 \text{ Nm}$$

Donde:

- τ_r = Torque de salida del reductor (Nm)
- τ_m = Torque nominal del servo motor (Nm)

Con la información obtenida se procede a la selección de un reductor que ayuda a llegar a los valores calculados, en este caso se necesita una caja reductora que soporte 3000 rpm de entrada y un torque de 4 Nm, en la Tabla 6, se detallan las características de los reductores a considerar.

Tabla 6

Modelos disponibles de cajas reductoras a utilizar

Modelo	Torque de entrada permisible (Nm)	Velocidad de entrada (rpm)	Velocidad de salida (rpm)
NMRV050	85	3000	100
S9142AMPAN010	180	5000	300
PLF120-5	250	5000	500

Nota. Datos obtenidos de proveedores de cajas reductoras.

A partir de estos datos, se selecciona el modelo de caja "NMRV050", ya que las características y necesidades del diseño a considerar, con una eficiencia del 76% como se

observa en el Anexo 02, posteriormente se procede a calcular el torque de salida debido a las pérdidas de transmisión mediante la Ecuación 4.

$$\begin{aligned}\tau_{rr} &= \tau_r \cdot e_r && \text{Ecuación 4} \\ \tau_{rr} &= 120 \cdot 0,76 \\ \tau_{rr} &= 91,2 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Donde:

- τ_{rr} = Torque de salida del reductor debido a las pérdidas de transmisión (Nm)
- e_r = Eficiencia del reductor

De acuerdo con (Mott, 2008), con la velocidad y el torque delimitados se puede realizar la selección del husillo de bolas para la transmisión de potencia, donde se debe analizar los diferentes casos a los que estará sometido el husillo considerando la carga y las velocidades de trabajo, véase la Tabla 7.

Tabla 7

Condiciones a las que será sometido el husillo de bolas

Condición	Carga axial (F_b) en N	Velocidad (n) en rpm	Relación carga tiempo de trabajo (t) en segundos
1	294	100	45
2	450	80	35
3	588	50	20

Nota. Datos establecidos por los autores.

La velocidad promedio se calcula con la Ecuación 5, a partir de los datos de la Tabla 7.

$$\begin{aligned}n_p &= n_1 \cdot \frac{t_1}{n_{m\acute{a}x}} + n_2 \cdot \frac{t_2}{n_{m\acute{a}x}} + n_3 \cdot \frac{t_3}{n_{m\acute{a}x}} && \text{Ecuación 5} \\ n_p &= 100 \cdot \frac{45}{100} + 80 \cdot \frac{35}{100} + 50 \cdot \frac{20}{100} \\ n_p &= 83 \text{ rpm}\end{aligned}$$

Donde:

- n_p = Velocidad promedio (rpm)

- $n_{m\acute{a}x}$ = Velocidad máxima (*rpm*)

Para calcular la carga operativa promedio se utiliza la Ecuaci3n 6, donde se debe considerar un factor de servicio, en este caso para un trabajo continuo sin impactos es de 1.1, según el Anexo 03.

$$F_{bp} = \sqrt[3]{F_{b1}^3 \cdot \frac{t_1}{n_{m\acute{a}x}} \cdot F_p^3 + F_{b2}^3 \cdot \frac{t_2}{n_{m\acute{a}x}} \cdot F_p^3 + F_{b3}^3 \cdot \frac{t_3}{n_{m\acute{a}x}} \cdot F_p^3} \quad \text{Ecuaci3n 6}$$

$$F_{bp} = \sqrt[3]{294^3 \cdot \frac{45}{100} \cdot 1,1^3 + 450^3 \cdot \frac{35}{100} \cdot 1,1^3 + 588^3 \cdot \frac{20}{100} \cdot 1,1^3}$$

$$F_{bm} = 481,725 \text{ Kgf}$$

Donde:

- F_{bm} = Carga operativa promedio (*Kgf*)
- F_p = Factor de servicio

Con estas condiciones, mediante la Ecuaci3n 7 se calcula la vida útil esperada del husillo, teniendo en cuenta que se usará 6 horas a la semana con un tiempo de 8 meses al año, durante 5 años, se obtiene un total de 960 horas de vida útil de diseño.

$$L = L_h \cdot n_p \cdot 60 \quad \text{Ecuaci3n 7}$$

$$L = 960 \cdot 83 \cdot 60$$

$$L = 4780800 \text{ rev}$$

Donde:

- L = Vida útil esperada del husillo (*rev*)
- L_h = Horas de vida útil de diseño (*horas*)

Existe una consideraci3n especial en la que se establece que para una tuerca simple la fuerza axial resultante es igual a la carga operativa promedio, como se indica en la Ecuaci3n 8.

$$F_{bm} = F_a \quad \text{Ecuaci3n 8}$$

Donde:

- F_a = Fuerza axial para una tuerca simple (*Kgf*)

$$J_e = (7,57 \times 10^{-13}) \cdot D^4 \cdot L_e \quad \text{Ecuación 10}$$

$$J_e = (7,57 \times 10^{-13}) \cdot 25^4 \cdot 1500$$

$$J_e = 4,435 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Donde:

- J_e = Inercia del husillo ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$)
- D = Diámetro del husillo (mm)
- L_e = Longitud del husillo (mm)

Adicionalmente, se requiere conocer la inercia que produce la carga mediante la

Ecuación 11 con la finalidad de calcular la inercia total del sistema.

$$J_c = 2,25 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{M}{l^2}\right) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$J_c = 2,25 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{60}{5^2}\right)$$

$$J_c = 5,4 \times 10^{-8} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Donde:

- J_c = Inercia de la carga (mm)
- M = Masa de la carga (Kg)

Para conocer la inercia total se aplica la Ecuación 12, únicamente al sumar los datos obtenidos de la Ecuación 10 y Ecuación 11, donde:

$$J_t = J_e + J_c \quad \text{Ecuación 12}$$

$$J_t = 4,435 \times 10^{-4} + 5,4 \times 10^{-8}$$

$$J_t = 4,435 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

El torque para la aceleración angular se calcula utilizando la Ecuación 13, donde se mantienen algunos datos anteriores, y únicamente se agrega la eficiencia de transmisión del husillo de bolas que se encuentra en el Anexo 04 y la aceleración angular del servo motor.

$$T_\alpha = \left(J_c + \frac{J_e}{e_h} + \frac{J_c}{e_h} \right) \cdot \alpha \quad \text{Ecuación 13}$$

$$T_\alpha = \left(0,68 \times 10^{-3} + \frac{5,4 \times 10^{-8}}{0,9} + \frac{4,43 \times 10^{-4}}{0,9} \right) \cdot 4514$$

$$T_{\alpha} = 5,29 \text{ Nm}$$

Donde:

- T_{α} = Torque para la aceleración angular (Nm)
- e_h = Eficiencia de transmisión del husillo de bolas
- α = Aceleración angular del servo motor (rad/s^2)

En base al torque para la aceleración angular requerida, se deduce que el motor seleccionado cumple con las especificaciones necesarias para poder mover la carga deseada.

Debido a que se implementa un reductor, las pérdidas de transmisión del torque de salida del reductor son 28,8 Nm, dejando un torque neto de 91,2 Nm.

Selección de Guías y Rieles Lineales

Los rieles lineales, también conocidos como guías lineales o carriles lineales, son componentes mecánicos utilizados en maquinaria y sistemas de movimiento para proporcionar una guía precisa y suave a lo largo de un eje lineal. Su función principal es permitir que un elemento móvil, como una mesa, un carro o una plataforma, se desplace de manera lineal con un mínimo de fricción y desgaste, en la Figura 45, se puede visualizar el modelo de estas guías y rieles lineales.

Figura 45

Modelo de guías y rieles lineales a implementar



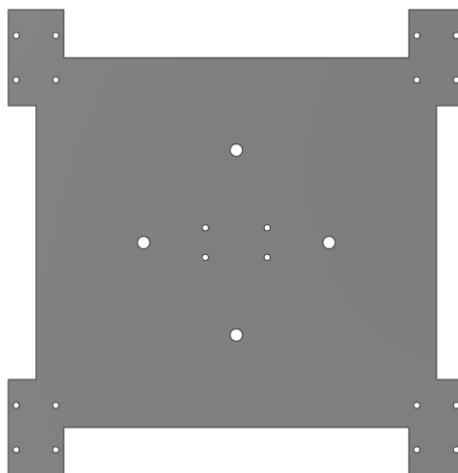
Nota. Se observa un modelo de guía y riel ensamblado. Tomado de (HIWIN, 2020).

Una vez delimitada la carga máxima y el torque necesario para poder mover la mesa, se procede a seleccionar las guías lineales, las cuales brindarán menor fricción al realizar el desplazamiento del material, y se podrá mantener la precisión del husillo, por último, se procede a calcular la capacidad de carga básica en base a la fuerza aplicada.

Se procede a realizar el cálculo de las fuerzas o cargas que actúan en cada bloque con las fórmulas que facilita el manual de la marca HIWIN, en este estudio se considera el caso crítico para el cual la fuerza externa será la fuerza axial anteriormente calculada y será aplicada en el centro de la mesa, las distancias serán dadas acorde a un diseño preliminar que se considerará para un posible tamaño de la mesa de acople, en la Figura 46, se observa la vista frontal del diseño de esta mesa de acople a utilizar.

Figura 46

Diseño preliminar de base de mesa de acople



Nota. Servirá para posicionar de manera fija a las guías sobre el riel lineal.

En este caso se aplica la Ecuación 14, para obtener la carga máxima en cada bloque.

$$P = \frac{W}{4} + \frac{F_a \cdot 9,8}{4} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$P = \frac{588}{4} + \frac{481,725 \cdot 9,8}{4}$$

$$P = P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 1327,22 \text{ N}$$

Donde:

- P = Carga máxima en cada bloque (N)
- W = Capacidad máxima de carga (N)

Al ser la misma fuerza para cada punto, se obtiene que la carga máxima en cada bloque será de 1327,22 N, con este valor se puede realizar el cálculo de la vida nominal del bloque.

En este caso se considera un bloque de recirculación de bolas para el cual se utiliza la Ecuación 15, donde se delimita una vida útil (L) de diseño para poder calcular la carga dinámica (C).

$$C = \sqrt[3]{\frac{L_b}{50 \text{ Km}} \cdot P} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{500}{50 \text{ Km}} \cdot 1327,22}$$

$$C = 2859,41 \text{ N}$$

Donde:

- C = Carga dinámica en cada bloque (N)
- L_b = Vida útil esperada (Km) (Valor asignado por los autores)

Considerando un factor de diseño de 4 establecido por los autores, basándose en trabajos similares para evitar fallos en el funcionamiento de la máquina, se debe multiplicar por el valor de la carga dinámica, siendo 11437,63 N. En base al Anexo 05 se considera seleccionar el bloque de la serie HG de tipo de bola de carga pesada "HGH20CA" que soporta 27100 N, debido a que es el valor más cercano considerando que el perno de montaje para el riel será M5.

En base a este modelo se procede a elegir el riel por el cual se desplazará la mesa de trabajo, donde según el Anexo 06, se selecciona el modelo "HGR20T", debido a las medidas proporcionadas, sin embargo, al adquirir el material en forma comercial, las medidas existentes

son estándar, por esta razón se adquiere dos rieles de 1500 mm de longitud, debido a que el desplazamiento a recorrer será de 1100 mm.

Selección del Material para la Estructura

Para seleccionar el material de la estructura que soporte la carga máxima de trabajo y los elementos que estarán en movimiento se debe considerar el peso total de trabajo, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Mesa de trabajo: 30 Kg
- Material máximo a soldar: 20 Kg
- Sujetadores y rodamientos lineales: 10 Kg

Dando un total de 60 Kg, este valor se debe transformar a fuerza para calcular el momento máximo que va a soportar la estructura mediante la Ecuación 16:

$$F = W \cdot g \quad \text{Ecuación 16}$$

$$F = 60 \cdot 9,81$$

$$F = 588 \text{ N}$$

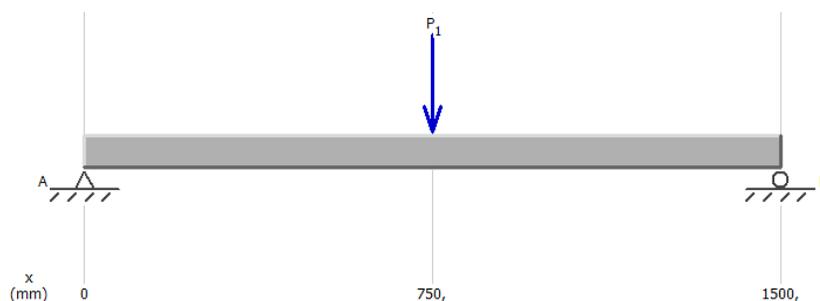
Donde:

- F = Fuerza dinámica en cada bloque (N)
- W = Capacidad máxima de carga (Kg)
- g = Gravedad (m/seg^2)

Para calcular el momento máximo, se utiliza un software de análisis estructural para realizar el diagrama de esfuerzos y momentos, como se observa en la Figura 47.

Figura 47

Diagrama de cuerpo libre de la mesa de análisis

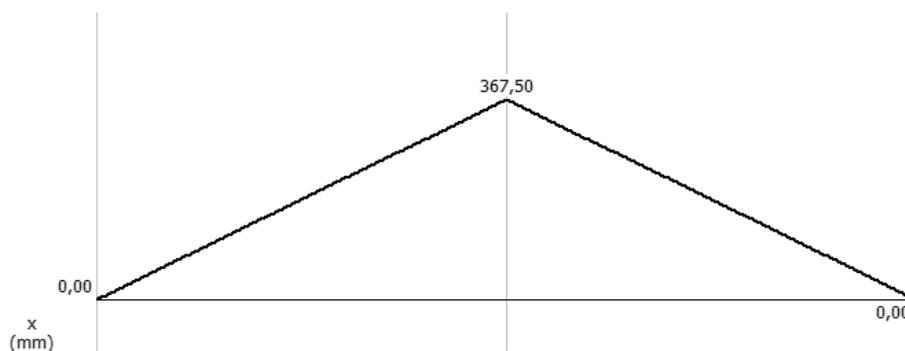


Nota. Se simula la estructura de investigación con la aplicación de fuerza principal.

Se considera una carga puntual en la mitad de la viga como punto crítico, utilizando el peso máximo de carga, como se observa en la Figura 48, el momento máximo que soportará la viga es de 367,50 Nm, considerando un factor de incertidumbre de 2, se obtiene un momento máximo de 735 Nm, el cual se utiliza para calcular el módulo de la sección del tubo cuadrado.

Figura 48

Diagrama de momento máximo



Nota. Visualización del momento máximo de la estructura.

Para efectos de diseño, se procede a escoger como material el acero estructural A36, el cual dispone de un límite de fluencia de 250 MPa, según recomienda Beer *et al.* (2020).

Se procede a igualar la Ecuación 17 y Ecuación 18, con la finalidad de despejar el módulo de sección $x - x$, que es de interés para el diseño actual.

$$\delta flex = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_{x-x}} \quad \text{Ecuaci3n 17}$$

$$FS = \frac{S_y}{\delta flex} \quad \text{Ecuaci3n 18}$$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{W_{x-x}} = \frac{S_y}{FS}$$

$$W_{x-x} = \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot FS}{S_y}$$

$$W_{x-x} = \frac{735 \cdot 3}{250 \times 10^6}$$

$$W_{x-x} = 8,82 \text{ cm}^3$$

Donde:

- W_{x-x} = M3dulo de secci3n x-x (cm^3)
- $M_{m\acute{a}x}$ = Momento m\acute{a}ximo (Nm)
- S_y = L\acute{i}mite de fluencia (Pa)
- $\delta flex$ = Esfuerzo flexionante (MPa)
- FS = Factor de seguridad

Seg\un el cat\alogo de (DIPAC, 2023), se puede encontrar varias opciones al momento de seleccionar el tubo estructural cuadrado, donde de acuerdo al Anexo 07, se requiere de un espesor para la sujeci3n de los rieles lineales mediante fijaci3n por tornillos, por este motivo se consider3 el mayor espesor indicado en la tabla, acorde al m3dulo de secci3n calculado anteriormente, siendo el material seleccionado un tubo cuadrado de 75 mm con 4 mm.

Dise\o de la Mesa de Trabajo

Considerando que la longitud de soldadura m\acute{a}xima es de 1200 mm se toma como referencia esta medida para el largo de la mesa, y un ancho superior a 300 mm para tener mayor facilidad de agarre de las piezas a soldar; se debe considerar diferentes opciones comerciales para la sujeci3n de las piezas como se observa en la Figura 49 y Figura 50.

El objetivo principal de los "Jigs de soldadura" es garantizar la precisi3n y la uniformidad en la soldadura de m\ultiplas piezas id\enticas o similares. Estos dispositivos son especialmente

útiles en la producción en serie, ya que permiten agilizar el proceso de soldadura y asegurar que cada pieza se sujete de manera consistente para obtener resultados de alta calidad.

Figura 49

Jigs de soldadura

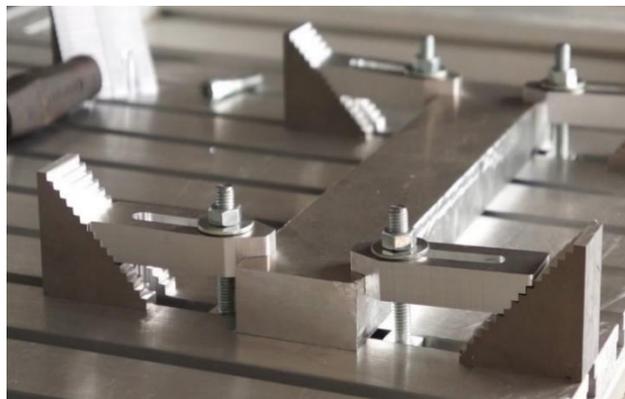


Nota. Por lo general se utiliza para mantener fija una pieza. Tomado de (HIWIN, 2020).

Los "step clamps" (también conocidos como "step blocks" o "step fixtures"), como se observa en la Figura 50, son dispositivos utilizados en el ámbito de la fabricación y la ingeniería para asegurar y posicionar piezas de trabajo en un banco de trabajo o en una máquina herramienta durante procesos de mecanizado, fresado, taladrado, rectificado o cualquier otra operación de fabricación.

Figura 50

Step Clamps

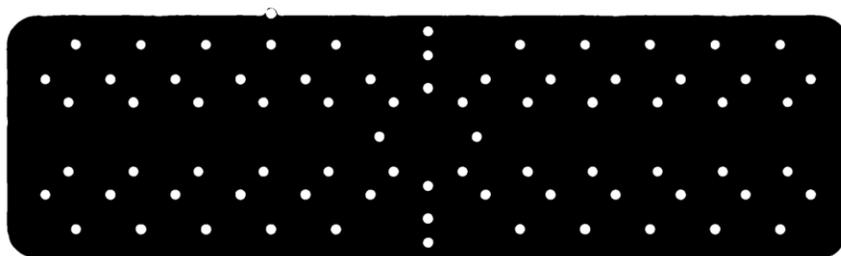


Nota. Tomado de (McMaster-Crr, 2023).

Debido a la fácil adquisición del step clamps y a su fácil forma de ajuste mediante un perno, a partir de esta selección se diseña la mesa de trabajo con diferentes perforaciones que permiten sujetar las piezas a lo largo de la mesa, considerando diferentes ángulos y posiciones posibles en los que se puede sujetar el material de trabajo, como se muestra en la Figura 51. La mesa de trabajo fue construida con Acero A36 debido a su baja resistencia eléctrica.

Figura 51

Mesa de trabajo para soldadura lineal



Nota. Los agujeros que se visualizan, ayudan a la sujeción de los Step Clamps.

Modelamiento Utilizando Software CAD/CAE

Para facilitar el proceso de corrección de diseño se utilizará un software CAD/CAE que permita analizar ciertos parámetros, en la Tabla 8 se observa una clasificación de la deformación máxima permitida en una viga.

Tensión de Von Mises.

Se calcula para evaluar la capacidad de carga y la seguridad de la pieza o ensamblaje bajo las condiciones de carga especificadas. El resultado se representa generalmente en forma de un mapa de colores, donde las zonas con valores más altos de tensión de Von Mises se muestran en colores más intensos, lo que permite identificar áreas de concentración de tensiones que podrían ser críticas para el diseño.

Desplazamiento Resultante.

Hace referencia al desplazamiento o deformación que experimenta una pieza o ensamblaje después de someterlo a un análisis de tensión o simulación estructural. Es una

medida que muestra cómo cambia la forma o posición de la pieza debido a las cargas aplicadas sobre ella.

Para asegurar que el diseño sea correcto, en la Tabla 8 se muestra ciertos límites de flexión máxima recomendadas.

Tabla 8

Flexión máxima permitida en vigas

Descripción	$y_{m\acute{a}x}/L_v$
Pieza general de máquina	0.0005 a 0.003
Precisión moderada	0.00001 a 0.0005
Alta precisión	0.0000001 a 0.000001

Nota. Tomado de (Mott, 2008, p. 432).

Se aplica la Ecuación 19 para determinar la flexión máxima permitida de la estructura, tomando como consideración, una pieza general de máquina.

$$y_{m\acute{a}x} = L_v \times 0,0005 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$y_{m\acute{a}x} = 1500 \times 0,0005$$

$$y_{m\acute{a}x} = 0,75mm$$

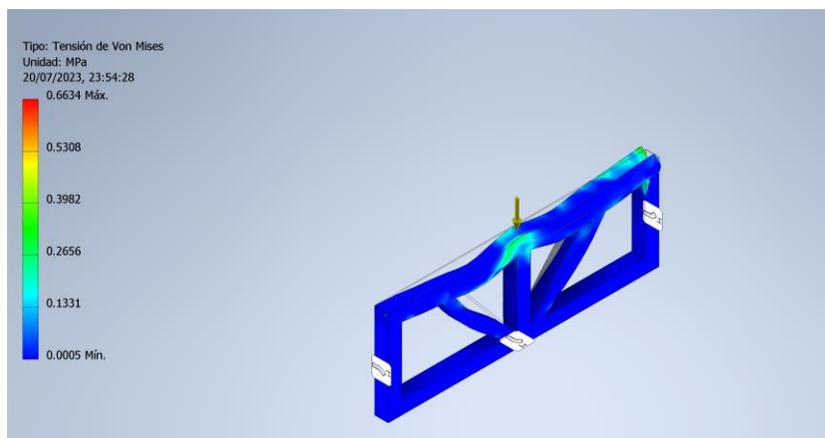
Donde:

- L_v = Longitud de la viga (mm)
- $y_{m\acute{a}x}$ = Flexión máxima recomendada (mm)

Posteriormente se procede a realizar el análisis de tensión de Von Mises, en los laterales que soportan el peso máximo de la mesa con sus respectivas cargas, considerando la gravedad y los puntos fijos, en la Figura 52, se observa que el valor máximo de tensión es aproximadamente 0,2656 MPa, donde su valor es inferior al calculado anteriormente, siendo viable para el análisis de estudio.

Figura 52

Tensión de Von Mises en la estructura lateral

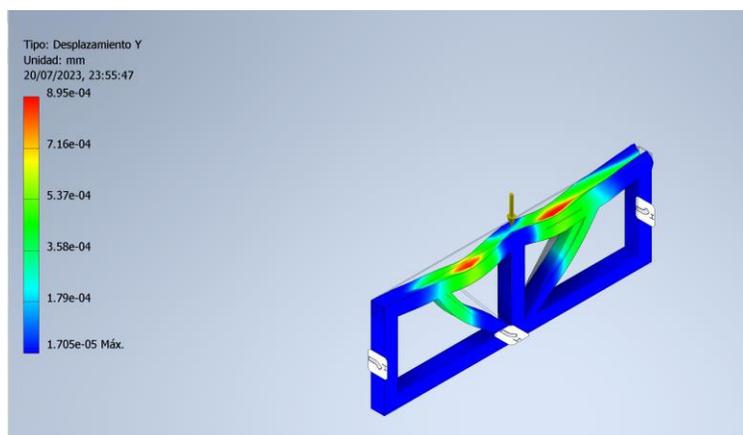


Nota. Tensión de Von Mises inferior a 0,2656.

Mientras que, para el desplazamiento resultante, considerando el valor de desplazamiento máximo calculado que es de 0,75 mm se puede observar que el valor entregado por el programa es menor, siendo el diseño válido, como se observa en la Figura 53.

Figura 53

Desplazamiento máximo en la estructura lateral

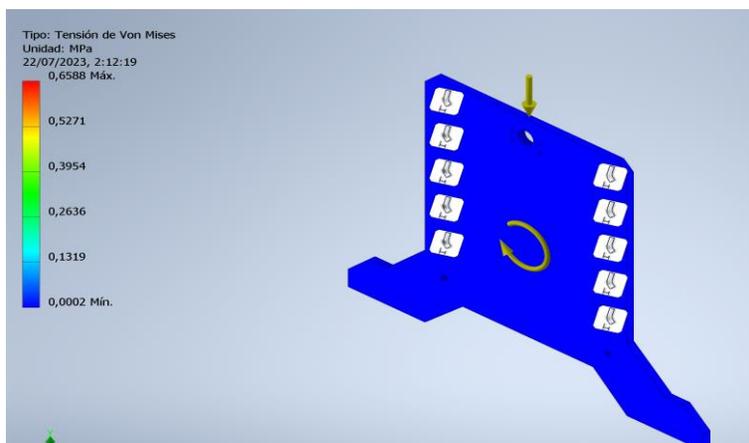


Nota. Desplazamiento resultante inferior a 7,16e-04.

