

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Proyecto técnico previo a la obtención del título de:
INGENIERA MECÁNICA E INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:
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.**

**AUTORES:
GABRIEL NICOLÁS MONTENEGRO ALCÍVAR
MARÍA LILIANA YAGUACHI RÍOS**

**TUTOR:
JAIME ROLANDO HEREDIA VELASTEGUÍ**

Quito, febrero del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Gabriel Nicolás Montenegro Alcívar y María Liliana Yaguachi Ríos con documentos de identificación N.º 172396127-0 y N.º 110566138-1, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “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.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Mecánica e Ingeniero Mecánico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Gabriel Nicolás Montenegro Alcívar
CI: 172396127-0



.....
María Liliana Yaguachi Ríos
CI: 110566138-1

Quito, febrero 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “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.” realizado por Gabriel Nicolás Montenegro Alcívar y María Liliana Yaguachi Ríos, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, febrero 2020.



Jaime Rolando Heredia Velasteguí

CI:1721400768

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico con mucho amor a mis padres Romel y Anita, a mis abuelitos José y María Isabel, a mi tío Ramiro y a mis hermanas Mishell y Lia; personas importantes quienes con esfuerzo, amor y dedicación me apoyaron de manera incondicional en todos los aspectos de mi vida brindándome motivación, consejos, confianza y mucho amor que fueron fundamentales para poder alcanzar esta meta.

Gabriel

Dedico este proyecto con mucho amor a mi madre Lilia por creer en mis capacidades, por su sacrificio, esfuerzo y apoyarme en mi carrera e inculcarme deseos de superación pues ella ha sido el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, a mis abuelos Rosa y Juan por el amor que me dieron desde niña, a mis hermanos Juan Pablo y Anthony.

Liliana

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi mami Anita y a mi papi Romel quienes siempre confiaron en mis capacidades, por todo el amor que me entregan a diario, por todos los valores que me inculcaron desde niño, por apoyarme de manera incondicional en mi formación profesional, por todos los sacrificios que realizaron para que pueda cumplir esta meta, incluso me va a faltar paginas por agradecer todo lo que han hecho por mí.

De igual forma agradezco a mi tío Ramiro y a mis abuelitos José y María Isabel quienes me dieron apoyo y mucho amor durante mi formación profesional, son personas muy importantes en mi vida.

Finalmente agradezco a mi novia Liliana, por la ayuda infinita que me brindó, por la confianza que siempre tuvo en mí cuando otras personas decían que no íbamos a poder, por toda la paciencia que tuvo durante el transcurso de este proyecto y por todo el amor que a diario me entregó.

Gabriel

Agradezco a mi madre que ha sido mi inspiración en esta etapa de la vida, que a través de su amor y paciencia me ha guiado a lo largo de mi carrera, a Gabriel por ser parte fundamental en mi vida, por brindarme su apoyo y amor en las situaciones más difíciles y ayudarme a cumplir esta meta que compartimos. Unas gracias infinitas a Romel y a Anita por su cariño y acogida pues sin ellos no hubiera sido posible este proyecto.

Liliana

Queremos agradecer a nuestro tutor y amigo Ingeniero Jaime Heredia, MSc. quien nos guió desde el principio del proyecto, compartiendo sus conocimientos y experiencia; también por su motivación cuando las cosas se ponían difíciles y por la bonita amistad que formamos en este tiempo.

Liliana y Gabriel

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Definición de brazo robótico	3
1.1.1. Morfología del robot	3
1.1.2. Grados de libertad	5
1.2. Tipos de brazos robóticos.....	6
1.