Partiendo del diseño de mesas uniaxiales, se realiza el diseño de las paredes que unen la estructura y brindarán rigidez a la mesa con el torque máximo calculado, se procede a realizar el análisis en las paredes de la estructura, como se observa en la Figura 54.

Figura 54

Tensión de Von Mises en la pared principal

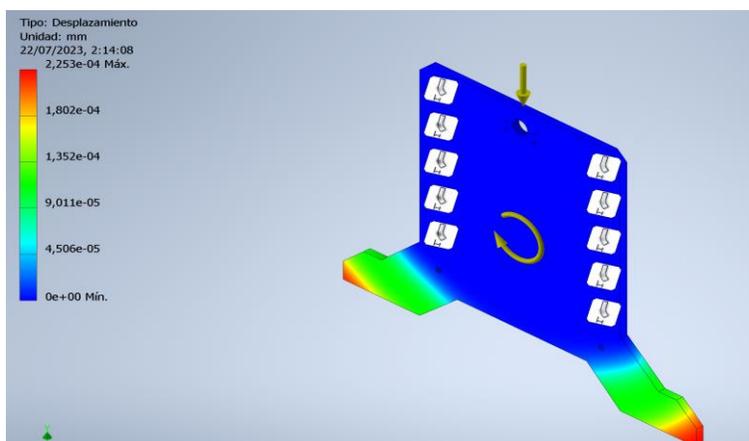


Nota. Tensión de Von Mises inferior a 0,1319.

Considerando que el material de toda la estructura será acero estructural A36 con un límite de fluencia de 250 MPa, se observa que la estructura soporta el torque máximo sin fallos, como se indica en la Figura 55.

Figura 55

Desplazamiento máximo en la pared principal



Nota. Desplazamiento resultante inferior a 1,352-04.

Diseno Eléctrico y Electrónico

Para el control eléctrico y automático de la mesa lineal se requiere un conjunto de elementos eléctricos y electrónicos que, en conjunto con la programación y una interfaz,

permita la operación óptima de la máquina, considerando las protecciones para cada uno de estos elementos y partiendo de un servo motor, el cual brinda el movimiento rotatorio, este cuenta con un encoder interno para el control en lazo cerrado de velocidad y posición de la mesa, de igual manera cuenta con dos finales de carrera, uno para conocer la posición de inicio, y el otro para controlar la distancia límite de movimiento de la mesa.

En resumen, el sistema de control cuenta con un servo motor, un PLC y un HMI, los mismos que están enlazados por un conjunto de elementos que se detallarán a continuación.

Partiendo del servo motor a disposición modelo: “110SJT - M040D (A)”, con una potencia de 1 kW trifásico, con un voltaje de alimentación de 220 V de tipo de arranque directo.

Se procede a realizar la selección de conductores para el cableado general de potencia, con la Ecuación 20, se calcula la corriente nominal que consume el motor.

$$I_n = \frac{P \times 1000}{F_p \times V \times n} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$I_n = \frac{1 \times 1000}{0,9 \times 220 \times 0,8}$$

$$I_n = 6,31 \text{ A}$$

Donde:

- I_n = Corriente nominal (A)
- P = Potencia (kW)
- F_p = Factor de potencia
- V = Voltaje de alimentación (V)
- n = Rendimiento

Para calcular la corriente de arranque se considera lo establecido por (Electricaplicada, 2017) que según “la norma NEC y NTC2050 que recomiendan que, al dimensionar las protecciones eléctricas, éstas sean 125% de corriente continua”, razón por lo cual se multiplica el valor de la corriente nominal por 1,25, como se indica en la Ecuación 21.

$$I_a = I_n \times 1,25$$

$$I_a = 6,31 \times 1,25$$

$$I_a = 7,88 \text{ A}$$

Ecuación 21

Donde:

- I_a = Corriente de arranque (A)

Para esto, según la norma AWG se selecciona el cable #14, mismo que puede soportar corrientes de 25 a 35 A, considerando un sobredimensionamiento, debido a otras máquinas que puedan estar conectadas a la fuente de alimentación de la mesa, en la Figura 56, se observa las características del cable según el amperaje obtenido.

Figura 56

Tabla de clasificación del calibre de cables según sus características

CONDUCTOR				ESPESOR DE AISLACIÓN	DIÁMETRO EXTERIOR APROX	RESISTENCIA ELÉCTRICA DC a 20°C	PESO TOTAL APROX	CAPACIDAD DE CORRIENTE	
CALIBRE	SECCIÓN NOMINAL	# HILOS	DIÁMETRO APROX					A (1)	A (2)
AWG / MCM	mm ²	cantidad	mm	mm	mm	ohm/Km	kg/km	A (1)	A (2)
14	2,08	22	1,9	0,38	3,0	8,6100	26	25	35
12	3,31	41	2,4	0,39	3,5	5,4300	38	30	40
10	5,26	26	2,7	0,51	4,0	3,4100	61	40	55
8	8,37	41	3,3	0,76	5,3	2,1400	99	55	80
6	13,30	63	4,2	0,76	6,2	1,3800	147	75	105
4	21,10	100	5,2	1,02	7,8	0,8650	236	95	140
2	33,60	126	7,7	1,02	10,4	0,5440	372	130	190
1/0	53,50	200	9,9	1,27	13,2	0,3450	586	170	260
2/0	67,40	250	10,6	1,27	14,2	0,2730	701	195	300
3/0	85,00	312	12,4	1,27	15,8	0,2170	892	225	350
4/0	107,00	393	14,0	1,27	17,4	0,1720	1119	260	405
250	127,00	495	14,9	1,52	18,9	0,1470	1295	290	455
300	152,00	586	16,4	1,52	20,5	0,1220	1565	320	505
350	177,00	820	17,3	1,52	21,4	0,1050	1889	350	570
400	203,00	1171	19,1	1,52	23,2	0,0920	2031	380	615
500	253,00	1400	20,6	1,52	24,8	0,0735	2671	430	700

Nota. Se selecciona la primera opción de calibre de acuerdo a la capacidad de corriente que se pretende manejar según el Anexo 08.

Selección de los Elementos de Protección

Para calcular la corriente de protección del alimentador se considera 2.5 veces la corriente calculada para el cable, de acuerdo a la curva de arranque del motor, donde según la Ecuación 22 se obtiene:

$$I_p = I_n \times 2,5$$

Ecuación 22

$$I_p = 6,31 \times 2,5$$

$$I_p = 15,775 \text{ A}$$

Donde:

- I_p = Corriente de protección (A)

Se selecciona un breaker de 16 A marca CHINT, como se muestra en la Figura 57, para mayor información revisar el Anexo 09.

Figura 57

Interruptor termomagnético CHINT



Nota. Tomado de (Chint, 2022).

Selección del PLC

Para la selección del PLC se utiliza el proporcionado por el Laboratorio de Robótica Industrial, el cual es la marca “Xinje”, modelo “XCM-32T4-E” ya que posee un amplio número de entradas, salidas y ciertos pines que pueden manejar altas frecuencias de trabajo que facilitan el control de velocidad y posición del servo motor. En este caso para el control de la mesa lineal se requiere de las entradas y salidas mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9*Entradas y salidas del PLC Xinje*

I/O	TIPO	DESCRIPCIÓN
X11	Digital	Paro de emergencia
X13	Digital	Alarma servo
X15	Digital	Señal brazo-PLC
X17	Digital	Final de carrera home
X21	Digital	Final de carrera limite
Y0	Digital	Pulso negativo
Y4	Digital	Señal negativa
Y12	Digital	Servo on
Y13	Digital	Luz piloto verde
Y14	Digital	Luz piloto roja
Y15	Digital	Señal PLC-brazo

Nota. Se detallan como entradas a la letra “X” y como salida a la letra “Y”. Más detalles del PLC se encuentra en el Anexo 10.

Una vez detallado el número de entradas y salidas a utilizarse, se puede comprobar que el PLC que dispone el laboratorio cumple con las especificaciones requeridas para el control de la mesa lineal, ya que dispone de 18 entradas y 14 salidas, donde únicamente se utilizan las detalladas en la Tabla 9.

Controlador del Servo Motor

Para controlar el servo motor se utiliza una unidad de control de servo compatible, el variador de frecuencia es la opción a considerar, de acuerdo a su relación para la modificación de parámetros en función de la aplicación, esto brinda mayor flexibilidad al momento de realizar aplicaciones.

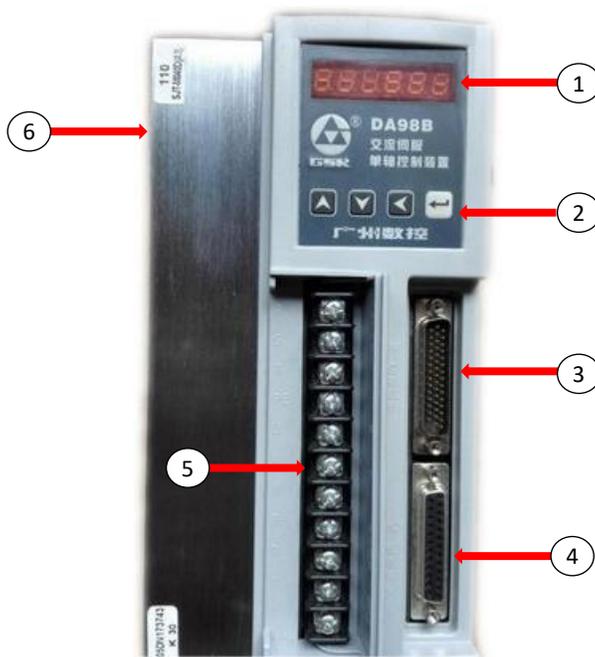
Esta unidad es un amplificador electrónico, como se muestra en la Figura 58, utilizado para suministrar la tensión y la frecuencia predefinidas por el usuario, de la misma manera efectúa un seguimiento de las señales de retorno del servo motor para corregir las eventuales

desviaciones ocasionadas por factores externos, se enumera su clasificación como se muestra a continuación:

1. Panel indicador led.
2. Botones de control.
3. Conector de Señales externas.
4. Conector de retroalimentación del motor.
5. Terminales de alimentación.
6. Radiador

Figura 58

Partes de la unidad de servo controlador



Nota. Se indica numéricamente las partes que posee esta unidad. Más detalles del servo controlador se encuentra en el Anexo 11.

Selección de Indicadores, Selectores y Relés

Luz Piloto.

Se emplea dos luces piloto, en este caso se utiliza indicadores de 24 V, uno verde para mostrar que la mesa está lista para su operación, y un indicador rojo que sirva de alerta cuando se presiona el paro de emergencia, en la Figura 59, se indican estos modelos de luz piloto.

Figura 59

Modelo de Luz piloto tipo verde y roja



Nota. Sus características se encuentran en el Anexo 12. Tomado de (CAMSCO, 2020).

Selector de Encendido.

Para permitir el paso de corriente se utiliza un selector de dos posiciones que permita conmutar la alimentación trifásica, y soporte la corriente calculada anteriormente, para ello se procede a seleccionar un interruptor, como se observa en la Figura 60, con modelo de leva de 16 A marca CAMSCO.

Figura 60

Selector dinámico de dos posiciones



Nota. Sus características se encuentran en el Anexo 13. Tomado de (CAMASCO, 2020).

Relés.

Para la comunicación entre el PLC y el controlador KR C2, por medio de módulo WAGO se utilizan relés que permitan proteger los dispositivos de forma bidireccional, para ello se requiere un relé de 24 V y baja corriente, sin embargo, por la disponibilidad en el mercado local se selecciona un relé de marca CAMSCO de 10 A, a 24 V, como se observa en la Figura 61.

Figura 61

Relé de 24 V a 10 A



Nota. Permite generar una protección bidimensional (Anexo 14). Tomado de (CAMASCO, 2020).

Conductor para Elementos de Control

Debido a que el sistema de control se limita a componentes de bajo consumo, la corriente y caída de tensión serán de baja magnitud, razón por la cual se utilizará un conductor #16 AWG, el cual puede soportar el voltaje y la corriente requeridos para este caso.

Selección de Elementos Adicionales

Para proteger los conductores eléctricos se utiliza canaletas ranuradas DEXSON, de 25x25 mm, las cuales ayudan a organizar de mejor manera el cableado de la unidad de control de mesa lineal, como se observa en la Figura 62.

Figura 62

Canaletas ranuradas Dexson



Nota. Organizadores tipo canaletas para me cableado. Tomado de (DEXSON, 2022).

Selección de Pantalla HMI

Para la selección del touch panel se utiliza un dispositivo compatible con los elementos a disposición, en este caso al usar un PLC de marca XINJE se elige un panel “TOUCHWIN TG765-MT” de 7 pulgadas, ya que posee un puerto USB-B que facilita la programación y configuración, véase la Figura 63 y su hoja de características en el Anexo 15.

Figura 63

Pantalla HMI TOUCHWIN TG765-MT 7”



Nota. Ideal para implementar en proyectos industriales. Tomado de (SILGE, 2022).

En la parte posterior se encuentran los puertos de comunicación y alimentación de la pantalla del HMI, como se indica en la Figura 64.

Figura 64

Estructura posterior de la pantalla HMI TOUCHWIN TG765-MT 7"



Nota. Se verifica los puertos de comunicación y alimentación. Tomado de (SILGE, 2022).

Implementación y Montaje del Sistema Mecánico

Una vez finalizado el apartado de diseño mecánico de la mesa lineal, se determina las partes necesarias para la construcción y ensamble de la máquina, en este caso se considera dos tipos de materiales, los cuales son:

- Construidos a partir de la materia prima
- Adquiridos en su totalidad.

Las partes que van a ser construidas a partir de la materia prima se detallan a continuación con su respectivo diagrama de proceso.

Paredes Principales de la Estructura

En las paredes principales se considera un diseño más sólido sin perforaciones, con la finalidad de generar mayor resistencia al momento de soportar el peso implementado en la máquina, en la Figura 65, se muestra el diseño realizado en software y su construcción.

Figura 65

Modelo diseñado en software CAD/CAE: pared principal



Nota. En la figura izquierda se observa la pared principal diseñada en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

Soportes Laterales de la Estructura

Dentro de las paredes laterales, según el mejor criterio se selecciona el diseño que da el mejor soporte a la estructura, como se observa en la Figura 66.

Figura 66

Modelo diseñado en software CAD/CAE: soporte lateral

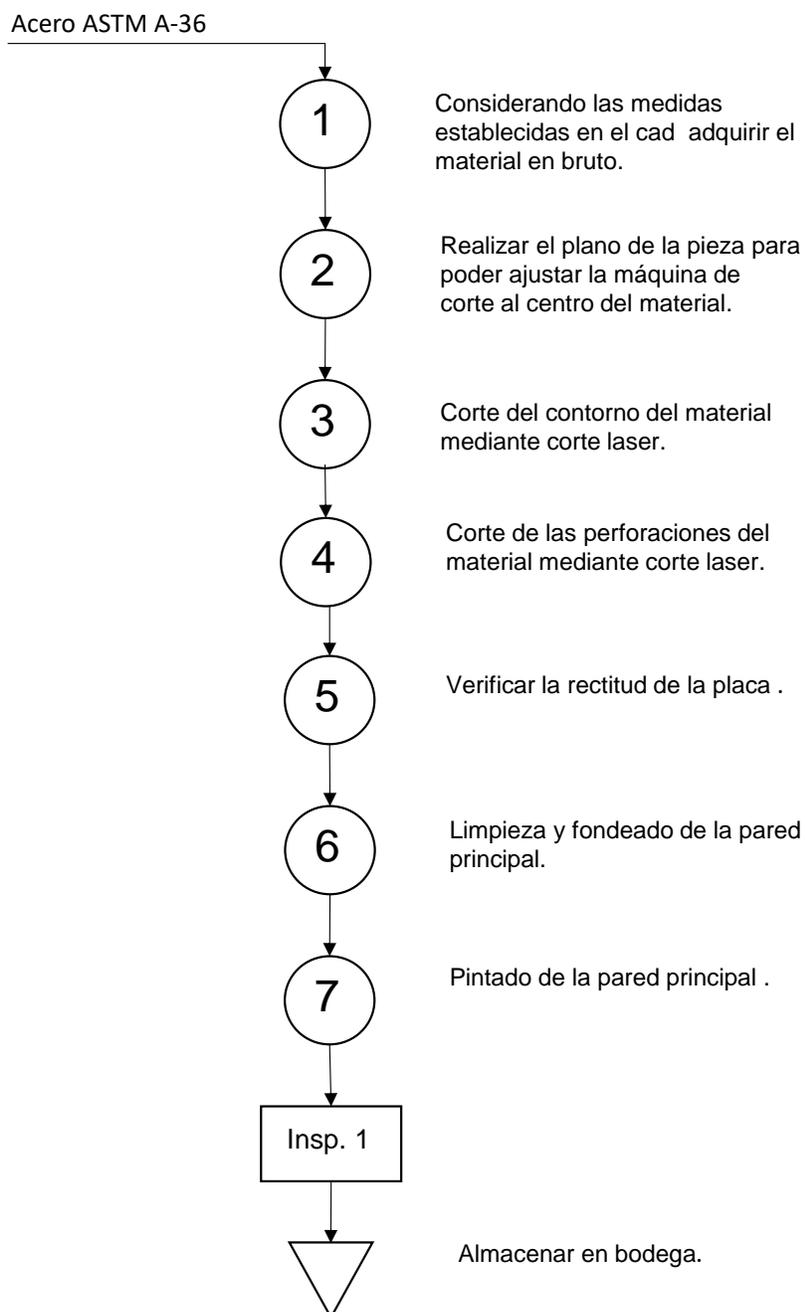


Nota. En la figura izquierda se observa el soporte lateral diseñado en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

En la Figura 67, se hace referencia al desarrollo del proceso de construcción de la pared principal desde el momento de la adquisición del material.

Figura 67

Diagrama de proceso de la pared principal

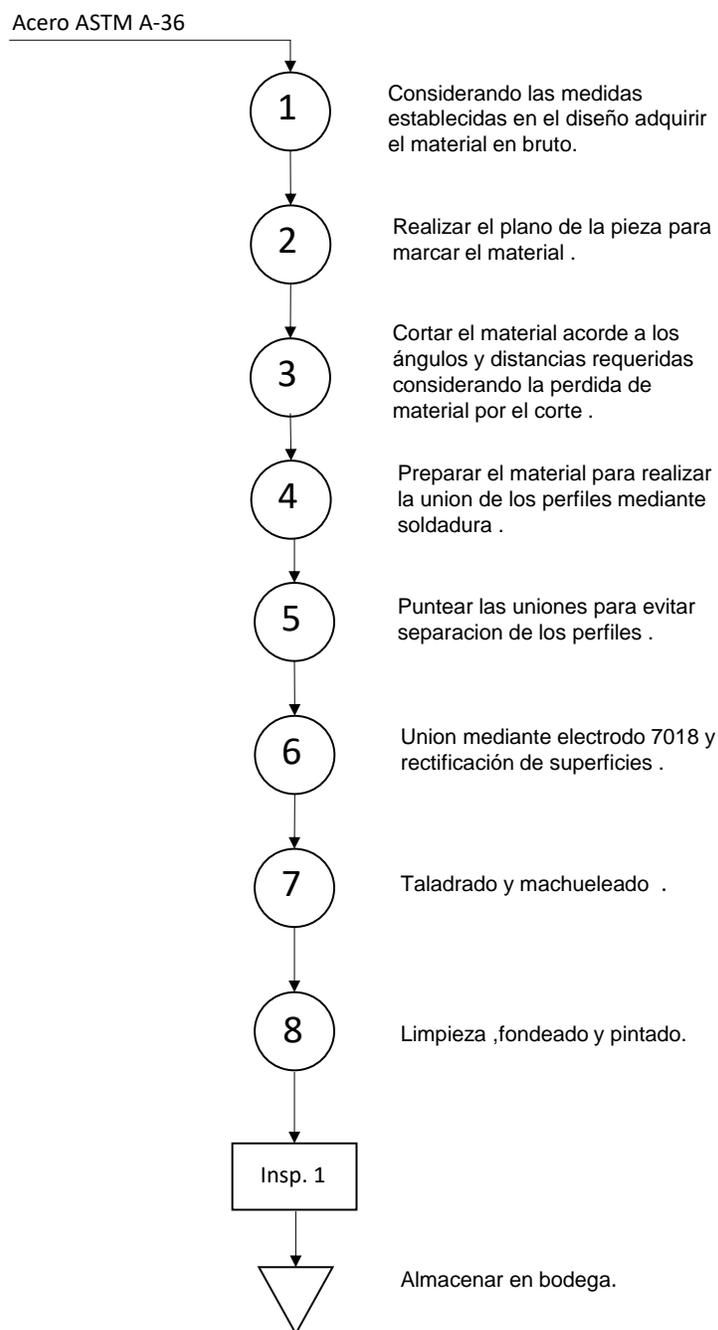


Nota. Diagrama de la pared principal desde la adquisición de material hasta su implementación.

En la Figura 68, se hace referencia al desarrollo del proceso de construcción de los soportes laterales desde el momento de la adquisición del material.

Figura 68

Diagrama de proceso de los soportes laterales



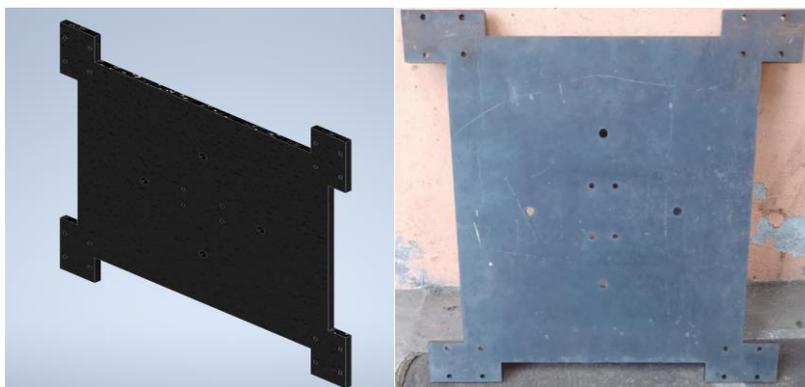
Nota. Diagrama del soporte lateral desde la adquisición de material hasta su implementación.

Soporte Deslizante

Dentro de este modelo se establece una distancia equilibrada de la base, ya que este componente es el principal elemento para la sujeción de las guías ancladas a los rieles, como se observa en la Figura 69.

Figura 69

Modelo diseñado en software CAD/CAE: soporte deslizante



Nota. En la figura izquierda se observa el soporte deslizante diseñado en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

Mesa de Trabajo

Esta mesa está diseñada de tal manera que pueda soportar el calor generado por la soldadura, adicionalmente en ésta se sujetará el material a soldar por medio de Step clamps, como se observa en la Figura 70.

Figura 70

Modelo diseñado en software CAD/CAE: mesa de trabajo

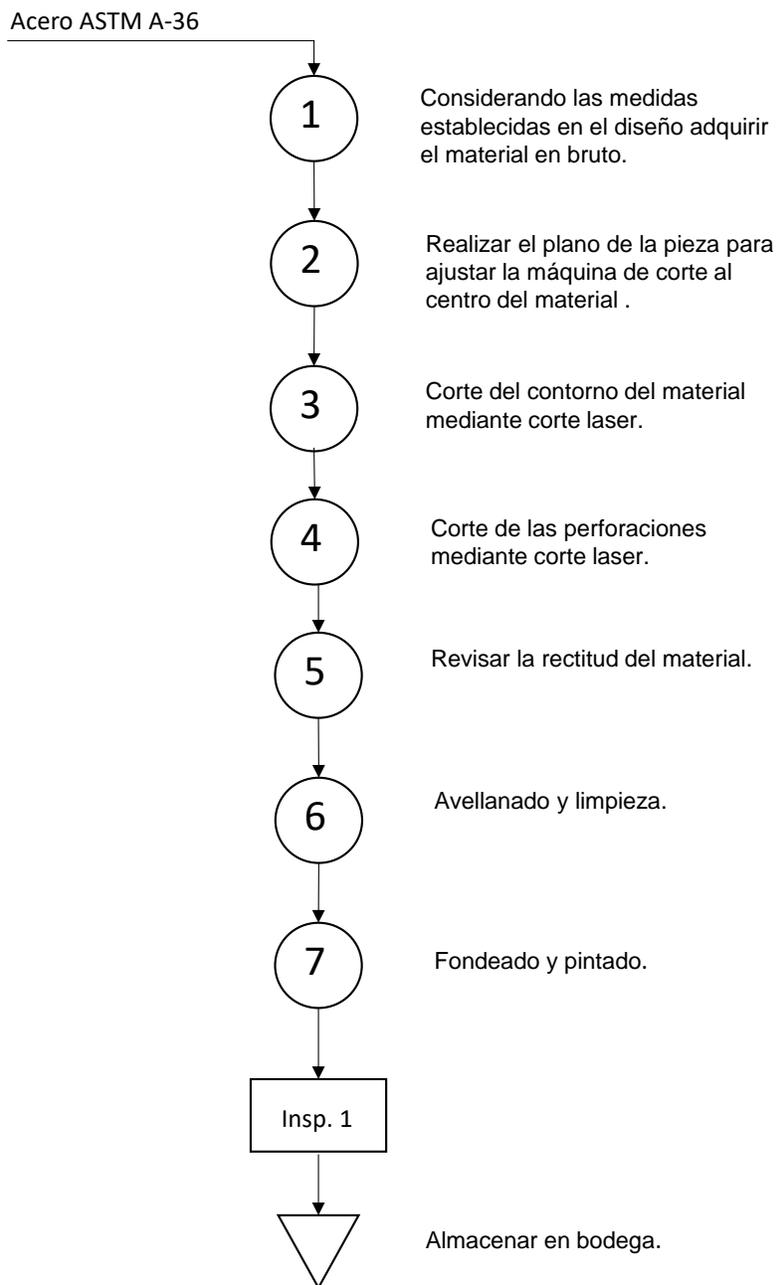


Nota. En la figura izquierda se observa la mesa de trabajo diseñada en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

En la Figura 71, se hace referencia al desarrollo del proceso de construcción del soporte deslizante desde el momento de la adquisición del material.

Figura 71

Diagrama de proceso del soporte deslizante

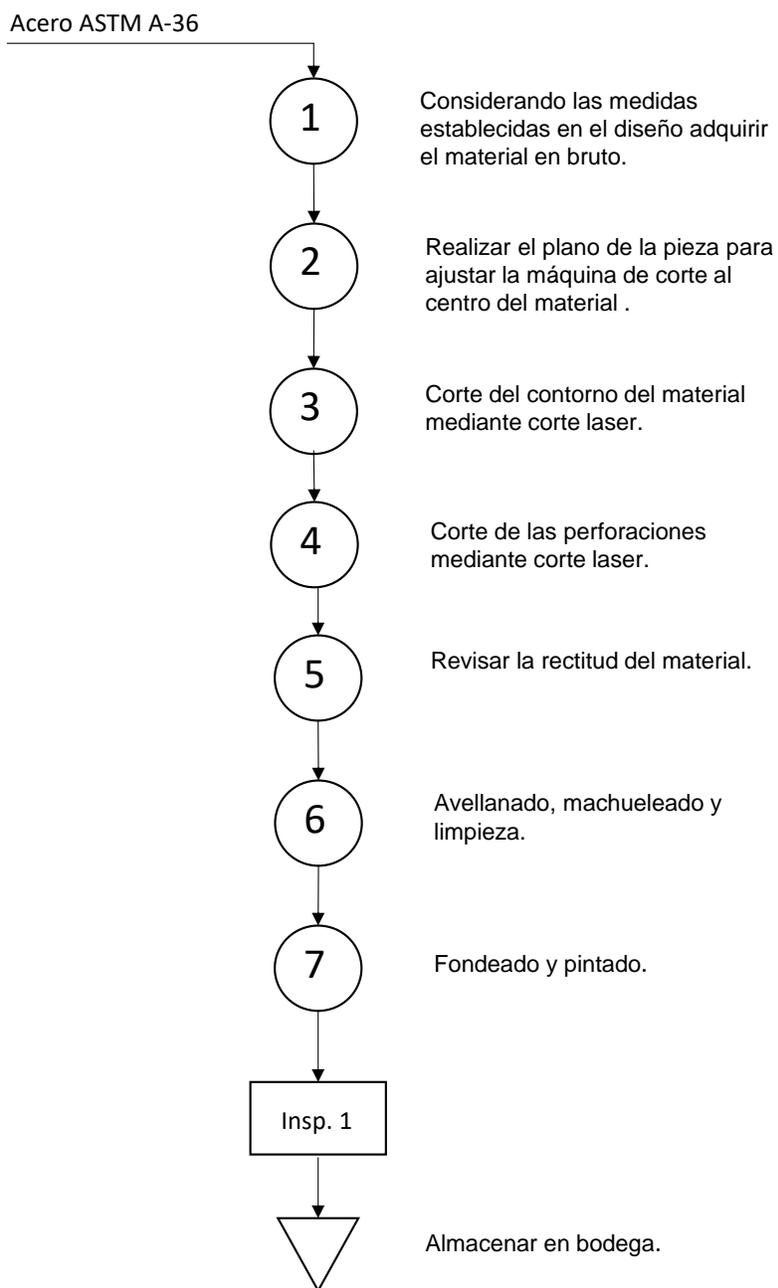


Nota. Diagrama del soporte deslizante desde la adquisición de material hasta su implementación.

En la Figura 72, se presenta el proceso de construcción de la mesa de trabajo desde el momento de la adquisición del material.

Figura 72

Diagrama de proceso de la mesa de trabajo



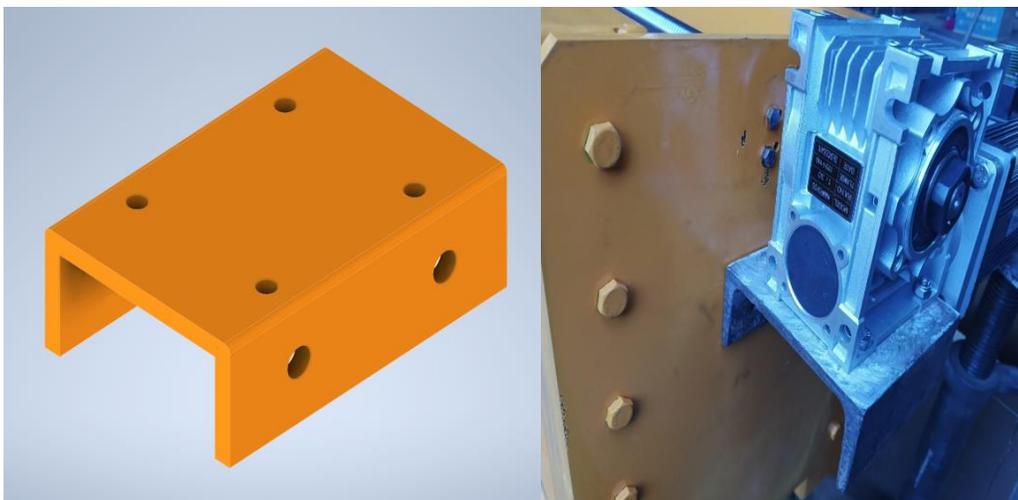
Nota. Diagrama de la mesa de trabajo desde la adquisición de material hasta su implementación.

Soporte del Servo Motor

Este soporte realiza una de las principales funciones dentro de todo el desarrollo de esta máquina, es importante considerar que, al ser un trabajo combinado con un brazo robótico de alta precisión, no debe existir variación ni desplazamientos; por esta razón el soporte debe estar bien anclado para evitar vibraciones del servo motor, en la Figura 73, se observa la manera como se encuentra empotrado este mecanismo para su transmisión de movimiento.

Figura 73

Modelo diseñado en software CAD/CA: soporte Servo motor



Nota. En la figura izquierda se observa el soporte del servo motor diseñado en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

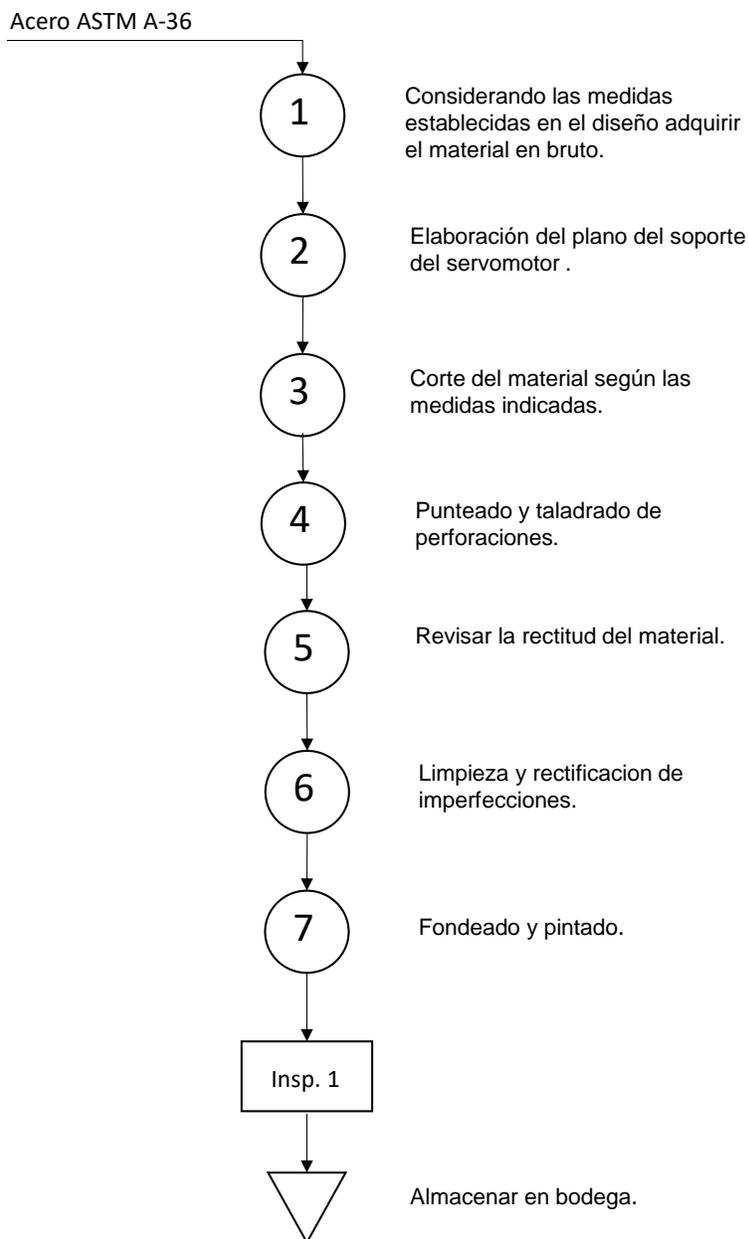
En la Figura 74, se presenta el proceso de construcción del soporte del servo motor desde el momento de la adquisición del material.

Elementos Adquiridos en su Totalidad

Los elementos comerciales son: servo motor, servo controlador, reductor de velocidad, PLC, guías lineales trapezoidales, rodamientos lineales, pernos $\frac{1}{2}$ pulgada, pernos M10, pernos M5, finales de carrera, caja de control, interruptor termomagnético, terminales eléctricos.

Figura 74

Diagrama de proceso del soporte del servo motor



Nota. Diagrama del soporte del servo motor desde la adquisición de material hasta su implementación.

Ensamble de la Mesa Lineal

Es importante considerar las estructuras mencionadas anteriormente, ya que constan de la pared principal y soportes laterales, como se observa en la Figura 75.

Figura 75

Modelo diseñado en software CAD/CAE: ensamble mesa lineal



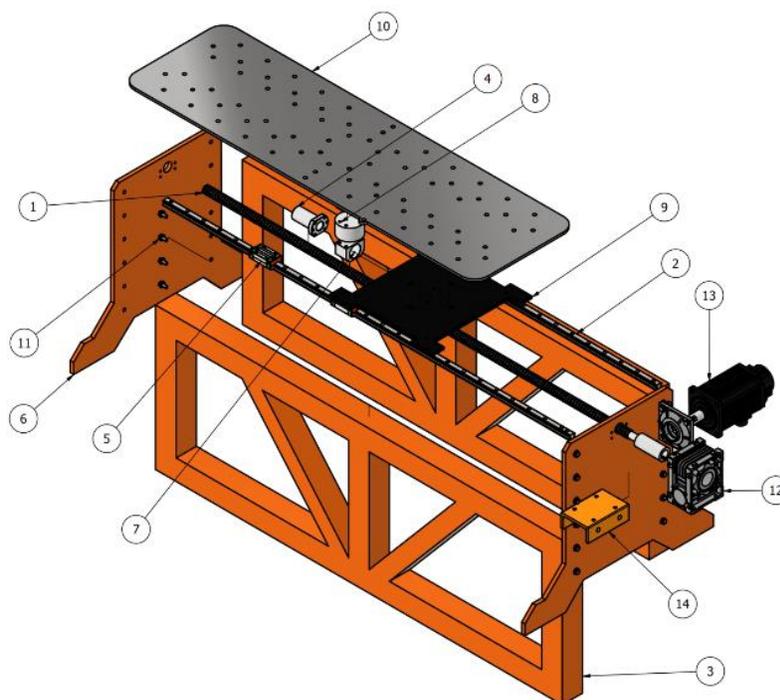
Nota. En la figura izquierda se observa el ensamble de la estructura principal diseñado en software CAD/CAE y en la figura derecha en su aspecto físico.

Despiece de la Mesa Lineal de Soldadura

Para el ensamble de la mesa lineal de soldadura, es necesario disponer de todas las partes anteriormente mencionadas, como muestra la Figura 76.

Figura 76

Modelo diseñado en software CAD/CAE: ensamble general

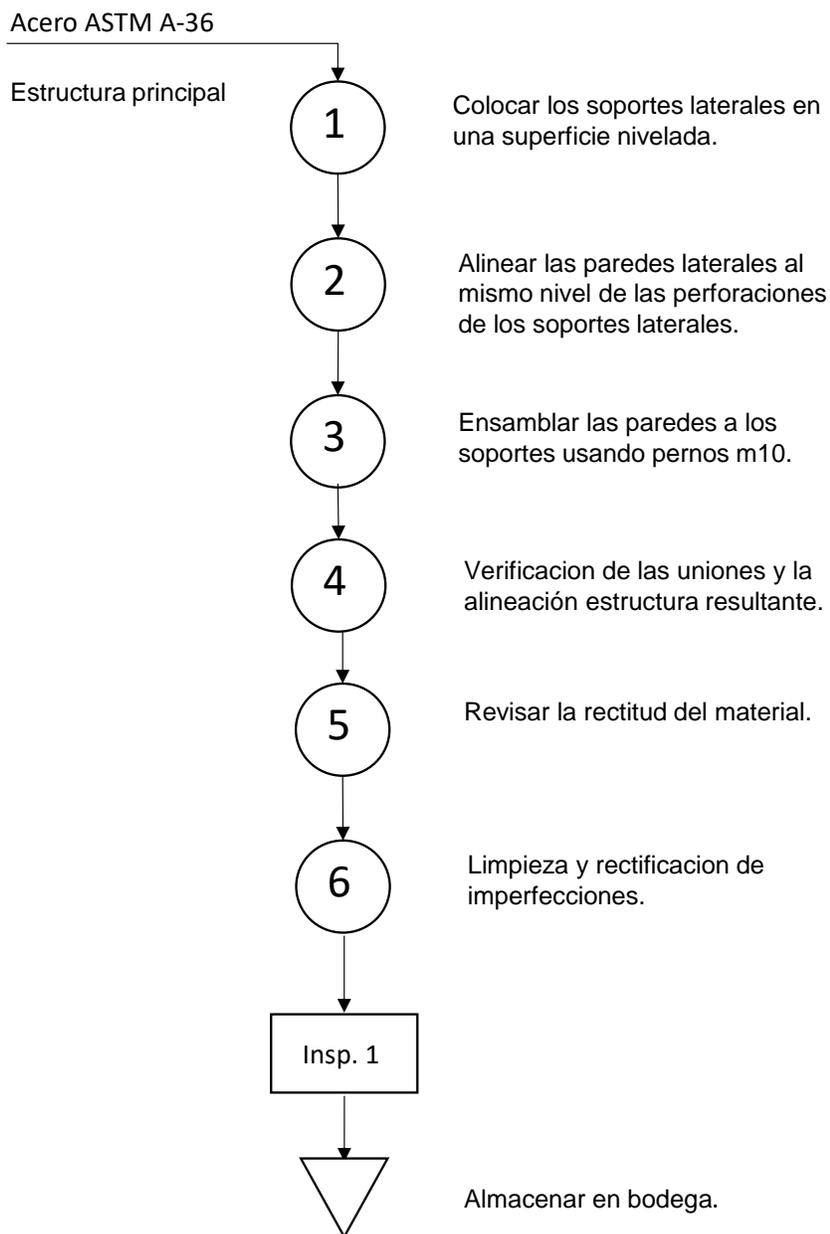


Nota. Partes de la mesa lineal de soldadura.

En la Figura 77, se presenta proceso de ensamble de la estructura principal.

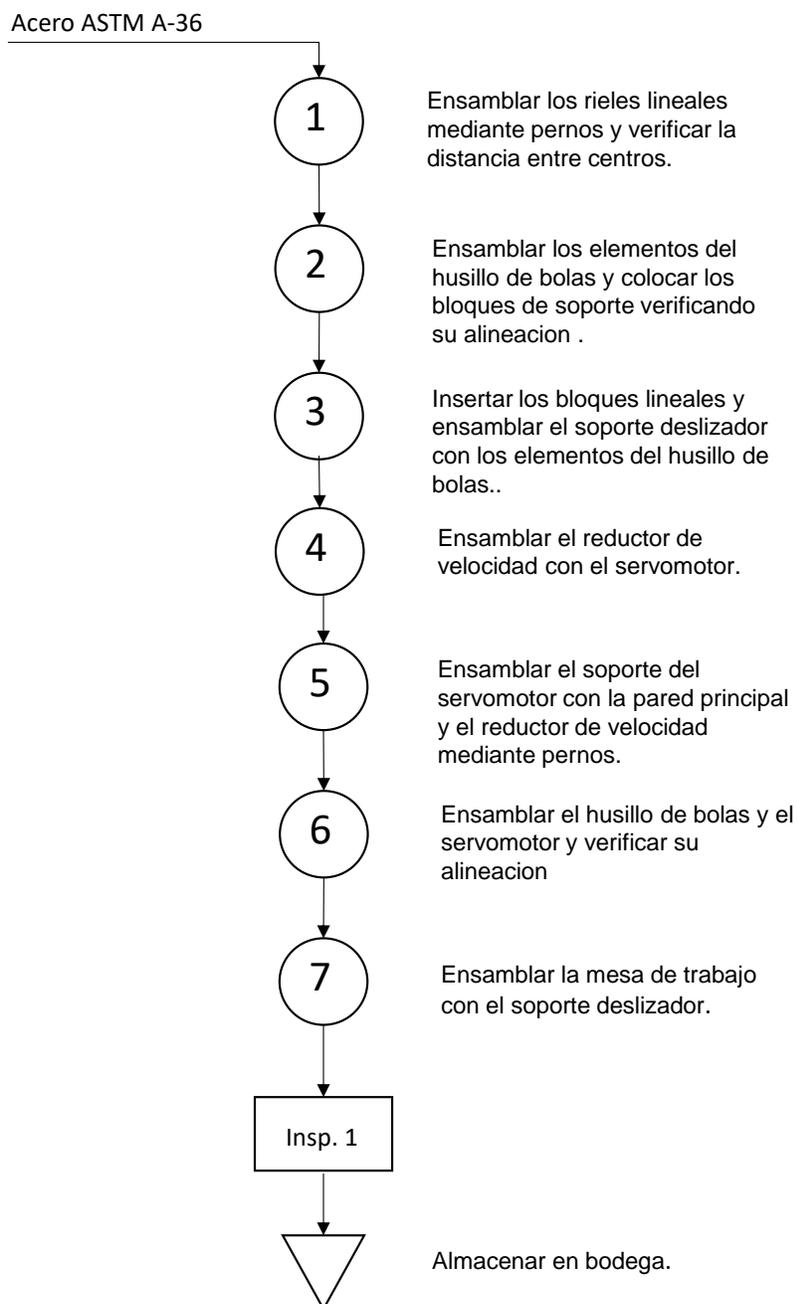
Figura 77

Diagrama del ensamble de la estructura principal



Nota. Diagrama del ensamble de la estructura principal desde los elementos individuales hasta la estructura final.

En la Figura 78, se presenta el proceso de ensamble de la mesa lineal.

Figura 78*Diagrama del ensamble de la mesa lineal**Nota.* Diagrama del ensamble total de la mesa.

Partes de la Mesa Lineal de Soldadura

Como se observa en la Figura 76, se puede identificar algunas numeraciones dentro del ensamble, las mismas que se detallan a continuación:

1. Husillo de Bolas 2505
2. Guía lineal trapezoidal 1500mm
3. Soporte Lateral
4. Tuerca de husillo de bolas
5. Bloque lineal HGR20R
6. Pared Principal
7. Protector de tuerca
8. Separador del deslizador y la tuerca
9. Soporte Deslizador
10. Mesa de trabajo
11. Pernos m10
12. Reductor de velocidad 30:1
13. Servomotor

Los planos completos de la mesa lineal se encuentran en el Anexo 16.

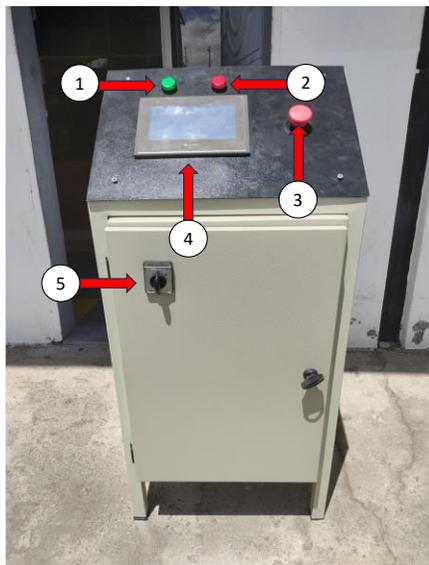
Implementación y Conexión del Sistema Eléctrico y Electrónico

Para la comunicación entre dispositivos eléctricos y electrónicos se construye un tablero de control como se indica en la Figura 79, donde se puede identificar las partes numeradas que corresponde a la siguiente característica:

1. Led indicador de encendido.
2. Led indicador de paro de emergencia.
3. Pulsador de paro de emergencia.
4. Panel touch.
5. Selector de encendido.

Figura 79

Tablero de control del sistema eléctrico y electrónico

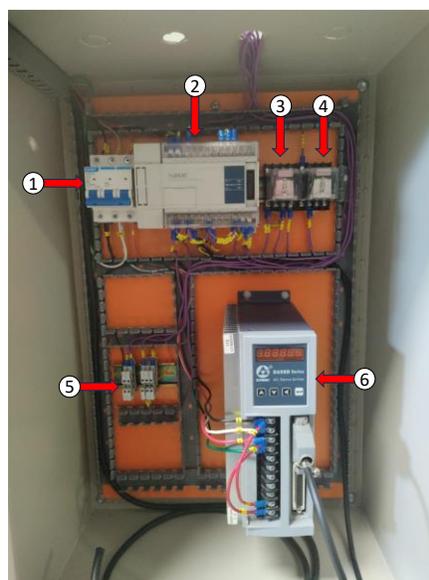


Nota. Partes del tablero de control, donde se tiene el mando de la máquina.

De la misma manera se realiza el cableado del sistema de control acorde al diseño del Anexo 17, como se puede observar a los elementos que lo constituyen en la Figura 80.

Figura 80

Clasificación interna del tablero de control



Nota. Partes internas del tablero de control.

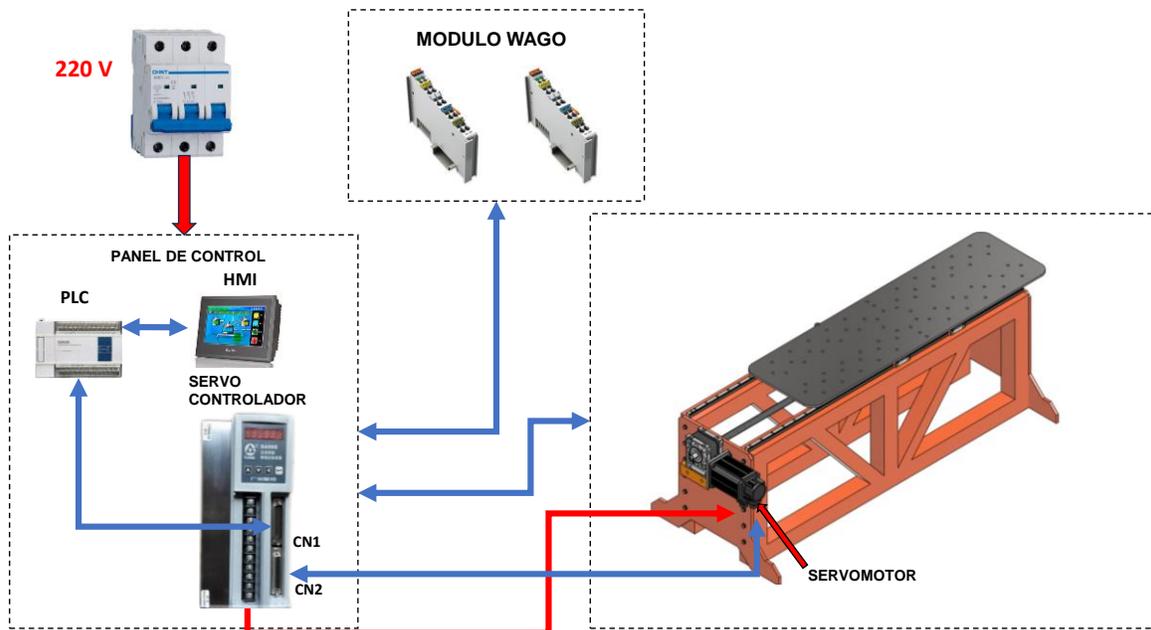
Donde, entre los principales componentes mostrados en la Figura 80, se detallan a continuación, con la finalidad de entender de mejor manera este proceso.

1. Interruptor termomagnético.
2. PLC.
3. Relé PLC-KRC2
4. Relé KRC2-PLC
5. Borneras de conexión DIN
6. Unidad de control del servo motor

Una vez que se dispone en su totalidad de los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos se procede a realizar un esquema de conexión, el mismo que se detalla en la Figura 81.

Figura 81

Esquema de conexión general de la máquina



Nota. Se visualiza los elementos que interactúan en el esquema de conexión, necesarias para su correcto funcionamiento.

En la Figura 81 se observa que la red de alimentación provee de energía al panel de control, a través del PLC se envía las órdenes para realizar los diferentes controles establecidos en la programación y a su vez el servo controlador alimenta al servo motor, el cual recibe los datos del encoder para realizar control en lazo cerrado de posición y velocidad.

De la misma manera se observa como el panel de control se comunica de forma bidireccional con el módulo WAGO, esto permite realizar la sincronización entre dispositivos de la cual se detallará su funcionamiento en el siguiente capítulo, finalmente se observa una comunicación bidireccional entre la mesa y el panel de control debido a los finales de carrera, los cuales están ubicados en los extremos de la mesa lineal.

Capítulo IV

Desarrollo del Sistema de Control

Parámetros de Control

El presente apartado describe los parámetros fundamentales para el control preciso y eficiente del sistema de la mesa lineal de manera individual, así como los parámetros para el funcionamiento sincronizado del sistema mecatrónico y su respectiva lógica de control. Dichos parámetros se describen a continuación:

Control de Velocidad y Desplazamiento

El control de velocidad y posición desempeñan un rol fundamental en la ejecución de movimientos suaves, precisos y sincronizados, tanto de manera individual, como en conjunto con el brazo robótico, garantizando un control óptimo y logrando satisfacer las demandas del proceso.

Control de Velocidad.

La velocidad de salida del servo motor es una velocidad angular, la cual se controla mediante la variación de frecuencia con intervención del servo controlador presentado en la Figura 58, mientras que, la velocidad de la mesa se debe controlar como velocidad de desplazamiento lineal, por lo tanto, se aplica un factor de conversión que transforme la velocidad de desplazamiento lineal en velocidad angular, a su vez que interprete el valor de la velocidad lineal ingresado por el usuario a un valor de frecuencia aceptada por el servo controlador.

Para obtener la velocidad de desplazamiento lineal, se aplica la Ecuación 23:

$$v_l = \frac{p \times \omega_r}{1000} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

- v_l = Velocidad de desplazamiento lineal [m/min]
- p = Paso del husillo de bolas [mm]

- ω_r = Velocidad angular a la salida del reductor [rev/min]

El servo motor está acoplado al husillo de bolas mediante un reductor de velocidad con relación 30:1, por lo tanto, la velocidad angular a la salida del motor se calcula mediante la

Ecuación 24:

$$\omega_m = \omega_r \times 30 \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde ω_m es la velocidad angular a la salida del motor [rev/min]. El valor de la frecuencia para el control del motor esta dado por la Ecuación 25:

$$f = \frac{\omega_m \times P}{60} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

- f = Frecuencia de entrada [Hz]
- ω_m = Velocidad angular a la salida del motor [rev/min]
- P = Resolución del encoder, $P = 10000$ (valor tomado del Anexo 11, página 10)

Despejando ω_r de la Ecuación 23 y realizando operaciones matemáticas en la Ecuación 24 y la Ecuación 25 se tiene:

$$f = \frac{\frac{v_l \times 1000}{p} \times 30 \times P}{60}$$

$$f = \frac{\frac{v_l \times 1000}{5} \times 30 \times 10000}{60}$$

$$f = v_l \times 1000000 \quad \text{Ecuación 26}$$

La Ecuación 26 representa el factor de conversión que transforma el valor de la velocidad lineal ingresado por el usuario al valor de frecuencia aceptada por el servo controlador para que la mesa lineal se desplace a la velocidad ingresada.

Es de suma importancia conocer los valores de frecuencia de salida que ofrece el PLC y los valores que acepta el servo controlador, siendo 400 kHz y 500 kHz, respectivamente

(Anexo 10 y Anexo 11). Estos valores contribuyen al cálculo de la velocidad lineal máxima para el desplazamiento de la mesa, los cálculos se presentan a continuación:

La frecuencia máxima de salida de pulsos del PLC es 400 kHz, por lo tanto, despejando v_l de la Ecuación 26 se obtiene:

$$v_l = \frac{f}{1000000} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$v_l = \frac{400000 \text{ Hz}}{1000000}$$

$$v_l = 0,4 \text{ m/min}$$

El resultado de la Ecuación 27 representa la velocidad máxima de desplazamiento lineal de la mesa, siendo 0,4 m/min.

Control de Desplazamiento.

Al igual que el control de velocidad, para el control de desplazamiento se debe encontrar y aplicar un factor de conversión, ya que la distancia que ingresa el usuario debe ser en milímetros, mientras que el servo motor debido al encoder integrado realiza el control de desplazamiento mediante pulsos, es decir, un cierto número de pulsos representa un cierto desplazamiento lineal en milímetros.

Para obtener la cantidad de pulsos necesarios para que la mesa se desplace una cierta distancia se aplica la Ecuación 28:

$$Pls = \frac{d \times P \times 30}{p} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$Pls = \frac{d \times 10000 \times 30}{5}$$

$$Pls = d \times 60000 \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

- Pls = Número de pulsos de entrada
- d = Desplazamiento de la mesa (mm)

La Ecuación 29 representa el factor de conversión que transforma la distancia en milímetros ingresado por el usuario en el número de pulsos necesarios para desplazarse la distancia ingresada.

Algoritmo de Programación

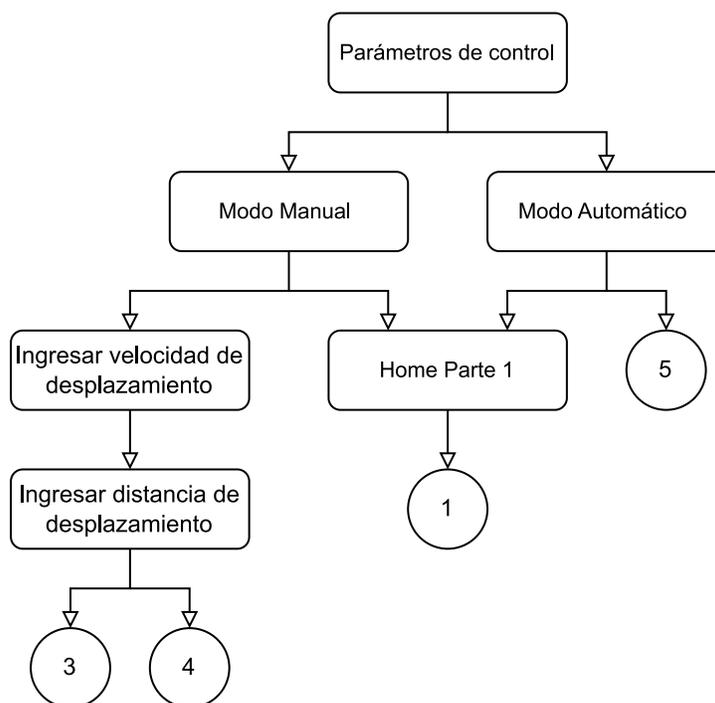
El algoritmo de programación para el funcionamiento de la mesa lineal está conformado por 5 subrutinas, las cuales son llamadas desde la programación principal dependiendo del caso, los algoritmos se analizan de manera individual a continuación:

Programación Principal.

En esta sección se implementa los parámetros de control descritos con anterioridad, con la finalidad de mantener dichos parámetros activos de manera constante, tal es el caso, de la activación del servo motor, luces piloto indicadoras, operaciones aritméticas y conversión de datos, como se indica en la Figura 82 para el correcto funcionamiento de la mesa lineal.

Figura 82

Diagrama de parámetros principales del algoritmo de programación



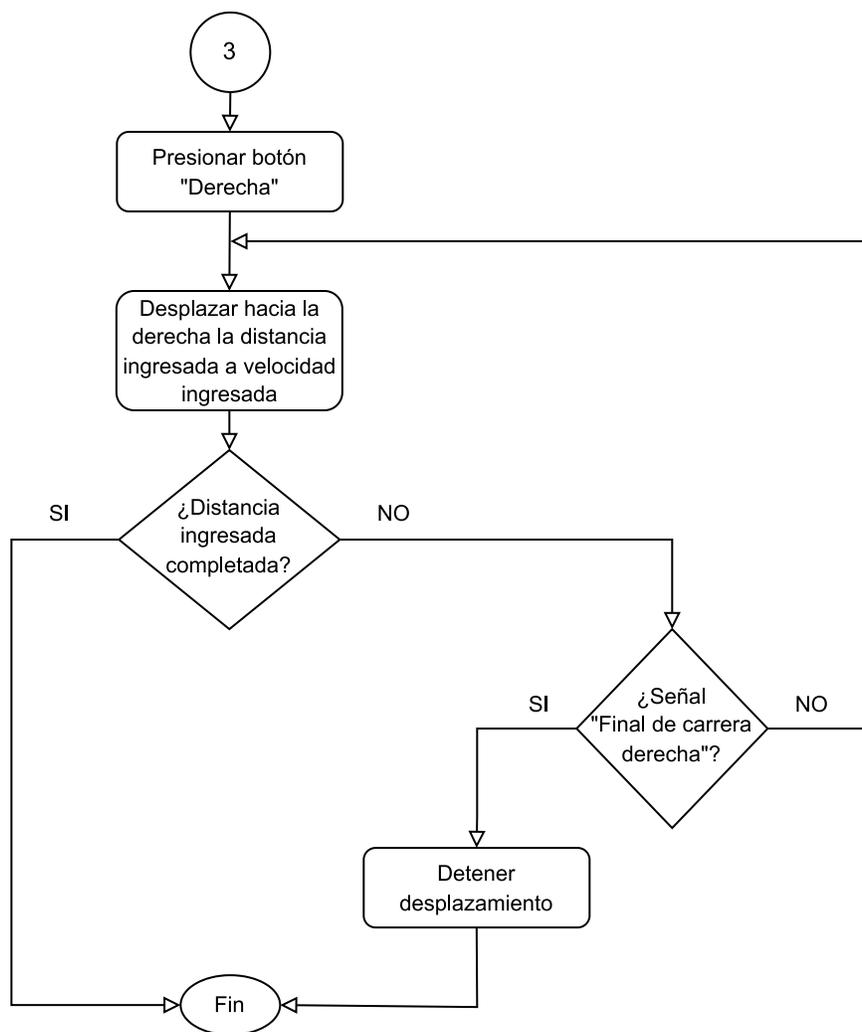
Nota. Parámetros y opciones básicas de la programación principal.

Subrutina Movimiento Derecha.

Esta subrutina ejecuta el movimiento de la mesa lineal hacia la derecha (-x) respecto a las coordenadas de origen de la Figura 87, a partir de los datos de entrada: velocidad y desplazamiento como se muestra en la Figura 83.

Figura 83

Diagrama de flujo de la subrutina Movimiento Derecha



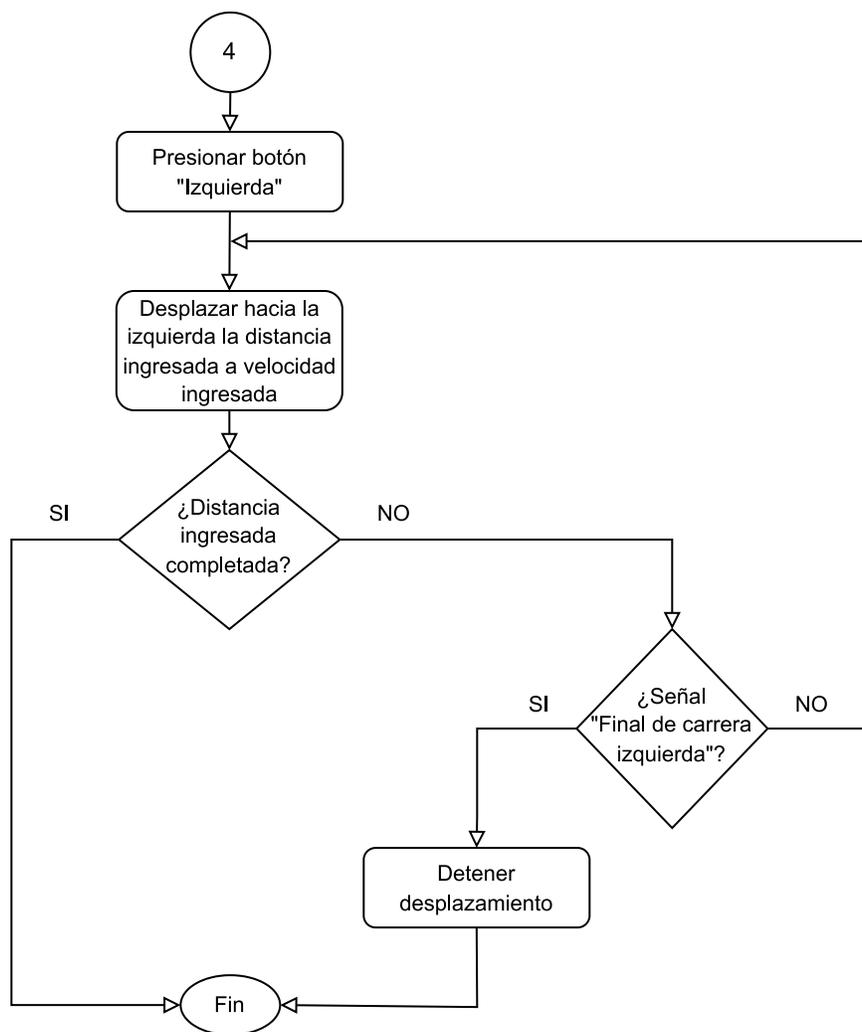
Nota. Lógica de programación del algoritmo para la subrutina Movimiento Derecha.

Subrutina Movimiento Izquierda.

Esta subrutina trabaja de manera semejante a la anterior, cambiando el sentido de movimiento respecto a las coordenadas de origen, como se describe en el diagrama de flujo de la Figura 84.

Figura 84

Diagrama de flujo de la subrutina Movimiento Izquierda



Nota. Lógica de programación del algoritmo para la subrutina Movimiento Izquierda.

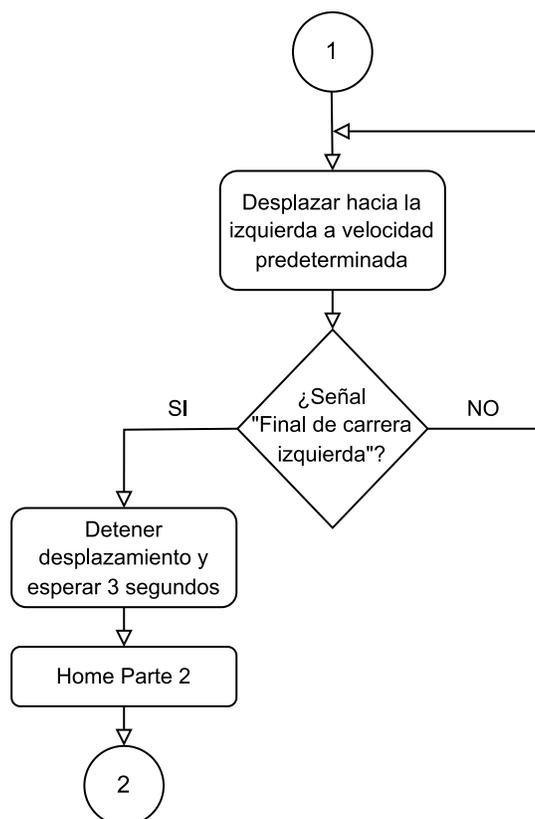
Subrutina Home Parte 1.

La subrutina Home parte 1, en conjunto con la parte 2, se encarga de ubicar la mesa lineal en la posición inicial denominada "Home", que es el sistema de coordenadas de la Figura

87, esta ubicación es importante, ya que es el punto de partida para el proceso de soldadura lineal. El algoritmo de esta subrutina se muestra en la Figura 85.

Figura 85

Diagrama de flujo de la subrutina Home parte 1



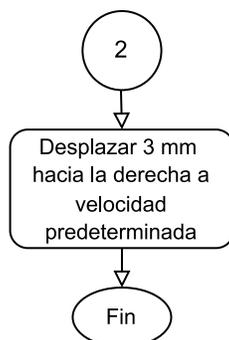
Nota. Lógica de programación del algoritmo para la subrutina Home parte 1.

Subrutina Home Parte 2.

Es la continuación de la subrutina descrita previamente, el algoritmo de la Figura 86 coloca la mesa en la ubicación exacta para dar inicio al proceso. Una segunda parte de la subrutina Home es necesaria por la restricción de uso de instrucciones de movimiento en el software de programación, dicho software y restricciones se explican más adelante en el apartado de Programación del PLC.

Figura 86

Diagrama de flujo de la subrutina Home parte 2



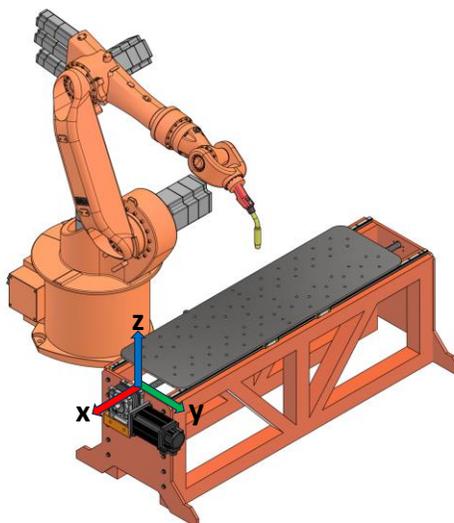
Nota. Lógica de programación del algoritmo para la subrutina Home parte 2.

Subrutina Modo Automático.

La finalidad de esta subrutina es la sincronización de la mesa lineal conjuntamente con el brazo robótico mediante las entradas y salidas digitales del módulo WAGO para su respectiva aplicación con un desplazamiento y velocidad establecidas. El diagrama de flujo correspondiente se indica en la Figura 88.

Figura 87

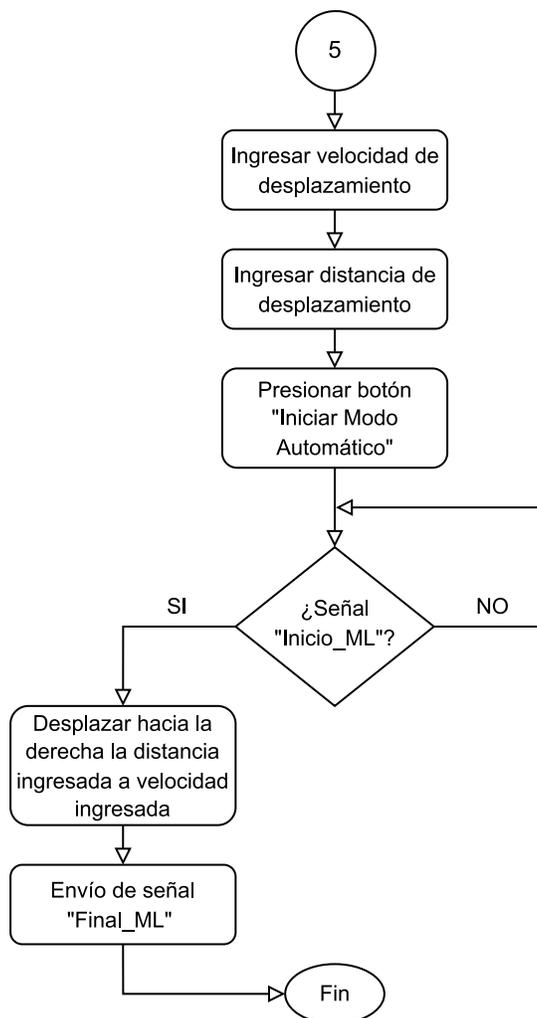
Sistema de coordenadas para el movimiento de la mesa



Nota. El sistema de coordenadas de la mesa lineal coincide con el sistema de coordenadas WORD configurado en el robot KUKA KR5Arc.

Figura 88

Diagrama de flujo de la subrutina Modo Automático



Nota. Lógica de programación del algoritmo para la subrutina del modo automático.

Una vez determinados los parámetros de control y realizado el análisis de los diagramas de flujo de la lógica del algoritmo, se realiza la programación en lenguaje Ladder en la interfaz del software *"Xinje XC Series PLC Program Tool"*, cuyo uso se detalla a continuación:

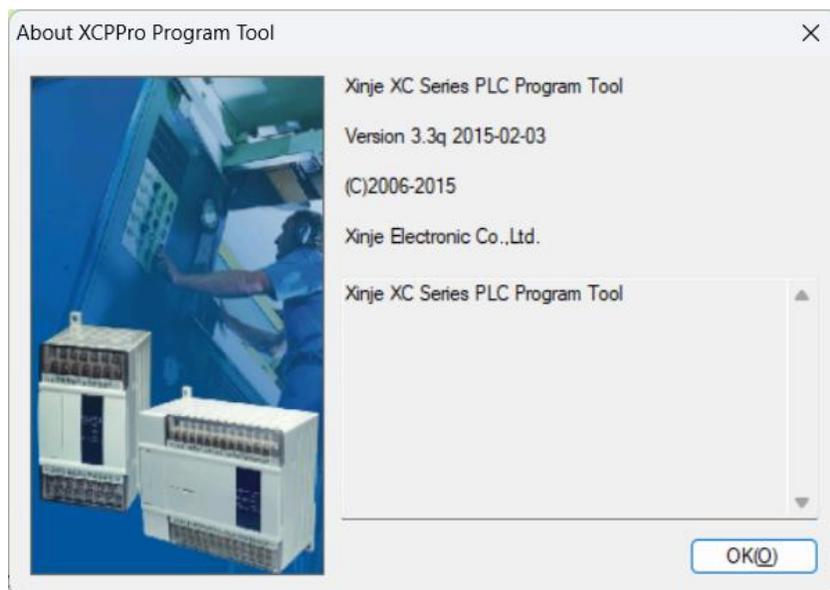
Programación del PLC

Como se manifestó en el capítulo III, el PLC fue proporcionado por la universidad, por este motivo, para el desarrollo de la programación del mismo se utiliza el software *"Xinje XC*

Series PLC Program Tool” específico para el modelo de PLC, cuyas características de muestran en la Figura 89.

Figura 89

Características del software Xinje XC Series PLC Program Tool



Nota. Imagen extraída del apartado de información del software.

Instalación del Software Xinje XC Series Program Tool

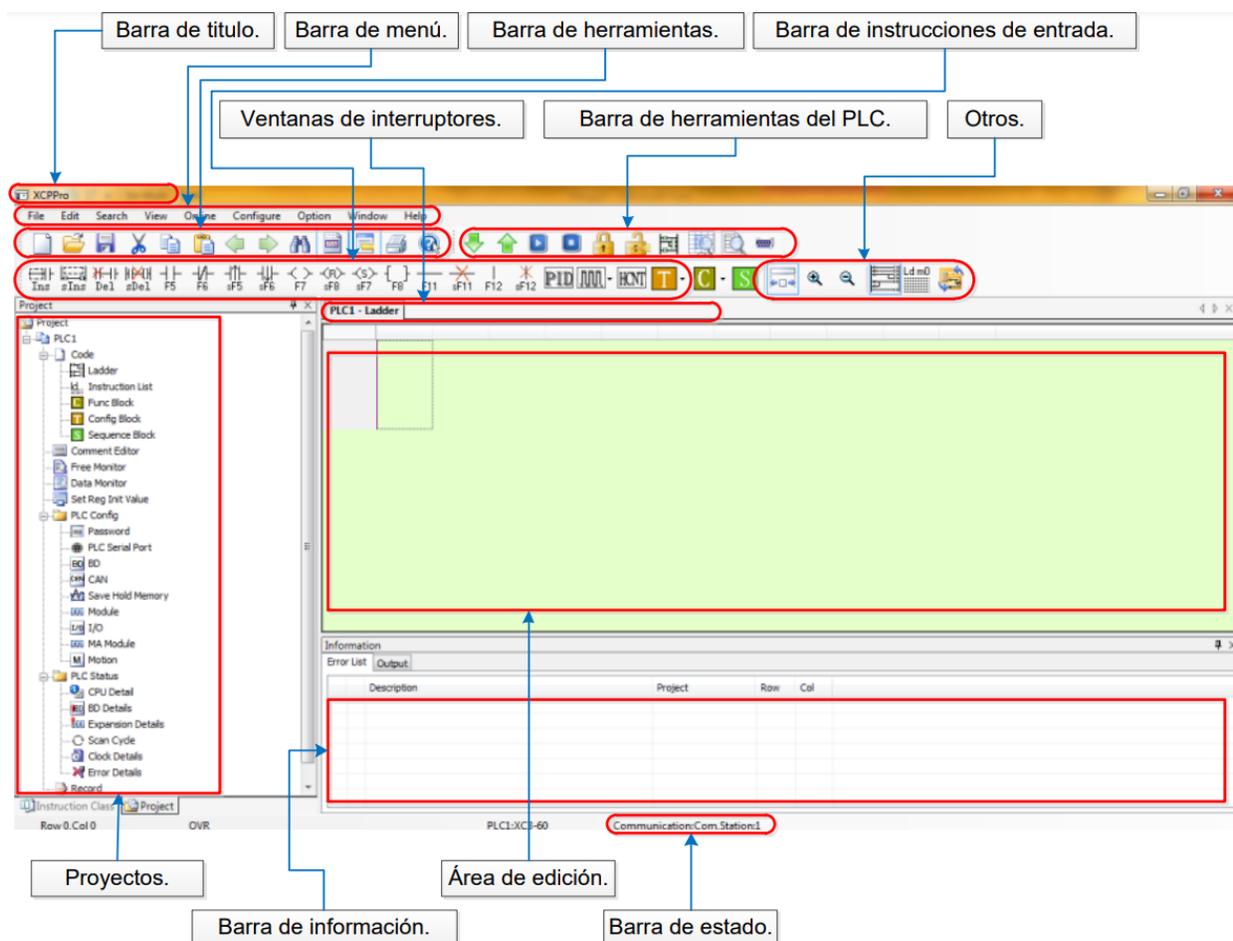
Para su instalación se debe seguir los pasos detallados en el manual de usuario del software del Anexo 18. La correcta instalación del software es fundamental para el desarrollo de cualquier proyecto con este modelo de PLC, con la finalidad de evitar problemas de conexión entre PLC y PC.

Entorno de Trabajo del Software Xinje XC Series Program Tool

Una vez abierto el programa, se presenta la pantalla principal de la Figura 90, en su entorno de trabajo se visualizan las herramientas y opciones para el desarrollo de la programación del PLC.

Figura 90

Entorno de trabajo del software de programación



Nota. Disposición de las herramientas y opciones disponibles del software de programación.

Tomado de (Arias y Toapanta, 2013, p. 132).

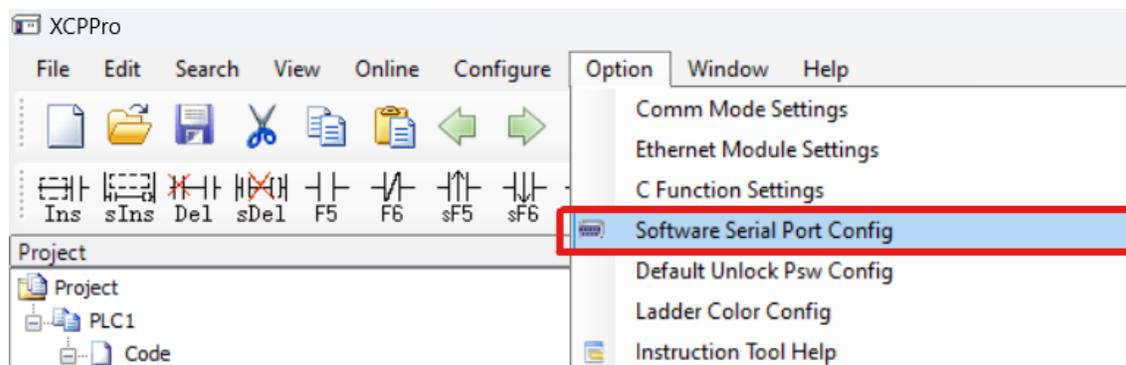
Para un análisis más detallado de las herramientas del software se recomienda revisar el manual de uso del software en el Anexo 18 o el trabajo de Arias y Toapanta (2013), a partir de la página 132.

Configuración del Puerto Serial.

Para la configuración del puerto serial y reconocimiento del PLC se debe seleccionar la opción “*Software Serial Port Config*” en la barra de menú “*Option*” como se muestra en la Figura 91.

Figura 91

Configuración del puerto serial

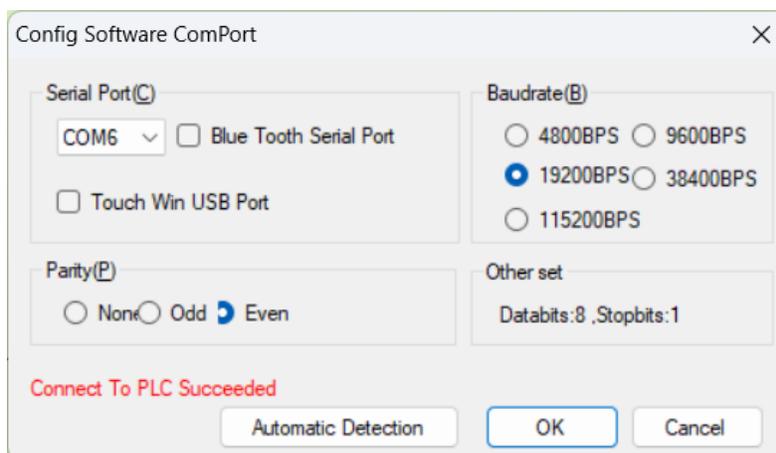


Nota. Imagen extraída del software de programación.

Una vez seleccionada esta opción, aparece la ventana de la Figura 92, en la cual, si se realizó la instalación de manera correcta el PLC se conecta automáticamente de manera exitosa, caso contrario se debe dar clic en el botón “*Automatic Detection*”, para que se detecte el PLC.

Figura 92

Auto conexión del PLC

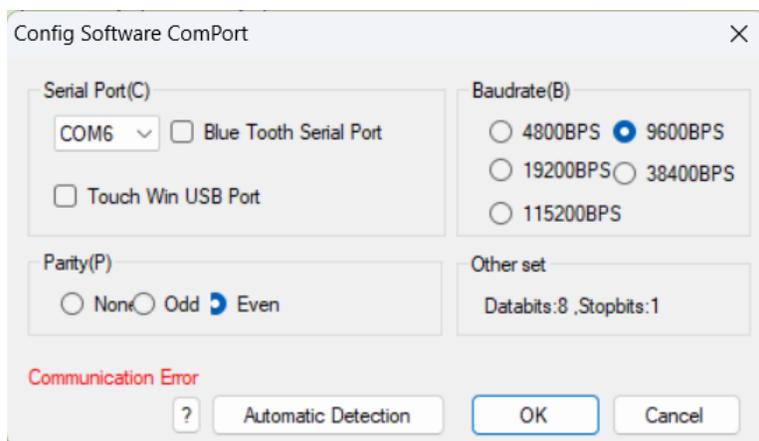


Nota. Imagen tomada del software de programación.

Sin embargo, una vez hecha la instalación de manera correcta, se puede presentar el caso en que el software no detecta el PLC cuando se realiza la configuración del puerto serial generando un mensaje de información como se muestra en la Figura 93.

Figura 93

Mensaje informativo de falla de conexión del PLC



Nota. Imagen extraída del software de programación.

Este caso ocurre cuando existe una versión actualizada del controlador del cable convertidor de RS232 a USB utilizado para la conexión entre el PLC y la PC. La solución a este problema es sencilla, basta con degradar la versión del controlador instalado del software, dicha configuración se profundiza a continuación:

Configuración del Controlador del Cable RS323 a USB.

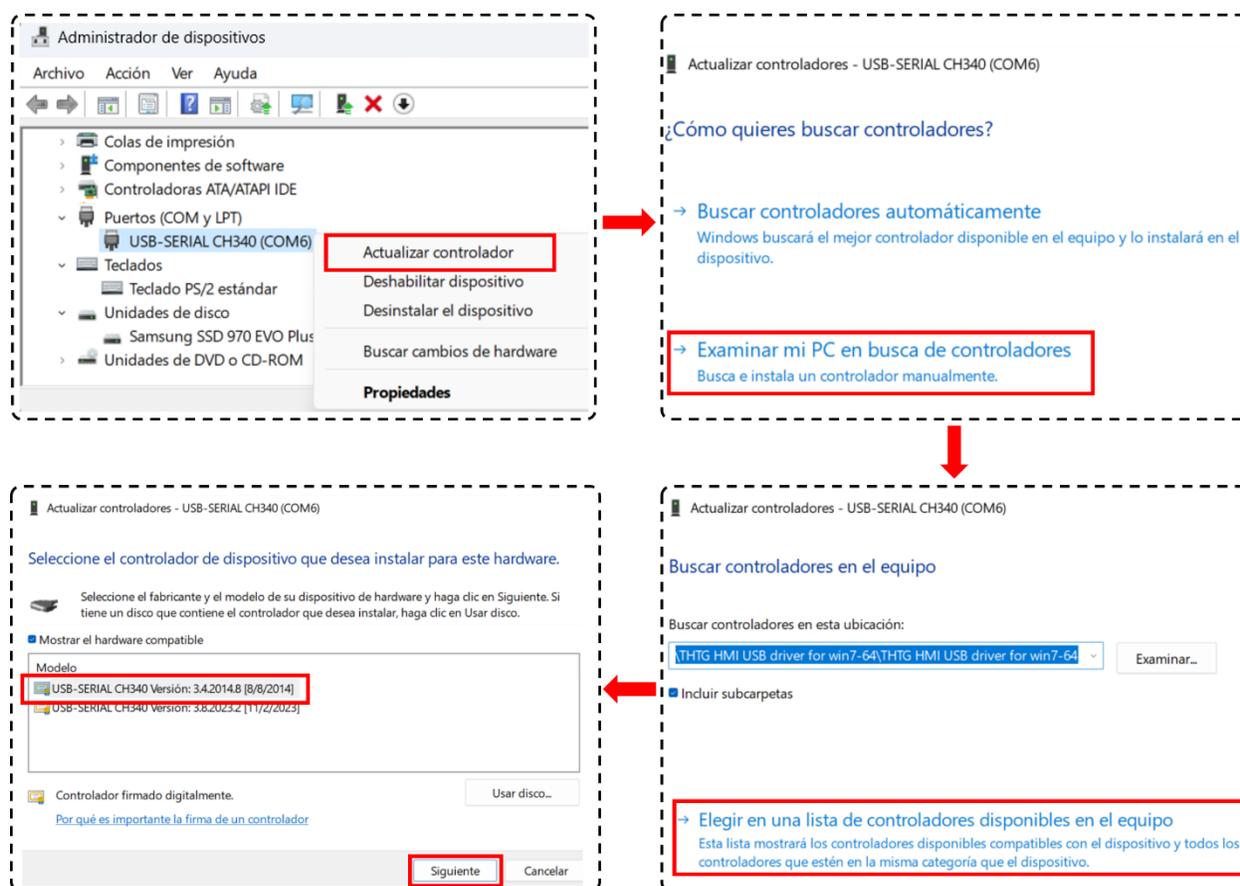
Para este caso se tiene la versión 3.3q 2015 del software de programación como se muestra en la Figura 89, por lo tanto la versión del controlador del cable convertidor de RS232 a USB debe ser inferior a ésta. La degradación de la versión del controlador se indica en la Figura 94 o se realiza mediante los siguientes pasos:

1. Ingresar a Administrador de dispositivos
2. Seleccionar Puertos (COM y LTP)
3. Clic derecho en el puerto COM del cable RS232 a USB “Actualizar controlador”
4. Clic en “Examinar mi PC en busca de controladores”

5. Clic en “Elegir en una lista de controladores disponibles en el equipo”
6. Seleccionar la versión inferior a la versión del software de programación instalado y clic en “Siguiente”
7. Clic en “Cerrar” y reiniciar la PC

Figura 94

Configuración del controlador del cable RS232 a USB



Nota. Pasos para degradar el controlador del cable RS323 a USB en la PC.

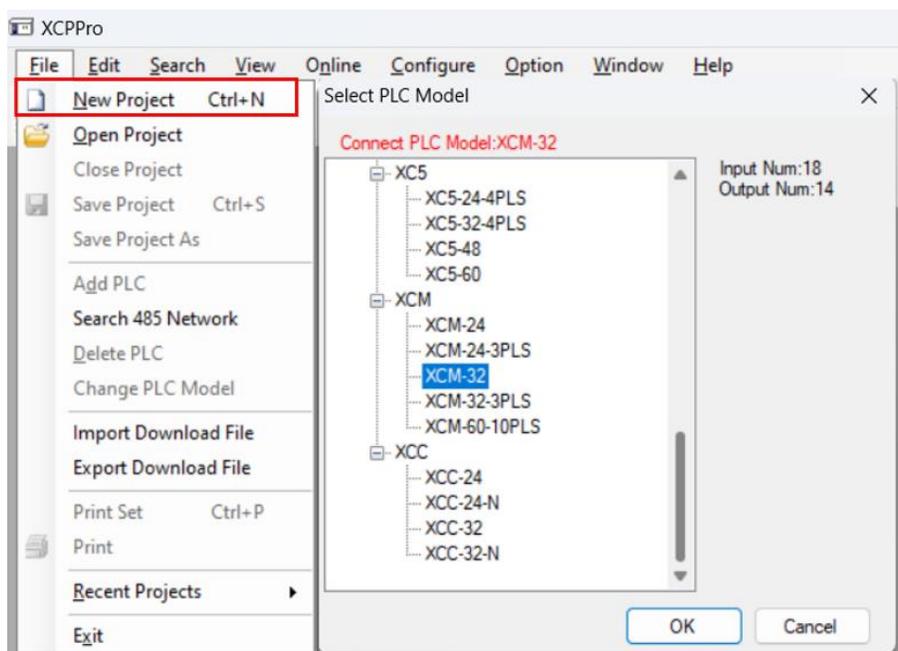
Finalizado los pasos descritos previamente, los cuales, solucionan el problema de comunicación en el puerto serial, se continúa con la programación de la mesa lineal creando un nuevo proyecto como se indica a continuación.

Creación de un Nuevo Proyecto

Siempre que se vaya a trabajar se debe crear un nuevo proyecto y seleccionar el modelo del PLC para tener disponibles todas las herramientas y opciones, en este caso se selecciona el modelo XCM 32T4-E como se muestra en la Figura 95.

Figura 95

Creación de nuevo proyecto



Nota. Selección del modelo del PLC.

Una vez seleccionado el modelo correcto del PLC a utilizar, se procede a realizar la lógica de programación en lenguaje Ladder.

Programación Ladder en el Software Xinje XC Series Program Tool

La barra de instrucciones de entrada como se presentó de la Figura 90 dispone de todas las opciones necesarias para el desarrollo del programa, a su vez, cuenta con instrucciones y comandos que facilitan la programación, entre los usados se tiene, contactos normalmente abiertos y cerrados; temporizadores, comandos para operaciones aritméticas, instrucciones para control de velocidad, entre otras varias, como se muestra en la Figura 96.

Figura 96*Programación Ladder de la mesa lineal*

Nota. La programación completa se encuentra en el Anexo 19.

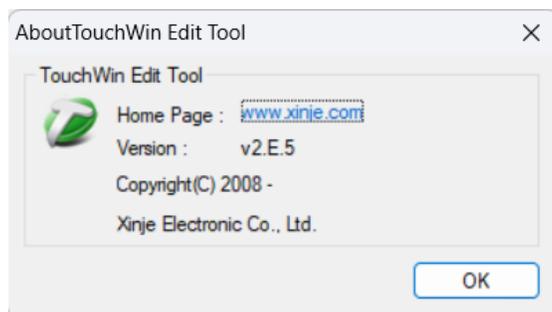
Más detalles de la forma de uso y aplicaciones de las instrucciones y comandos del software se encuentran en el Anexo 18, en el trabajo de titulación de Arias y Toapanta (2013, p. 134); también en el trabajo de Gallo y Saá (2013, p. 126).

Diseño de la Interfaz de Comunicación (HMI)

Como se indicó en el capítulo III, la selección de la pantalla HMI TouchWin TG765-MT favorece la comunicación con el PLC debido a su compatibilidad por ser de la marca Xinje, por lo tanto, para el desarrollo de la interfaz visual en la pantalla HMI seleccionada se emplea el software *“TouchWin Edit Tool”*, en la Figura 97 se muestran las características del software.

Figura 97

Características del software específico TouchWin Edit Tool



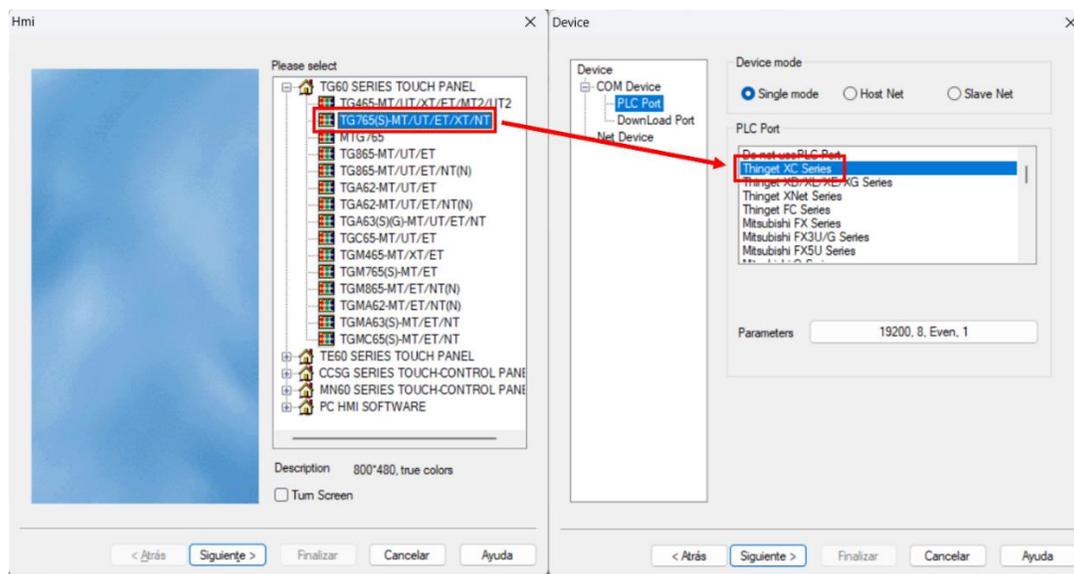
Nota. Imagen extraída del apartado de información del software.

Uso del Software TouchWin Edit Tool

Para empezar el diseño de la interfaz de comunicación se debe crear un nuevo proyecto, en el cual se selecciona el modelo de la pantalla HMI y el modelo del PLC con el que se va a comunicar, como se muestra en la Figura 98.

Figura 98

Creación de un nuevo proyecto en el software de diseño del HMI



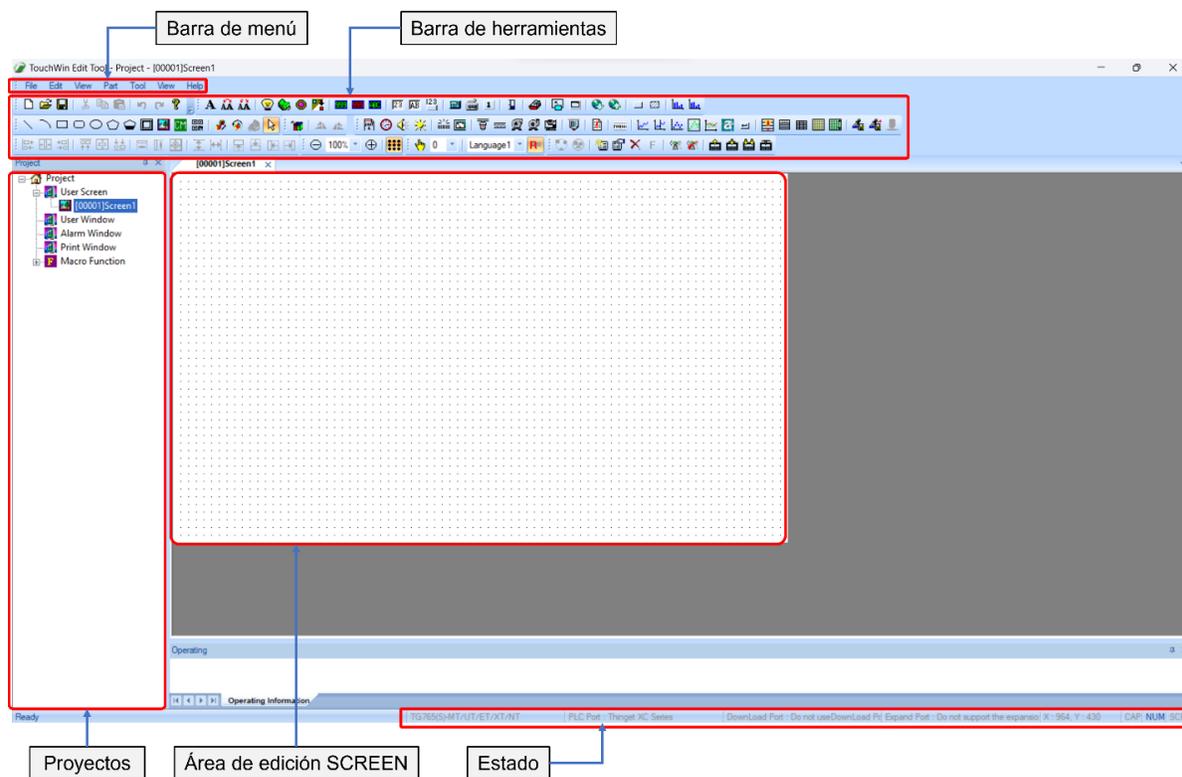
Nota. Selección del modelo de la pantalla HMI y modelo del PLC.

Una vez finalizado el proceso anterior, se presenta el entorno de trabajo del software, como se indica en la Figura 99, en el cual se encuentran todas las herramientas necesarias

para el desarrollo de la interfaz de usuario, las mismas que se detallan a profundidad en el Anexo 20 y en los trabajos de titulación de Arias y Toapanta (2013); también en el trabajo de Gallo y Saá (2013), a partir de las páginas 145 y 146, respectivamente.

Figura 99

Entorno de trabajo del software de diseño del HMI



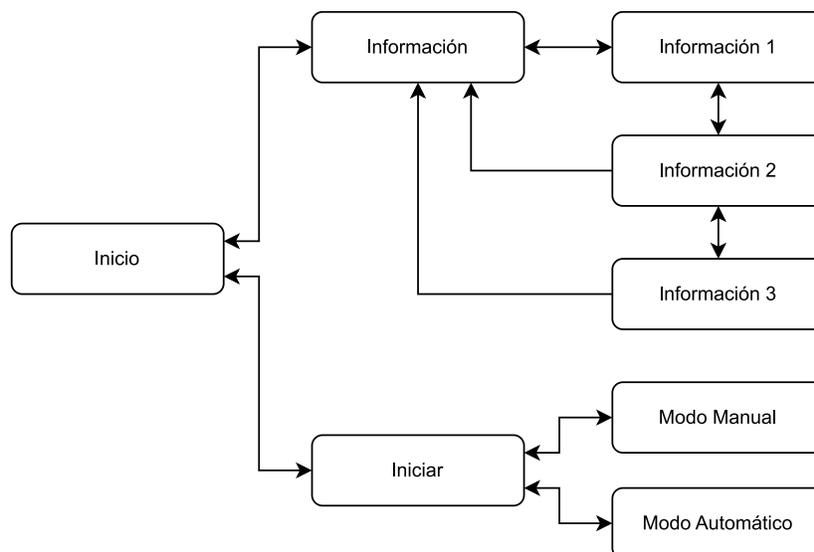
Nota. Disposición de las herramientas y opciones disponibles del software de diseño del HMI.

Diseño de las Ventanas de la Interfaz Visual

Con el uso de las herramientas y opciones de la Figura 99 se procede a realizar la interfaz de comunicación que cuenta con 12 ventanas, 4 de operación, 3 de información de uso y 5 de advertencia. Su disposición se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 100. Además, en la Figura 101 se muestra las ventanas de interacción y operación del HMI, mientras que la Figura 102 indica las ventanas de información y uso de los modos de operación.

Figura 100

Diagrama de flujo de la interfaz de comunicación



Nota. Navegación entre ventanas del HMI.

Figura 101

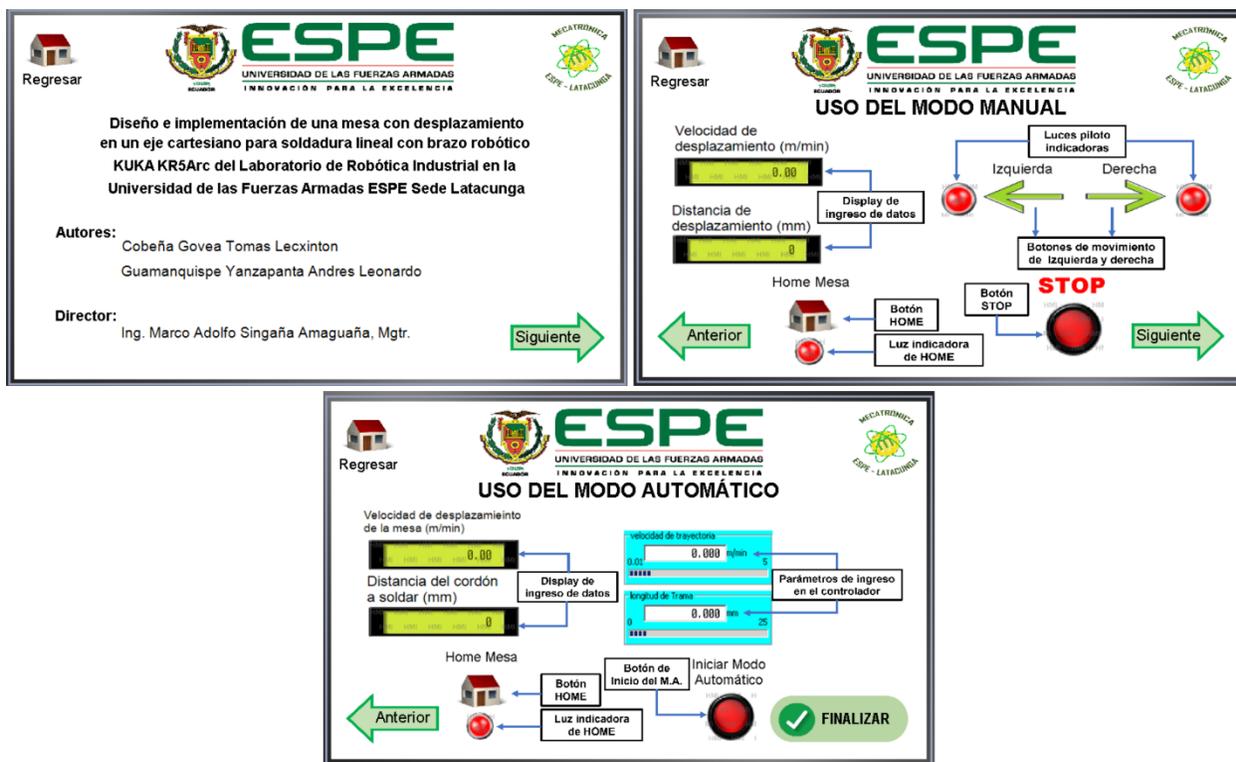
Ventanas de operación del HMI



Nota. a) Ventana de inicio, b) Ventana de selección de modo de trabajo, c) Ventana del modo manual, d) Ventana del modo automático.

Figura 102

Ventanas de información del HMI



Nota. Las ventanas de información detallan el uso del modo manual y modo automático.

Las ventanas de advertencia y precaución juegan un papel fundamental en la prevención de accidentes y operación de la mesa lineal ya que ponen en alerta al operario sobre posibles situaciones de peligro, la Figura 103 muestra las ventanas de advertencia y precaución implementadas en el HMI.

Una vez desarrollado la interfaz visual de comunicación se procede con la configuración de comunicación entre la mesa y el brazo robótico, finalizando con la implementación y configuración del sistema mecatrónico.

Figura 103

Ventanas de advertencia y precaución



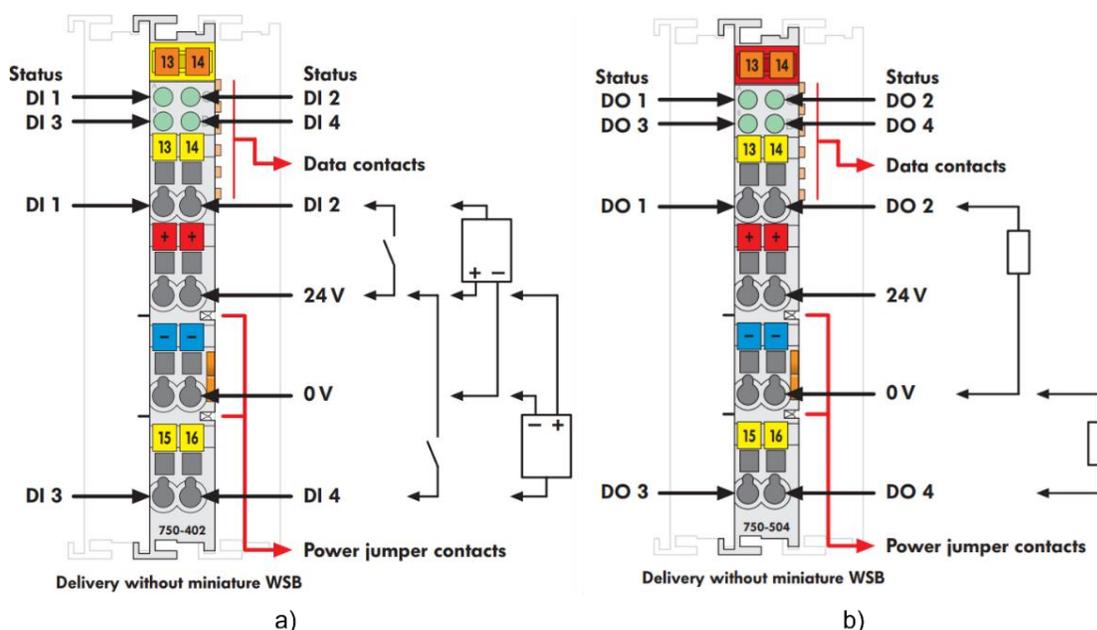
Nota. Estas ventanas aparecen previo a la ejecución de alguna actividad que pueda generar peligro para el operario o la máquina.

Configuración de Comunicación Mesa-Brazo Robótico

La comunicación entre la mesa lineal y el brazo robótico se realiza mediante el uso de las entradas y salidas digitales del módulo WAGO, como el que se muestra en la Figura 104. Las mismas que se activan mediante el uso de relés encapsulados y diodos rectificadores, el esquema de conexión de este circuito se encuentra en el Anexo 17.

Figura 104

Conexión del módulo WAGO de entradas y salidas digitales

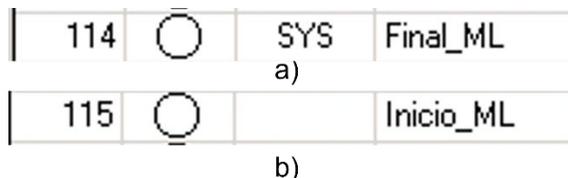


Nota. a) Módulo de entradas, b) Módulo de salidas. Más detalles del módulo se encuentra en el Anexo 21 y Anexo 22, respectivamente.

En el proceso de la aplicación de soldadura, la salida digital activa el movimiento de la mesa, siempre y cuando el brazo se encuentre en la posición lista para soldar, una vez terminado el proceso de soldadura, la mesa envía una señal de retorno a la entrada digital del módulo. Para el desarrollo del trabajo se utiliza la salida digital 115 y la entrada digital 114 del módulo WAGO en la unidad de control del robot, como se ilustra en la Figura 105.

Figura 105

Entrada y salida utilizadas del módulo WAGO



Nota. a) Entrada digital “114”, b) Salida digital “115”.

Implementación y Configuración del Sistema Mecatrónico

Como se menciona en el apartado previo, la entrada y salida de la Figura 105 son fundamentales, ya que éstas son las encargadas de ejecutar la sincronización entre la mesa lineal y el robot durante el proceso de soldadura. Dicha sincronización se explica con más detalle a continuación:

Sincronización Mesa –Brazo Robótico

La finalidad del presente trabajo es realizar cordones de soldadura lineal mediante la implementación de la mesa descrita en el capítulo previo, en la cual el material se mueve de manera lineal, mientras que, la antorcha de soldadura se mantiene fija con el arco encendido.

Sin embargo, el software instalado en la unidad de control del robot que permite realizar soldadura robotizada no posibilita encender el arco en un punto fijo con las funciones de la Figura 106 disponibles en el software, es decir, se necesita dos puntos con al menos una distancia mínima para encender el arco, el mismo que permanece encendido mientras el robot completa la trayectoria entre los dos puntos establecidos.

Figura 106

Funciones para encendido y apagado del arco



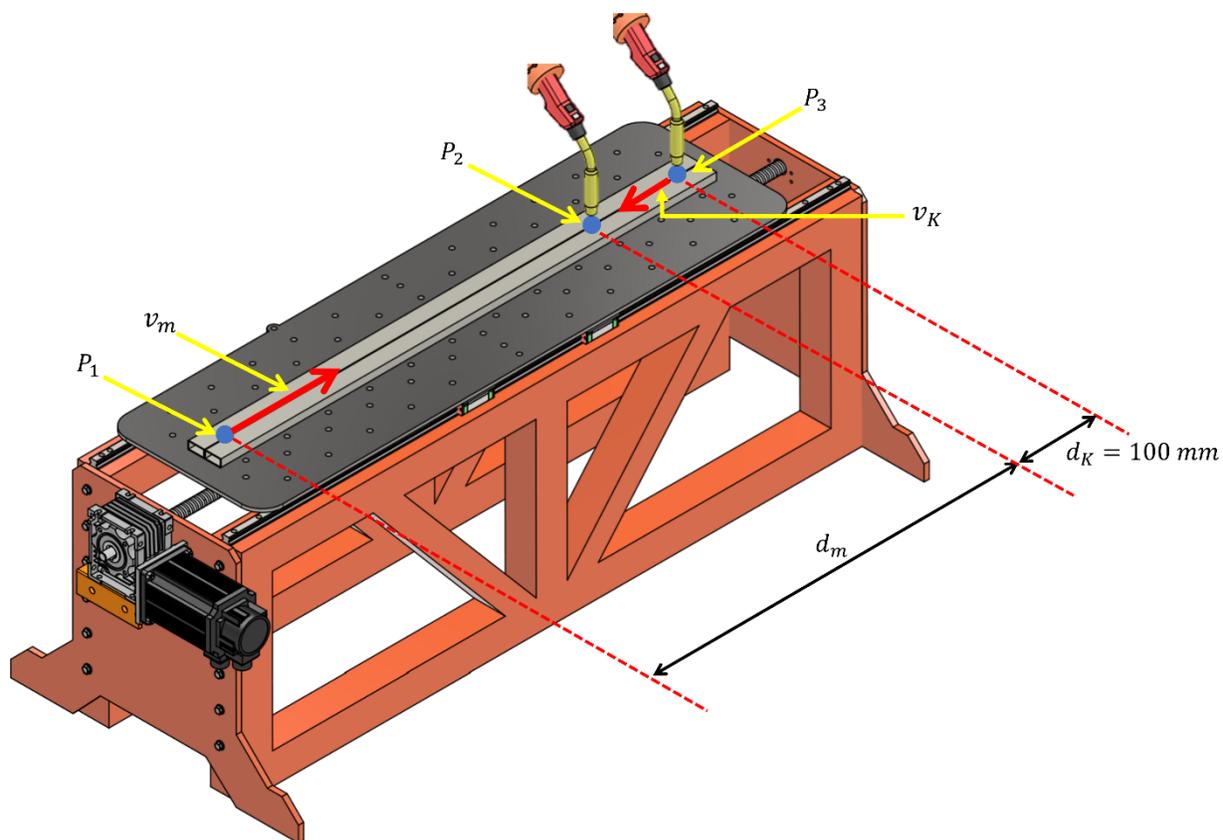
Nota. Funciones disponibles en la opción "Tecnología".

Como solución del problema presentado, se plantea la implementación de los principios básicos del movimiento relativo, específicamente el desplazamiento de dos objetos en sentido opuesto y con velocidades distintas, con la finalidad que tanto la mesa, como la antorcha del robot se desplacen en sentidos opuestos llegando al mismo punto en el mismo instante, pero a velocidades diferentes, esto se explica con más detalle en la Figura 107, donde se representa

la velocidad lineal de la mesa (v_m), velocidad lineal de la antorcha del robot (v_K), desplazamiento de la mesa (d_m), desplazamiento de la antorcha (d_K) con una valor constante de 100 mm, punto de inicio de desplazamiento de la mesa lineal (P_1), punto de inicio de desplazamiento de la antorcha (P_3), punto final de desplazamiento y de encuentro de la mesa lineal y de la antorcha del robot (P_2).

Figura 107

Movimiento relativo entre la mesa lineal y la antorcha del robot



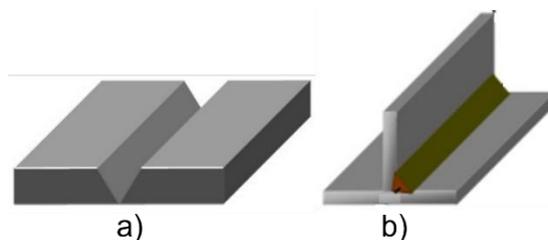
Nota. Parámetros y características para la sincronización Mesa-Brazo Robótico.

En la Figura 107 se realiza el análisis de movimiento relativo entre la mesa lineal y la antorcha del robot, en el cual, la antorcha que parte del punto (P_3) y la mesa lineal que parte del punto (P_1) deben llegar al punto (P_2) en el mismo instante para que exista la sincronización mesa-brazo robótico mediante la activación de entradas y salidas digitales del módulo WAGO.

Para el presente trabajo se establece la velocidad de la mesa para la posición de soldadura 1G a $v_m = 0,4 \text{ m/min}$, mientras que para posición de soldadura 2F a $v_m = 0,16 \text{ m/min}$, dichas posiciones se muestran en la Figura 108.

Figura 108

Posiciones de soldadura



Nota. a) Posición 1G, b) Posición 2F.

La sincronización entre la mesa lineal y el brazo robótico se realiza mediante la variación de la velocidad de la mesa y el brazo, para calcular la velocidad que debe tener el brazo se aplica la Ecuación 30, obtenida del análisis de movimiento relativo de la Figura 107.

$$v_K = \frac{v_m \cdot d_K}{d_m} \quad \text{Ecuación 30}$$

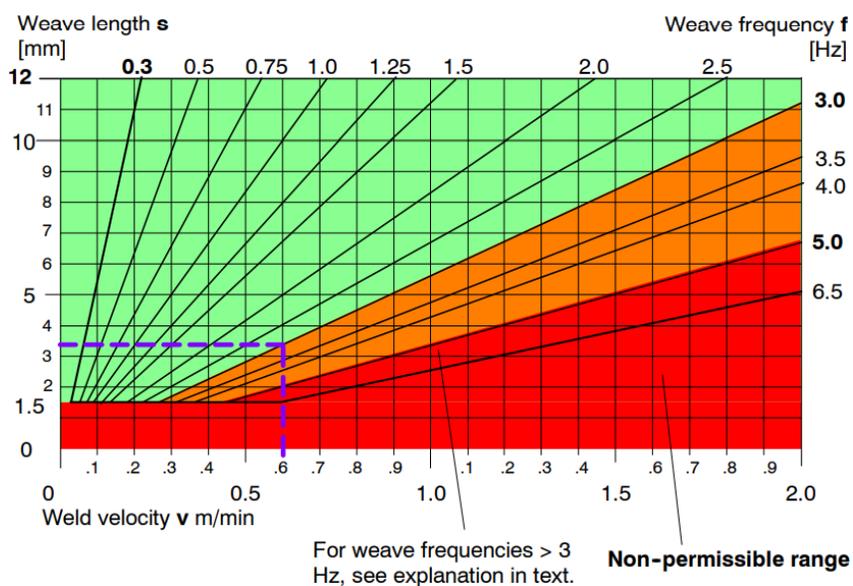
La Ecuación 30 se determina igualando los tiempos de desplazamiento de la mesa lineal y la antorcha del brazo. Además, mediante la Ecuación 31 se calcula la longitud de trama (l_{tr}), uno de los parámetros fundamentales para un cordón de soldadura adecuado.

$$l_{tr} = \frac{(v_m + v_K) \cdot 1000}{F \times 60} \quad \text{Ecuación 31}$$

La longitud de trama también está relacionada con la velocidad de soldadura, para este caso la suma de la velocidad de la mesa lineal y del brazo ($v_m + v_K$), y la frecuencia de movimiento del robot (F). Según el manual del software de soldadura de KUKA (Anexo 23) instalado en el controlador, la frecuencia es un aspecto crucial para el correcto funcionamiento del robot, el mismo que debe ser menor a 3 Hz. En el nomograma de la Figura 109 se aprecia con más detalle la relación entre la velocidad de soldadura, longitud de trama y frecuencia.

Figura 109

Nomograma de frecuencia – longitud de trama – velocidad de soldadura

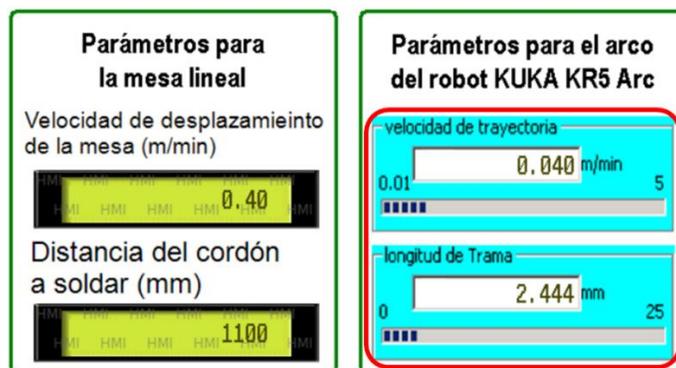


Nota. Los cálculos de la longitud de trama y la velocidad de soldadura deben estar en la zona verde para que el robot trabaje de manera segura. Tomado de (KUKA, 2005).

Para facilidad del operador, los parámetros de la Ecuación 30 y Ecuación 31 que se debe ingresar en el controlador del brazo, se calculan en la ventana de “Modo Automático” del HMI, como se muestra en la Figura 110.

Figura 110

Parámetros de longitud de trama y velocidad de trayectoria calculados



Nota. Los parámetros calculados tienen como valor de frecuencia 3 Hz para evitar entrar en la zona no permisible de la Figura 109.

Programación en el Controlador KR C2

En la Figura 111 se muestra la programación del brazo robótico implementada para el trabajo sincrónico del brazo con la mesa lineal. El recuadro 1 son líneas de código para ubicar al brazo en un punto de seguridad, posteriormente en un punto de aproximación al punto de inicio de la soldadura y se finaliza con la ubicación del robot en la posición lista para iniciar la soldadura. El recuadro 2 indica la activación de la salida digital del módulo WAGO para que la mesa lineal inicie el desplazamiento previamente ingresado en el HMI.

Figura 111

Programación del brazo robótico con la mesa lineal

```

1  DEF sol_ml( )
2  INI
3
4  PTP HOME Vel=50 % DEFAULT
5
6  PTP P1 Vel=30 % PDAT1 Tool[16]:TORCHA RA400 Base[8]:tesis_ext
7  PTP P2 Vel=30 % PDAT2 Tool[16]:TORCHA RA400 Base[8]:tesis_ext ← 1
8  LIN P3 Vel=0.3 m/s CPDAT5 Tool[16]:TORCHA RA400 Base[8]:tesis
9
10 WAIT Time=0.05 sec
11 OUT 115 'Inicio_ML' State=TRUE ← 2
12 WAIT Time=0.05 sec
13 OUT 115 'Inicio_ML' State=FALSE
14
15 LIN P4 Vel= 0.3 m/s CPDAT6 ARC_ON Pgeno= 4 S1 Seam1 Tool[16]: ← 3
16 LIN P5 CPDAT7 ARC_OFF Pgeno= 4 E1 Seam1 Tool[16]:TORCHA RA400
17
18 WAIT FOR ( IN 114 'Final_ML' ) ← 4
19
20 LIN P6 Vel=0.3 m/s CPDAT8 Tool[16]:TORCHA RA400 Base[8]:tesis
21 PTP P7 Vel=30 % PDAT3 Tool[16]:TORCHA RA400 Base[8]:tesis_ext ← 5
22
23 PTP HOME Vel=50 % DEFAULT

```

Nota. Una explicación más detallada de la programación se encuentra en el manual de la mesa lineal (Anexo 24).

Debido a la activación rápida de la salida digital “115”, el código del recuadro 3 se ejecuta al instante, este código es el encendido y apagado del arco durante el desplazamiento del robot de 100 mm como se explicó en la Figura 107, para que este desplazamiento se

sincronice con el desplazamiento de la mesa, se deben ingresar los parámetros calculados de manera automática en la ventana del HMI de la Figura 110, dichos datos se debe ingresar en las opciones de la instrucción “ARC OFF” como se muestra en la Figura 112.

Si los parámetros se ingresan de manera correcta, tanto el robot como la mesa terminan de desplazar sus respectivas distancias al mismo instante, con lo cual se activa la señal de entrada “114” del módulo WAGO del recuadro 4 que representa el final del desplazamiento de la mesa, el robot realiza las instrucciones del recuadro 5 que no son más que el desplazamiento a un punto de seguridad y su retorno a HOME.

Figura 112

Parámetros de soldadura en la instrucción ARC OFF

Ajuste de Soldadura	1/2	Trama mecánica (weaving)	2/2
velocidad de trayectoria <input type="text" value="0.04"/> m/min 0.01 5	longitud de Trama <input type="text" value="2.44"/> mm 0 25		
Tiempo de Crater <input type="text" value="0.015"/> sec 0 2	Amplitud de trama (cero - pico) <input type="text" value="5"/> mm 0 25		
Tipo de trama <input type="text" value="Sin penduleo"/>	Angulo de trama <input type="text" value="0"/> Grados -180 180		

Nota. Parámetros calculados de manera automática en el HMI ingresados en controlador.

Si los parámetros ingresados en la Figura 112 son los mismos de la Figura 110 el proceso termina de manera exitosa, caso contrario, es posible que el robot apague el arco antes de completar la distancia establecida o que se complete la distancia y el robot siga con el arco encendido generando una acumulación de material de aporte. Esto se analiza en el siguiente capítulo mediante las respectivas pruebas de funcionamiento.

Capítulo V

Pruebas y Análisis de Resultados

Pruebas de Funcionamiento Parciales

En esta sección se analiza las pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos que conforman la mesa lineal para soldadura con brazo robótico.

Para la primera prueba se verifica el control de la velocidad y el desplazamiento mediante diferentes parámetros para comprobar la exactitud del sistema.

Pruebas de Velocidad

En la Tabla 10, se observa las mediciones realizadas con ayuda del encoder incremental, por medio del servo controlador se visualiza las rpm las cuales se transforman a unidades de desplazamiento lineal mediante la Ecuación 23, utilizando un desplazamiento constante de 100 mm con un sentido de giro antihorario a diferentes velocidades.

Tabla 10

Datos del encoder para obtener velocidades, en sentido antihorario.

Prueba	Velocidad ingresada (m/min)	Velocidad medida (m/min)	RPM ingresado	RPM medido	Error (%)
1	0,1	0,101	600	604	0,66
2	0,15	0,151	900	907	0,77
3	0,2	0,203	1200	1218	1,5
4	0,25	0,253	1500	1517	1,13
5	0,3	0,302	1800	1814	0,77
6	0,35	0,354	2100	2124	1,13
7	0,4	0,399	2400	2394	0,25

Nota. Se realizan 7 pruebas para obtener resultados más precisos.

Como resultado se observa que el porcentaje de error máximo para el desplazamiento es del 1,14% el cual se debe a la eficiencia mecánica del reductor de velocidad.

De la misma manera se realiza pruebas con los mismos valores, en esta ocasión se considera un sentido de giro horario, estos datos están representados en la Tabla 11.

Tabla 11

Datos del encoder para obtener velocidades, en sentido horario.

Prueba	Velocidad ingresada(m/min)	Velocidad medida(m/min)	RPM ingresado	RPM medido	Error (%)
1	0,1	0,101	600	604	0,66
2	0,15	0,151	900	907	0,77
3	0,2	0,203	1200	1218	1,5
4	0,25	0,253	1500	1517	1,13
5	0,3	0,302	1800	1814	0,77
6	0,35	0,354	2100	2124	1,13
7	0,4	0,399	2400	2394	0,25

Nota. Se realizan 7 pruebas para obtener resultados más precisos en sentido horario.

Se observa que el porcentaje de error se mantiene con respecto a las pruebas de la tabla anterior, siendo éste un error sistemático.

Pruebas de Desplazamiento

Para las pruebas de desplazamiento se considera una velocidad de 0,4 m/min la cual es la velocidad máxima de operación de la mesa.

Se visualiza un desplazamiento ingresado desde los 300 mm, posteriormente se va incrementando gradualmente hasta llegar al desplazamiento de 1100 mm, como se observa en la Tabla 12, a mayor longitud desplazada, menor es el error que va generando, este parámetro es muy válido para la aplicación de este proyecto debido a que la mesa lineal está diseñada para soldaduras de larga longitud.

Tabla 12

Desplazamiento gradual desde 300 hasta 1100 mm, sentido horario

Prueba	Desplazamiento ingresado (mm)	Desplazamiento medido (mm)	Error (%)
1	300	301	0,33
2	400	399	0,25
3	500	499	0,20
4	600	601	0,17
5	700	701	0,14
6	800	801	0,13
7	900	900	0,00
8	1000	1001	0,10
9	1100	1099	0,09

Nota. Se detalla la diferencia entre desplazamiento ingresado y obtenido.

De la misma manera se realiza pruebas de desplazamiento para el sentido antihorario considerando los mismos parámetros de velocidad y desplazamiento, véase la Tabla 13.

Tabla 13

Desplazamiento gradual desde 300 hasta 1100 mm, sentido antihorario

PRUEBA	Desplazamiento ingresado(mm)	Desplazamiento medido(mm)	Error (%)
1	300	301	0,33
2	400	399	0,25
3	500	499	0,20
4	600	601	0,17
5	700	701	0,14
6	800	801	0,13
7	900	900	0,00
8	1000	1001	0,10
9	1100	1099	0,09

Nota. Se detalla la diferencia entre desplazamiento ingresado y obtenido.

Como se observa el valor máximo de error es de 0.33%, en este caso se mantienen los parámetros de diseño establecidos en el Capítulo III, con un error no mayor a 1 mm.

Pruebas de Funcionamiento de Sincronización Mesa-Brazo Robótico

En las pruebas de sincronización se toma en cuenta la señal de activación que envía el brazo robótico, para iniciar el desplazamiento de la mesa, y a su vez se considera la señal que envía la mesa cuando cumple la distancia establecida por el usuario.

Debido a que el brazo robótico no puede encender el arco sin tener dos puntos de desplazamiento se considera la relación de velocidades explicada en el Capítulo IV, para lo cual el brazo y la mesa deben recorrer distancias distintas en el mismo tiempo, para mantener el arco encendido en una trayectoria lineal, donde la longitud es igual a la suma del desplazamiento del brazo robótico y la mesa lineal; para mayor información revisar el anexo 23.

Se realiza pruebas considerando la velocidad de trabajo de la mesa a 0,4 m/min y el desplazamiento del brazo robótico de 100 mm siendo estos valores constantes, a su vez se consideran los parámetros calculados para el brazo robótico, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14

Pruebas de desplazamiento entre mesa y brazo robótico

Prueba	Velocidad Brazo Robótico (m/min)	Distancia ingresada (mm)	Señal Inicio_ML	Señal Final_ML
1	0,2	300	SI	SI
2	0,133	400	SI	SI
3	0,1	500	SI	SI
4	0,08	600	SI	SI
5	0,066	700	SI	SI
6	0,057	800	SI	SI
7	0,005	900	SI	SI
8	0,044	1000	SI	SI
9	0,04	1100	SI	SI

Nota. Se puede observar una comunicación exitosa y acorde.

Se observa que la sincronización fue correcta al realizar 25 veces cada prueba con las velocidades calculadas, esto permite realizar las pruebas de soldadura utilizando el sistema mecatrónico completo.

Pruebas Totales

Para las pruebas totales se realiza una selección previa del material a utilizar para la calibración de los parámetros de soldadura del controlador TransPuls Synergic 4000, el cual permite modificar distintas variables en base al espesor del material, diámetro del hilo, corriente, voltaje, velocidad de alimentación de hilo de aporte, entre otras.

Se utiliza un tubo rectangular de acero ASTM A36 de 40x20x2 mm para iniciar con la calibración de parámetros; donde se procede a colocar el elemento en el centro de la mesa y asegurar con el mecanismo elegido en el Capítulo III, verificando que esté correctamente alineada lo cual se explica de mejor manera en el manual de uso en el Anexo 24 en sus extremos con el centro de la mesa, como se observa en la Figura 113.

Figura 113

Alineación del acero rectangular para su posterior soldadura



Nota. Operador revisando la alineación del material.

Una vez que se comprueba que el material está alineado se procede a asignar los parámetros para lo cual se tiene distintas distancias y valores hasta lograr un cordón

visualmente aceptable, considerando los diferentes tipos de transferencias de metal que proporciona la soldadura MIG.

Se considera los parámetros de la Tabla 15 para las diferentes pruebas.

Tabla 15

Valores de calibración para el controlador Fronius

Prueba	Longitud de cordón (mm)	Longitud de trama (mm)	Velocidad de alimentación de hilo (m/min)	Corriente (A)	Voltaje (V)
1	300	3,33	2.5	60	10
2	300	3,33	4	90	11.5
3	300	3,33	3	98	16
4	300	3,33	3,3	100	17
5	300	3,33	3,9	111	17,9

Nota Parámetros utilizados para realizar las pruebas de calibración del controlador Fronius.

Análisis de Resultados

Como se observa en la Figura 114, la uniformidad en el cordón es notable, a su vez posee un fino espesor debido a la velocidad de alimentación del material de aporte, sin embargo, al ser una corriente de 60 A visualmente se aprecia baja penetración y una desviación en la dirección del cordón, esto es consecuencia de la baja intensidad y tensión al momento de realizar la suelda, de la misma manera se produce contaminación al momento de generar el arco; otro de los aspectos que se puede apreciar es una disminución en el brillo en la terminación del cordón, tornándose un tono opaco, ocasionado por la porosidad generada en la superficie.

Figura 114*Prueba de soldadura número 1*

Nota. Cordón de soldadura realizado a 60 A.

En la Figura 115, se procede a aumentar la velocidad a un valor de 4 m/min de alimentación del material de aporte, donde el grosor del cordón aumenta considerablemente respecto a la prueba anterior, y al tener una corriente de 90 A la penetración mejora, pero al no ser los parámetros óptimos se observan proyecciones o gotas de material de aporte, de la misma forma, visualmente es notable el aumento de la temperatura en el material.

Figura 115*Prueba de soldadura número 2*

Nota. Cordón de soldadura realizado a 90 A, con parámetros erróneos.

En la Figura 116, se observa que con una tensión de 16 V y una corriente de 98 A la deposición de material es continua, por lo tanto, la transferencia de metal se realiza por spray, el ancho del cordón es constante en casi todo el trayecto, pero, de igual forma es notable la aparición de proyecciones alrededor del cordón.

En el tramo final debido al aumento de la temperatura se puede visualizar una mayor penetración, sin embargo, también se observa deformidad, esto indica que el baño de soldadura no fue uniforme.

Figura 116*Prueba de soldadura número 3*

Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 16 V y una corriente de 98 A.

En la Figura 117, para un valor de tensión de 17 V y una corriente de 100 A se observa un ancho de cordón mayor, sin embargo, también existe la presencia de socavaciones debido a sobrecalentamiento de la pieza, por lo tanto, se aprecia un color café rojizo en los bordes del cordón, de la misma manera visualmente se aprecia un espesor constante y una penetración considerable por lo tanto el arco y la transferencia del metal son más estables.

Figura 117*Prueba de soldadura número 4*

Nota. Cordón de soldadura con bordes rojizos realizado con una tensión de 17 V y una corriente de 100 A.

En la Figura 118, se observa un cordón uniforme, con ausencia de proyecciones en la mayor parte de la trayectoria, una penetración visualmente aceptable considerando el espesor del cordón, con una corriente de 111 A y una tensión de 17,9 V, se analiza una transferencia de metal en spray.

Figura 118*Prueba de soldadura número 5*

Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y una corriente de 111 A.

Paso seguido se procede a realizar las pruebas de unión de dos piezas en tramos mayores a 300 mm.

Aplicación de Soldadura Lineal en Posición 1G

Con el objetivo de comprobar la aplicación de soldadura lineal en tramos mayores a 30 cm, se realizan probetas preparando dos tubos cuadrados unidos entre sí por puntos de soldadura a una distancia no mayor a 20 veces su espesor, con la finalidad de asegurar que la separación entre la junta no sea mayor a la mitad del espesor del material de aporte.

Una vez que se realiza este proceso, utilizando los parámetros obtenidos en las pruebas de calibración y las velocidades calculadas en el Capítulo IV, se configuran los siguientes parámetros:

- Velocidad de la mesa lineal constante 0,4 m/min
- Amperaje de controlador Fronius 111 A
- Tensión de controlador Fronius 17,9 V
- Velocidad de alimentación del material de aporte 3,9 m/min

Dentro de los parámetros utilizados para las pruebas de aplicación, véase la Tabla 16, referencial de datos, se realizan pruebas posteriores para comprobar que sean los correctos para aplicaciones de soldadura lineal.

Tabla 16

Datos de aplicación de soldadura lineal en la posición 1G

Prueba	Longitud de cordón (mm)	Longitud de trama (mm)	Velocidad de desplazamiento del brazo robótico (m/min)
1	1000	2,4689	0,0440
2	1100	2,442	0,0400
3	1100	2,442	0,0400
4	1100	2,442	0,0400

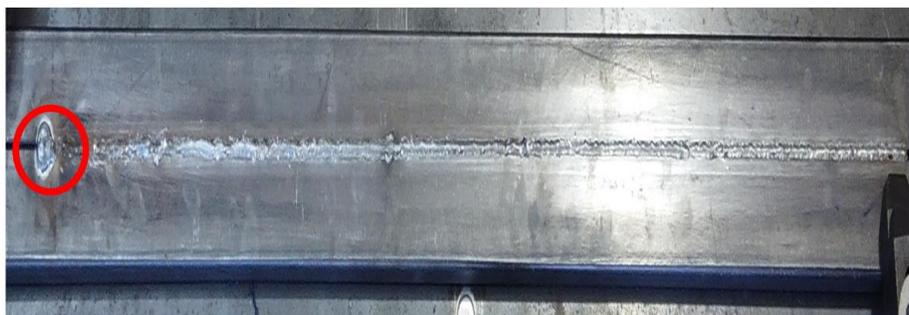
Nota Parámetros utilizados para realizar las pruebas de aplicación.

Análisis de Resultados

En la Figura 119, debido a un error en el ingreso de valores de velocidad de desplazamiento del robot de 0,044 m/min como se indica en la prueba 1 de la Tabla 16, se observa que hubo un fallo en la sincronización, ya que la mesa no envió la señal de activación al módulo WAGO, por lo tanto en la parte izquierda es evidente una acumulación y un sobrecalentamiento en el material, de la misma manera se analiza que al ser una velocidad menor a la calculada, el espesor y uniformidad del cordón no son constantes en todo el trayecto.

Figura 119

Aplicación de soldadura número 1, en la posición 1G



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y un corriente de 111 A.

En la Figura 120, se presenta un cordón uniforme, con un brillo superficial que indica ausencia de porosidad, de la misma forma se puede observar un calentamiento bajo en los bordes del cordón de soldadura, y un espesor constante en todo el trayecto, visualmente se puede apreciar una fusión correcta entre el material de aporte y la pieza de trabajo, lo que podría dar paso a un análisis más detallado para realizar comprobaciones más certeras.

Figura 120

Aplicación de soldadura número 2, en la posición 1G



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y una corriente de 111 A.

En la Figura 121, se analiza un cordón realizado con los mismos parámetros de la prueba número 2, para comprobar que la sincronización de velocidades y la calibración de la controladora Fronius fue correcta, obteniendo resultados óptimos, donde se puede apreciar, uniformidad de cordón de soldadura, acabado brillante, además, no se presenta exceso de calor en los bordes de la junta.

Figura 121

Aplicación de soldadura número 3, en la posición 1G



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y una corriente de 111 A.

En la Figura 122, se observa un cordón realizado utilizando los mismos parámetros de la prueba número 2 y número 3, para corroborar que los resultados sean óptimos, a diferencia que en este caso para el material se mantiene el espesor de chapa de 2 mm, sin embargo, ahora se aplica en un tubo cuadrado de 40x40 mm, para lo cual se observa uniformidad del cordón y un espesor constante, la penetración a simple inspección visual es aceptable, no se observa presencia de sobrecalentamiento en los bordes de la junta.

Figura 122

Aplicación de soldadura número 4, en la posición 1G



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y corriente de 111 A.

Pruebas de Calibración de Soldadura lineal en Posición 2F

Se realiza las pruebas de soldadura en la posición 2F o junta en T con los siguientes parámetros utilizados para las pruebas de aplicación:

- Velocidad de la mesa lineal constante 0,4 m/min
- Amperaje de controlador Fronius 111 A
- Tensión de controlador Fronius 17,9 V
- Velocidad de alimentación del material de aporte 3,9 m/min

De la misma manera, véase la Tabla 17, referencial de datos, se realiza pruebas posteriores, con la finalidad de ir puliendo los resultados obtenidos, para una mejor comprobación de datos.

Tabla 17

Datos de prueba de soldadura lineal en la posición 2F

Prueba	Longitud de cordón (mm)	Longitud de trama (mm)	Velocidad de desplazamiento de brazo robótico (m/min)
1	300	3,33	0,2

Nota Parámetros utilizados para realizar pruebas de calibración del controlador Fronius.

Análisis de Resultados

Como se observa en la Figura 123, utilizando los mismos parámetros de las pruebas óptimas de la posición 1G no se obtienen los mismos resultados, para lo cual se realiza una calibración para obtener un cordón visualmente óptimo en esta posición, a simple vista se observa que el material de aporte no penetra en el material a soldar, esto puede ser ocasionado por baja corriente o a su vez alta velocidad de desplazamiento. Para lo cual se realiza una nueva calibración.

Figura 123

Prueba de soldadura número 1, en la posición 2F



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 17,9 V y corriente de 111 A.

Debido a los resultados de la Figura 123 no cumple con la calidad del cordón esperado, se realizan pruebas para la calibración de parámetros de soldadura.

Calibración de Parámetros para Soldadura Lineal en Posición 2F

Es por esa razón que en la Tabla 18, se presentan los valores a modificar para obtener unos resultados óptimos dentro del análisis esperado.

Tabla 18

Datos de prueba de soldadura lineal en la posición 2F, modificados

Prueba	Longitud de cordón (mm)	Longitud de trama (mm)	Velocidad de alimentación de hilo (m/min)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad total de trayectoria (m/min)
1	100	3,33	2,5	60	10	0,6
2	100	3,33	4	90	11,5	0,3
3	100	3,33	3	77	16	0,16
4	560	1,082	4,3	89	16,7	0,195

Nota Parámetros utilizados para realizar las pruebas de calibración del controlador Fronius.

Análisis de Resultados

En la Figura 124, se observa baja penetración e intermitencia en la distancia del depósito de material, lo que ocasiona que las piezas no se unan, esto es resultado de una alta velocidad de desplazamiento, debido a que, en esta posición el material tiende a caer por la gravedad, por lo cual se debe disminuir el desplazamiento y aumentar la corriente.

Figura 124

Prueba de soldadura número 1, en la posición 2F, modificada



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 10 V y corriente de 60 A.

Con los parámetros corregidos en base a la prueba 1, se observa una mayor penetración, pero, a su vez un sobrecalentamiento en los bordes de la junta, además, se aprecia la aparición de proyecciones y residuos; esto puede ser resultado de contaminación por una longitud de arco excesiva, pero se presentan mejoras respecto a los parámetros modificados de la prueba 1, véase la Figura 125.

Figura 125

Prueba de soldadura número 2, en la posición 2F, modificada



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 11,5 V y una corriente de 90 A.

Finalmente se observa un cordón uniforme respecto a las pruebas anteriores, como se indica en la Figura 126, para lo cual se considera una velocidad de 0,16 m/min, una corriente de 77 A para evitar sobrecalentamientos, de igual manera para realizar la corrección de la longitud del arco, se aumenta el voltaje, con ello se consigue un arco más estable.

Figura 126

Prueba de soldadura número 3, en la posición 2F, modificada

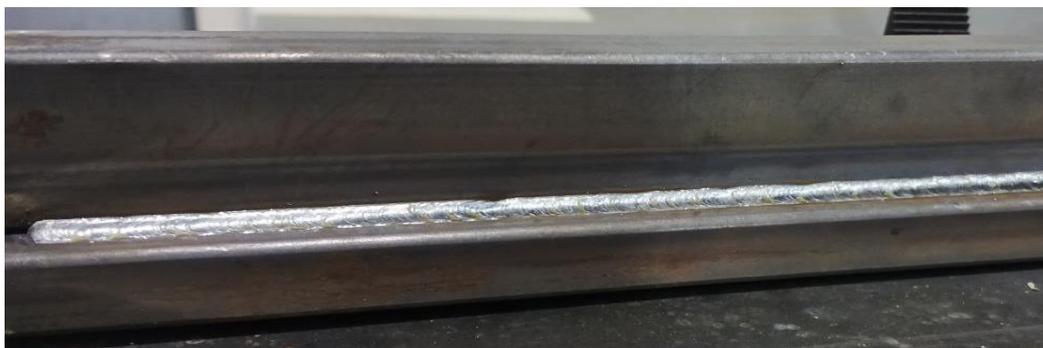


Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 16 V y corriente de 77 A.

Como se observa en la Figura 127, utilizando los parámetros de tensión 16,7 V y 89 A de corriente, se logra obtener un cordón uniforme, sin proyecciones ni presencia de poros, por lo cual se consideran óptimos para la aplicación de soldadura 2F.

Figura 127

Prueba de soldadura número 4, en la posición 2F, modificada



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 16,7 V y un corriente de 89 A.

Aplicación de Parámetros para Soldadura Lineal en Posición 2F

Se realiza las pruebas de soldadura en la posición 2F o junta en T considerando nuevos parámetros indicados en la Tabla 19.

Tabla 19

Datos de aplicación de soldadura lineal en la posición 2F

Prueba	Longitud de cordón (mm)	Longitud de trama (mm)	Velocidad de alimentación de hilo (m/min)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de desplazamiento del brazo robótico (m/min)
1	300	1,33	3,9	89	16,7	0,080
2	300	1,33	3,9	89	16,7	0,080

Nota. Parámetros utilizados para realizar las pruebas de aplicación del controlador Fronius.

Análisis de Resultados

Como se observa en la Figura 128, se aprecia un cordón con un acabado brillante lo que indica ausencia de porosidad en la superficie, a su vez presenta un leve color café rojizo en los bordes de la junta debido a la transferencia de calor, con una corriente de 89 A y 16,8 V se obtienen resultados visuales óptimos.

Figura 128

Aplicación de soldadura número 1, en la posición 2F, optimizada



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 16,7 V y un corriente de 89 A.

Como se observa en la Figura 129, se presenta un espesor continuo utilizando los mismos parámetros de la prueba 1, además, no se presenta proyecciones y penetración continua, una altura de cordón uniforme.

Figura 129

Aplicación de soldadura número 2, en la posición 2F, optimizada



Nota. Cordón de soldadura realizado a una tensión de 16,7 V y un corriente de 89 A.

Validación de la Hipótesis

La hipótesis es validada aplicando el método hipotético-deductivo (H-D), el cual, según Arroyo (2018, p. 75) citando a (Hempel, 1996, p. 40), menciona que “Toda hipótesis [H] implicada por un informe de observación [E] está confirmada por éste”. Por lo tanto, si E implica lógicamente H, entonces E confirma H. Para este proyecto se tiene que:

- H = Mediante el diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano, se podrá realizar soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.
- E = Informe técnico del laboratorio *GSKV Welding Inspection*, con procedimiento GSKV-PRO-PT-01, bajo la norma AWS D1.1, y procedimiento GSKV-PRO-ER-01, bajo la norma AWS D1.3. Más información del laboratorio se encuentra en el siguiente link (<https://fim.epn.edu.ec/index.php/es/departamentos/departamento-de-materiales/laboratorios>)

El método H-D se representa de la siguiente manera:

$$\frac{H}{\frac{I}{O}}$$

[H] representa la hipótesis, [I] las condiciones iniciales y [O] las consecuencias observables. Los valores de la prueba 5, de la Tabla 15, se toman como condiciones iniciales, por lo tanto, el método H-D queda representado de la siguiente manera:

Mediante el diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano, se podrá realizar soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Longitud de trama: 3,33 mm.

velocidad de alimentación de hilo: 3,9 m/min.

Corriente: 111 A.

Voltaje: 17,9 V.

Se observa uniformidad del cordón y un espesor constante, la penetración a simple inspección visual es aceptable.

Para complementar las consecuencias observables [O], se aplica un informe de observación [E], realizado por el Ing. Gabriel Velastegui, inspector CWI - NIVEL II / NDT – ASNT / AWS, mediante la aplicación de pruebas no destructivas y destructivas.

El desarrollo las pruebas y sus resultados se detallan a continuación.

Pruebas No Destructivas

Para este tipo de pruebas se considera la inspección visual VT y prueba de tintas penetrantes PT según la norma AWS D1.1, desarrollada por la Sociedad Americana de Soldadura, la cual aborda los requisitos para la calificación de procedimientos de soldadura, la producción y la inspección de uniones soldadas en estructuras de acero.

En el desarrollo de los ensayos se emplea dos probetas, la probeta A representa el cordón de soldadura mediante el uso de la mesa lineal en posición 1G, mientras que, la probeta B representa el cordón de soldadura en la misma posición, pero sin usar la mesa lineal.

El informe técnico del laboratorio *GSKV Welding Inspection*, con procedimiento GSKV-PRO-PT-01, bajo la norma AWS D1.1 se encuentra en el Anexo 25.

A continuación, en la Figura 130 se muestra la probeta A previo al sometimiento de las pruebas.

Figura 130

Preparación de la probeta A



Nota. Preparación de la probeta a base de solvente SKC-S/MAGNAFLUX. Tomado de (Velastegui, 2023).

En la Figura 131 se observa la aplicación de tintas penetrantes SKL-SP2/MAGNAFLUX.

Figura 131

Aplicación de las tintas penetrantes en la probeta A



Nota. Aplicación de líquidos penetrantes con un tiempo de penetración de 15 minutos.

En la Figura 132 se observa la aplicación del revelador SKD-S2/MAGNAFLUX. Tomado de (Velastegui, 2023).

Figura 132

Aplicación del revelador en la probeta A



Nota. Aplicación del revelador con un tiempo de revelado de 10 minutos. Tomado de (Velastegui, 2023).

A continuación, se muestra el procedimiento y resultados de la probeta B.

En la Figura 133 se muestra la probeta B lista para el sometimiento a las pruebas.

Figura 133

Preparación de probeta B



Nota. Preparación de la probeta a base de solvente SKC-S/MAGNAFLUX. Tomado de (Velastegui, 2023).

En la Figura 134 se observa la aplicación de tintas penetrantes SKL-SP2/MAGNAFLUX.

Figura 134

Aplicación de las tintas penetrantes en la probeta B



Nota. Aplicación de líquidos penetrantes con un tiempo de penetración de 15 minutos.

En la Figura 135 se observa la aplicación del revelador SKD-S2/MAGNAFLUX. Tomado de (Velastegui, 2023).

Figura 135

Aplicación del revelador en la probeta B



Nota. Aplicación del revelador con un tiempo de revelado de 10 minutos. Tomado de (Velastegui, 2023).

Resultados de las Pruebas No Destructivas

Del informe técnico de la probeta A y B. Velastegui (2023) afirma lo siguiente:

En la unión soldada de las Tuberías cuadradas, se realizó la inspección utilizando END (Visual VT y Tintas penetrantes PT). En la Inspección visual presenta buena uniformidad del cordón de soldadura, no presenta porosidades ni fisuras. En la Inspección por Tintas penetrantes presenta Indicaciones redondeadas $\leq 4,8$ mm, por lo que se encuentra dentro de los parámetros del código AWS D1.1. (p. 1)

Dicha afirmación se muestra en la Figura 136 y Figura 137, para la probeta A y probeta B, respectivamente.

Figura 136

Resultados de inspección visual y tintas penetrantes aplicada a la probeta A

IDENTIFICACIÓN:	PROBETA A	CHAPA / ESPECIFICAR:	TUBO CUADRADO	Espesor de pared:	2,0mm
Material:	ACERO ASTM A 36	Plano de referencia:	N/A		
Norma de Aplicación:	AWS D1.1	Procedimiento No.:	GSKV-PRO-PT-01		
Limpiador:	SKC-S / MAGNAFLUX	Tipo:	BASE SOLVENTE	Lote No / Parte.:	01-5750-77
Penetrante:	SKL-SP2 / MAGNAFLUX	Tipo:	2, Metodo A&C	Lote No / Parte.:	01-5155-77
Revelador:	SKD-S2 / MAGNAFLUX	Tipo:	1&2 Metodo A,B,C&D	Lote No / Parte.:	01-5352-77
Observaciones :	En la unión soldada de las Tuberías cuadradas, se realizó la inspección utilizando END (Visual VT y Tintas penetrantes PT) En la Inspección visual presenta buena uniformidad del cordón de soldadura, no presenta porosidades ni fisuras. En la Inspección por Tintas penetrantes presenta Indicaciones redondeadas $\leq 4,8$ mm, por lo que se encuentra dentro de los parámetros del código AWS D1.1.				
Tiempo de secado:	5 min	Tiempo de penetración:	15 min	Remoción:	A base de Solvente
Tiempo de revelado:	10 min	Remoción:	A base de Solvente		
Temperatura de la superficie:	22°C	Intensidad de Luz:	1000 lux	Area de inspección:	Placa / chasis / posterior / izquierda / derecha

Nota. Extracto de informe técnico de la probeta A. Tomado de (Velastegui, 2023).

Figura 137

Resultados de inspección visual y tintas penetrantes aplicada a la probeta B

IDENTIFICACIÓN:	PROBETA B	CHAPA / ESPECIFICAR:	TUBO CUADRADO	Espesor de pared:	2,0mm
Material:	ACERO ASTM A 36	Plano de referencia:	N/A		
Norma de Aplicación:	AWS D1.1	Procedimiento No.:	GSKV-PRO-PT-01		
Limpiador:	SKC-S / MAGNAFLUX	Tipo:	BASE SOLVENTE	Lote No / Parte.:	01-5750-77
Penetrante:	SKL-SP2 / MAGNAFLUX	Tipo:	2, Metodo A&C	Lote No / Parte.:	01-5155-77
Revelador:	SKD-S2 / MAGNAFLUX	Tipo:	1&2 Metodo A,B,C&D	Lote No / Parte.:	01-5352-77
Observaciones :	<p>En la unión soldada de las Tuberías cuadradas, se realizó la inspección utilizando END (Visual VT y Tintas penetrantes PT) En la Inspección visual presenta buena uniformidad del cordón de soldadura, no presenta porosidades ni fisuras. En la Inspección por Tintas penetrantes presenta Indicaciones redondeadas $\leq 4,8$ mm, por lo que se encuentra dentro de los parámetros del código AWS D1.1.</p>				
Tiempo de secado:	5 min	Tiempo de penetración:	15 min	Remoción:	A base de Solvente
Tiempo de revelado:	10 min	Remoción:	A base de Solvente		
Temperatura de la superficie:	22°C	Intensidad de Luz:	1000 lux	Area de inspección:	Placa / chasis / posterior / izquierda / derecha

Nota. Extracto de informe técnico de la probeta B. Tomado de (Velastegui, 2023).

A continuación, se realiza el desarrollo y análisis de las pruebas destructivas.

Pruebas Destructivas

Adicionalmente se realiza pruebas destructivas como un aporte extra para verificar la calidad del cordón de soldadura.

Esta prueba se realiza mediante el ensayo de rotura bajo la norma AWS D1.3, preparando las probetas en cortes refrigerados de 100 mm para evitar que el calor afecte la resistencia del cordón antes de realizar el ensayo destructivo.

En el desarrollo del ensayo se emplea las mismas dos probetas A y B. El informe técnico del laboratorio *GSKV Welding Inspection* con procedimiento GSKV-PRO-ER-01, bajo la norma AWS D1.3 se encuentra en el Anexo 26.

A continuación, en la Figura 138 se muestra el ensayo de rotura de la probeta A.

Figura 138

Ensayo de rotura realizado en la probeta A



Nota. Ensayo de rotura A1 (izquierda), ensayo de rotura A2 (derecha). Tomado de (Velastegui, 2023).

En la Figura 139 se muestra el ensayo de rotura de la probeta A.

Figura 139

Ensayo de rotura realizado en la probeta B



Nota. Ensayo de rotura B1 (izquierda), ensayo de rotura B2 (derecha). Tomado de (Velastegui, 2023).

Resultados de las Pruebas Destructivas

Del informe técnico de la probeta A y B. Velastegui (2023) afirma lo siguiente:

La Falla se produce en la zona afectada por el calor (ZAC). La Falla no se produce en el cordón de soldadura. En la superficie de Fractura no se evidencia porosidades o escoria. (p. 1)

Dicha afirmación se muestra en la Figura 140 y Figura 141, para la probeta A y probeta B, respectivamente.

Figura 140

Resultado del ensayo de rotura realizado en la probeta A

No.	IDENTIFICACION	INTERPRETACIÓN		LG / Ø. (in)	TIPO DE ENSAYO	OBSERVACIONES
		ACEPTADA	RECHAZADA			
1	ROTURA A1	X		100 X 2mm	ENSAYO DE ROTURA	La Falla se produce en la zona afectada por el calor (ZAC) La Falla se no se produce en el cordón de soldadura. En la superficie de Fractura no se evidencia porosidades o escoria .
2	ROTURA A2	X		100 X 2mm	ENSAYO DE ROTURA	La Falla se produce en la zona afectada por el calor (ZAC) La Falla se no se produce en el cordón de soldadura. En la superficie de Fractura no se evidencia porosidades o escoria .

Nota. Extracto del informe técnico de rotura de la probeta A. Tomado de (Velasategui, 2023).

Figura 141

Resultado del ensayo de rotura realizado en la probeta B

No.	IDENTIFICACION	INTERPRETACIÓN		LG / Ø. (in)	TIPO DE ENSAYO	OBSERVACIONES
		ACEPTADA	RECHAZADA			
1	ROTURA B1	X		100 X 2mm	ENSAYO DE ROTURA	La Falla se produce en la zona afectada por el calor (ZAC) La Falla se no se produce en el cordón de soldadura. En la superficie de Fractura no se evidencia porosidades o escoria .
2	ROTURA B2	X		100 X 2mm	ENSAYO DE ROTURA	La Falla se produce en la zona afectada por el calor (ZAC) La Falla se no se produce en el cordón de soldadura. En la superficie de Fractura no se evidencia porosidades o escoria .

Nota. Extracto del informe técnico de rotura de la probeta B. Tomado de (Velasategui, 2023).

Los resultados del informe de observación [E], realizado por el Ing. Gabriel Velastegui, inspector CWI - NIVEL II / NDT – ASNT / AWS, complementan las consecuencias observables [O], por lo tanto, se valida la hipótesis [H] planteada como “Mediante el diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano, se podrá realizar soldadura lineal con brazo robótico KUKA KR5Arc del Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga”.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El diseño e implementación de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano permitió realizar cordones de soldadura lineal de manera exitosa, mediante el uso del brazo robótico KUKA KR5Arc y accesorios del Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Se estableció que los parámetros de soldadura idóneos para la posición 1G con sus ángulos de posición de la antorcha respectivos (70 grados de arrastre y 90 grados de empuje), son de 111 A y 17,9 V, considerando un espesor de material de 2 mm de un tubo de 40x40 mm, una velocidad de alimentación de material de aporte de 3,9 m/min, valores que demuestran una penetración óptima y segura una alta resistencia del cordón. Definiendo un rango de velocidad de trayectoria (velocidad de la mesa sumada la velocidad del brazo robótico) apropiado para cordones de soldadura lineales en posición 1G de 0,4 m/min a 0,6 m/min en función de la aplicación específica.

Los parámetros para la posición 2F considerando al ángulo de avance del material a 45 grados respecto a la junta, son 16,8 V y 89 A, estos valores se establecen considerando un rango de velocidad de trayectoria (velocidad de la mesa sumada la velocidad del brazo robótico) de 0,16 m/min a 0,2 m/min y avance del material de aporte de 4,2 m/min, para un tubo de 40x40 mm de 2 mm de espesor.

Se realizó aplicaciones de soldadura lineal en posiciones 1G y 2F generando resultados validados por evaluadores certificados y conforme a normas internacionales, reafirmando el aporte significativo de la mesa lineal en procesos de soldadura robotizada.

Durante la investigación y desarrollo del estado del arte, específicamente en el área mesas lineales se encontró información escasa, sin embargo, existe incontable información de

tecnologías y sistemas disponibles para soldadura robotizada, particularmente mesas posicionadoras y ejes lineales de desplazamiento para el robot.

En este estudio, se logró con éxito el diseño del sistema mecánico y eléctrico de una mesa con desplazamiento en un eje cartesiano destinada a soldadura lineal a través del uso de software CAD/CAE y la aplicación de normativas nacionales e internacionales, con base en los parámetros de diseño establecidos previamente.

Como resultado del análisis de múltiples hojas técnicas, se identificó los sensores y actuadores que se ajustan de manera óptima a los requisitos del diseño, tomando en consideración su disponibilidad en el mercado nacional para su posterior implementación en el sistema mecánico y eléctrico, complementando la robustez del sistema y la eficiencia del control.

Se desarrolló de manera satisfactoria el diseño del sistema de control para aplicaciones de soldadura con brazo robótico considerando los requisitos de control previamente establecidos, mediante la implementación de una interfaz de comunicación (HMI) que incluye ventanas de operación, información de uso y advertencias; y mediante la programación de movimientos e instrucciones en el PLC se logró el control efectivo de la mesa lineal y el brazo robótico.

La comunicación entre dispositivos se configuró de manera correcta, logrando establecer un intercambio de datos bidireccional entre la mesa lineal y el HMI por medio de finales de carrera y el encoder integrado en el servo motor, de igual manera, se logró la comunicación entre el brazo robótico y la mesa lineal mediante el uso de las entradas y salidas digitales del módulo WAGO y el algoritmo de programación implementado en el PLC, aportando eficiencia y precisión en la interacción de los distintos dispositivos.

Se realizó pruebas individuales de configuración y funcionamiento de la mesa lineal, empleando el modo manual disponible en el HMI, se ejecutaron movimientos con una variedad

de distancias y velocidades, obteniendo un margen máximo de error de 0,33 % en desplazamiento y 1,33 % en velocidad al desplazar la mesa de izquierda a derecha.

Las pruebas de accionamiento de brazo se llevaron a cabo mediante la activación de las entradas y salidas de módulo WAGO de forma manual, estas pruebas proporcionaron una validación esencial de la configuración, demostrando que los dispositivos operan conforme a lo previsto.

Mediante pruebas minuciosas de movimientos, se validó la capacidad de los dispositivos para operar de manera sincronizada con un análisis previo de movimiento relativo entre la mesa lineal y la antorcha de soldadura, se aplicó pruebas no destructivas a los cordones de soldadura realizado con y sin la intervención de la mesa lineal, aportando una perspectiva ampliada de la calidad del proceso, cuyos resultados no solo cumplieron las expectativas, sino que también generaron nuevos puntos de vista y debate en torno al desempeño y potencialidad del sistema mecatrónico.

Aplicando ecuaciones matemáticas fundamentales, se realizó una conversión de los datos de desplazamiento en milímetros y velocidad en metros por minuto proporcionados por el usuario a través de la interfaz del HMI, estos valores han sido ajustados para ser adecuadamente interpretados por el PLC y el controlador de servo motor, donde el desplazamiento se traduce en pulsos y la velocidad en frecuencia.

Recomendaciones

Es aconsejable verificar los parámetros de soldadura del controlador Fronius, teniendo en cuenta el espesor del material a unir en la posición 1G. Esto garantizará la formación de un baño de soldadura adecuado para prevenir porosidades. En particular, una mayor separación en la junta requerirá velocidades y tensiones menores, a fin de controlar la aportación de calor y minimizar potenciales deformaciones en el material.

En el caso de aplicaciones que involucren cordones de soldadura de considerable longitud, se aconseja efectuar una preparación previa del material, esta preparación implica la aplicación de puntos de soldadura acorde a la aplicación, pudiendo ser en los extremos y centro del material a soldar, con la finalidad de prevenir la formación de aberturas en la junta durante el proceso de soldadura.

Es una condición fundamental que los parámetros de velocidad de trayectoria y longitud de trama ingresados en el controlador del brazo robótico sean los valores calculados por el PLC y visualizados en el modo automático de la interfaz de usuario para lograr una sincronización efectiva entre los dispositivos.

Los parámetros recomendados para soldadura en posición 1G son: velocidad de desplazamiento de la mesa 0,4 m/min; corriente 111 A; tensión 17,9 V y velocidad de alimentación del material de aporte 3,9 m/min. La velocidad del brazo debe ser la calculada por el HMI.

Los parámetros recomendados para soldadura en posición 2F son: velocidad de desplazamiento de la mesa 0,16 m/min; corriente 89 A; tensión 16,7 V y velocidad de alimentación del material de aporte 4,2 m/min. La velocidad del brazo debe ser la calculada por el HMI.

Para tener resultados satisfactorios con los parámetros previamente calibrados, se recomienda utilizar aceros corrientes de baja aleación como es el caso del ASTM A36, con espesor de 2 mm, ya que otro tipo de material puede ocasionar resultados no deseados.

Es de vital importancia examinar detenidamente el procedimiento de utilización de los dos modos de trabajo disponibles en la mesa lineal, tal como se detalla en la ventana de información del HMI y el manual correspondiente, con el propósito de prevenir cualquier posible daño a los dispositivos y garantizar la seguridad del operador involucrado.

Durante el proceso de posicionamiento del material a soldar en la mesa lineal, es fundamental lograr una alineación entre el material y la mesa, para prevenir posibles desviaciones durante la ejecución. Se sugiere, además, llevar a cabo pruebas de alineación, en las que se coloque el extremo del material de aporte en el punto central de la junta donde el cordón comenzará, y luego se proceda a desplazar la mesa en modo manual hasta el punto final del cordón, esta acción permite verificar si el cordón culmina en el centro de la junta, caso contrario, se debe rectificar la desviación y repetir la comprobación para garantizar un alineado correcto.

Se recomienda verificar que el material a soldar se encuentre nivelado, para evitar variaciones en la distancia entre la antorcha y la junta del material, dado que éste puede estar pandeado debido a factores externos, como su forma de almacenamiento y transporte.

Para garantizar una sujeción efectiva del material a soldar, se sugiere emplear los puntos de sujeción necesarios mediante el uso de step clamps, los mismos que se deben colocar de manera que no obstaculicen la trayectoria del brazo robótico durante el proceso y evitar cualquier colisión con la antorcha del robot.

Se recomienda realizar la verificación de los ángulos de posicionamiento de la antorcha, tanto para las posiciones 1G como 2F, con el fin de evitar cualquier inestabilidad en la generación del arco voltaico. Esta precaución desempeñará un papel crucial en la reducción de posibles proyecciones y garantizará una fusión homogénea a lo largo de toda la extensión del cordón soldado.

Previo al inicio de la aplicación de soldadura y encender el arco, es esencial llevar a cabo una prueba en vacío para verificar la sincronización precisa entre la mesa lineal y el brazo

robótico, además asegurarse que el extremo del material de aporte se desplace a lo largo del centro de la junta a unir.

Se aconseja llevar a cabo la limpieza superficial de la mesa antes y después de cada trabajo, con el propósito de prolongar la vida útil de la máquina y obtener los resultados esperados. Esto incluye la eliminación de polvo, escoria y proyecciones remanentes de procesos previos, así como la aplicación adecuada de lubricación al husillo de bolas y el reductor de velocidad.

Bibliografía

- Arias Granda, J. S., & Toapanta Lascano, L. D. (2013). *Diseño y construcción de una mesa posicionadora de soldadura en dos ejes para el brazo robótico KUKA KR-5ARC del Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE Extensión Latacunga*. [BachelorThesis, LATACUNGA / ESPE / 2013]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/6863>
- Arroyo, A. G. (2018). La validación de las hipótesis científicas y la filosofía clásica de la ciencia: Entre el justificacionismo y el racionalismo crítico. *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*, 57(147), Article 147.
- Balseca Gordillo, L. E., & Cisneros Quilligana, R. G. (2022). *Diseño e implementación de una célula robotizada demostrativa para el dispensado de cervezas* [BachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/28498>
- Barbecho Barrado, A. (2020). *Diseño de una célula robotizada didáctica* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/331751>
- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA* (Segunda). McGraw-Hill/Interamericana.
- BF México. (2018, diciembre 19). *¿Cuáles son los parámetros de Soldadura que debes regular?* <https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
- Bhatt, P., Malhan, R., Shembekar, A., Yoon, Y. J., & Gupta, S. (2019). Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*, 31, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>
- British Federal México. (2017, junio 14). *Soldadura por Resistencia*. <https://bfmx.com/soldadura/soldadura-por-resistencia/>

- Caggiano, A., Nele, L., Sarno, E., & Teti, R. (2014). 3D Digital Reconfiguration of an Automated Welding System for a Railway Manufacturing Application. *Procedia CIRP*, 25, 39-45.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.008>
- Castro, A. F., Silva, M. F., & Silva, F. J. G. (2017). Designing a Robotic Welding Cell for Bus Body Frame Using a Sustainable Way. *Procedia Manufacturing*, 11, 207-214.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.225>
- CELEC EP. (2020, noviembre 20). *El sistema de metalizado robotizado del CIRT estará operativo para mediados del 2021*.
<https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/694-el-sistema-de-metalizado-robotizado-del-cirt-estara-operativo-para-mediados-del-2021>
- Cobot Trends Staff. (2019, octubre 1). *Zipper tubing uses UR5 cobot to guarantee product quality*. Collaborative Robotics Trends. <https://www.cobottrends.com/zipper-tubing-uses-ur5-cobot-to-guarantee-product-quality/>
- Cook, G. E., Crawford, R., Clark, D. E., & Strauss, A. M. (2004). Robotic friction stir welding. *Industrial Robot: An International Journal*, 31(1), 55-63.
<https://doi.org/10.1108/01439910410512000>
- Danford, M. (2020, agosto 1). *Ventajas de la automatización de máquinas-herramienta atendidas*. <https://www.mms-mexico.com/articulos/la-automatizacion-de-maquinas-herramienta-atendidas-ofrece-ventajas->
- De Máquinas y Herramientas. (2015, mayo 5). *¿Qué tener en cuenta al elegir una soldadora MIG/MAG?* *De Máquinas y Herramientas*.
<https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/elegir-una-soldadora-mig-mag>
- Díaz-Cano, I., Quintana, F. M., Galindo, P. L., & Morgado-Estevez, A. (2021). Calibración ojo a mano de un brazo robótico industrial con cámaras 3D de luz estructurada. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 19(2), Article 2.
<https://doi.org/10.4995/riai.2021.16054>

- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162-180.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
- ewm. (2017, noviembre 17). *EWM GmbH - Schweißgeräte und Zubehör von EWM*. EWM GmbH. <https://www.ewm-group.com/es/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- Expósito Padilla, E. (2018). *Diseño de celda robótica bajo normativa de seguridad en maquinaria*. <https://idus.us.es/handle/11441/85921>
- Fairchild, M. (2021, noviembre 5). *Painting Robots: Benefits, Applications and How to Source Them*. #HowToRobot. <https://howtorobot.com/expert-insight/painting-robots>
- Fanuc. (2016, junio 23). *Smarter material handling*. <https://www.fanuc.eu/bg/en/industrial-applications/automated-material-handling>
- Ferradás, P. G., & Salonitis, K. (2013). Improving Changeover Time: A Tailored SMED Approach for Welding Cells. *Procedia CIRP*, 7, 598-603.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.039>
- Fronius. (2020, abril 5). *¿Qué es la soldadura MIG/MAG?* <https://www.fronius.com/es-es/spain/tecnologia-de-soldadura/el-mundo-de-la-soldadura/soldadura-mig-mag>
- Fronius. (2021, agosto 18). *Fronius TransSynergic 4000 Manual De Instrucciones*. ManualsLib. <https://www.manualslib.es/manual/11647/Fronius-Transsynergic-4000.html>
- Gallo Caiza, V. M., & Saá Tapia, F. D. (2013). *Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-L*. [BachelorThesis, LATACUNGA / ESPE / 2013]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/6788>
- Gayet Del Estal, S. (2023). *Diseño y programación de una celda robotizada de inspección* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/388277>

- Gómez Garcés, F. L. (2017). *Diseño de una estación de soldadura para tubos de cobre mediante la utilización de un robot soldador FANUC 120i para la empresa Inlliyaku* [BachelorThesis, CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS FACULTAD:INGENIERÍA MECATRÓNICA].
<http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/14665>
- GPPH. (2021, febrero 5). *Fabricante de mesas de soldadura*. GPPH | Fabricante de mesas de soldadura. <https://www.gpph.es/>
- Herreros Argentinos. (2018, septiembre 1). *Gases para Soldadura MIG/MAG (GMAW)*.
Herreros Argentinos. <https://herrerosargentinos.com.ar/articulo-38-gases-para-soldadura-mig-mag-gmaw/>
- Ikusi. (2022, junio 28). *Aplicaciones de los robots industriales: ¿conoce todo lo necesario aquí!*
Ikusi. <https://www.ikusi.com/mx/blog/aplicaciones-robots-industriales/>
- International Organization for Standardization. (2007, mayo). *ISO 11161:2007*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/35996.html>
- International Organization for Standardization. (2010, julio). *ISO 12100:2010*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/51528.html>
- International Organization for Standardization. (2011a, julio). *ISO 10218-1:2011*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/51330.html>
- International Organization for Standardization. (2011b, julio). *ISO 10218-2:2011*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/41571.html>
- International Organization for Standardization. (2012, marzo). *Robots and robotic devices—Vocabulary*. <https://www.iso.org/standard/55890.html>
- International Organization for Standardization. (2017, diciembre). *ISO/TR 20218-2:2017*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/70584.html>
- International Organization for Standardization. (2023, abril). *ISO 13849-1:2023*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/73481.html>

- Iñigo Madrigal, R., & Vidal Idiarte, E. (2002). *Robots industriales manipuladores*. Edicions de la UPC, S.L.
- KUKA. (2005). *KUKA.ArcTech Analog—Operation*.
<https://www.scribd.com/document/367202199/Soldadura-Manual-Kuka>
- KUKA. (2017, marzo 3). *KUKA KR C4*. KUKA AG. <https://www.kuka.com/es-mx/productos-servicios/sistemas-de-robot/unidades-de-control-del-robot/kr-c4>
- KUKA AG. (2017, enero 27). KUKA AG. https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/application-software/kuka_equalizingtech
- Makris, S., Michalos, G., & Chryssolouris, G. (2012). RFID driven robotic assembly for random mix manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 359-365.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.10.007>
- MaqMetal. (2021, abril 13). La célula robotizada: Una nueva manera de trabajar. *Maqmetal*.
<https://maqmetal.com/celulas-robotizadas-industria/>
- MetaWelding. (2021, octubre 20). *Mesas de Soldadura*. Web MetaWelding.
<https://www.metawelding.com/mesas-soldadura>
- Metronic Metal. (2021, marzo 29). *UTILLAJE SOLDADURA ROBOT - Plantillas para soldadura robotizada*. Mesas de soldadura. <https://mesasdesoldadura.com/2021/03/29/utillaje-soldadura-robot/>
- Montenegro Alcívar, G. N., & Yaguachi Ríos, M. L. (2020). *Diseño, construcción y control de un prototipo de brazo robótico antropomórfico para la soldadura por punto de diferentes figuras, mediante el uso de cinemática inversa y visión artificial* [BachelorThesis].
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18460>
- Moreno-Uribe, A. M., Romanelli Sales, C. G. A., Ribeiro Menezes, P. H., & Queiroz Bracarense, A. (2020). Estudio de la corriente de transición en GMAW (MIG/MAG). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(3), 528-539. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000300528>

- Moura, F. M., & Silva, M. F. (2018). Application for automatic programming of palletizing robots. *2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, 48-53. <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2018.8374159>
- Murugan, G. (2016, mayo 31). *10 robotic manufacturing systems*.
<https://www.slideshare.net/ganeshmrn/10-robotic-manufacturing-systems>
- Norberto Pires, J., Loureiro, A., Godinho, T., Ferreira, P., Fernando, B., & Morgado, J. (2003). Welding robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 10(2), 45-55.
<https://doi.org/10.1109/MRA.2003.1213616>
- Ollero Baturone, A. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo.
- Owen-Hill, A. (2018, agosto 9). *The Simple Way to Flawless Robot Welding*. RoboDK Blog.
<https://robodk.com/blog/flawless-robot-welding/>
- Reips, J. (2021, marzo 22). *4 Things to Consider Before Automating TIG Welding*.
<https://blog.binzel-abicor.com/4-things-to-consider-before-automating-tig-welding>
- Relucio de la Fuente, R. (2005). *Seguridad en estaciones automatizadas*.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/186037>
- REVISTA DE ROBOTS. (2020, agosto 1). Robots Soldadores Industriales. Tipos y empresas especialistas. *REVISTA DE ROBOTS*. <https://revistaderobots.com/soldadura-robotizada/robots-industriales-de-soldadura-robotizada-automatica/>
- Reyes, F. (2011). *Robótica. Control de robots manipuladores*. Alfaomega Grupo Editor.
- Robotic Industry Association. (1974). *What is an Industrial Robot?* Automate.
<https://www.automate.org/robotics>
- Rueda, M. (2022, mayo 24). ¿Cómo debe ser una mesa de soldadura? *Suteva*.
<https://suteva.com/mesa-soldadura/>
- Sasig, E. (2021, septiembre 16). *Robots manipuladores, cinemática, control y simulación en Matlab*. Roboticoss. <https://roboticoss.com/robot-manipuladores-cinematica-control-y-simulacion-en-matlab/>

- Shery, G. (2022, junio 28). How does the 7th axis extend the range of a welding cobot? *Blog Igus India*. <https://blog.igus.in/how-does-the-7th-axis-extend-the-range-of-a-welding-cobot/>
- Solyman. (2020, octubre 23). Mesa para soldar: Descubre los tipos y características. *Solyman*. <https://www.solyman.com/tipos-de-mesas-para-soldar/>
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons.
- Stinchcomb, C. (1989). *Welding Technology Today: Principles and Practices*. Prentice-Hall.
- Timings, R. (2008). *Fabrication and Welding Engineering* (0 ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080886152>
- Valencia Guerrero, G. A., & Amaya Domínguez, L. Á. (2014). *Control de calidad de un etiquetado empleando el robot industrial Gryphon* [Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1820>
- Wiese, T., Abicht, J., Friedrich, C., Hellmich, A., & Ihlenfeldt, S. (2022). Flexible skill-based control for robot cells in manufacturing. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2022.1014476>
- Wollmann, S. (2021, marzo 11). *EWM GmbH - Schweißgeräte und Zubehör von EWM*. EWM GmbH. <https://www.ewm-group.com/nl/produkte/komplettsystem-mit-roboter.html>
- Yusupov, V. S., Kolobov, A. V., Akopyan, K. E., Seleznev, M. S., & Somnin, M. A. (2015). Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 1. *Steel in Translation*, 45(8), 598-604. <https://doi.org/10.3103/S0967091215080185>

Anexos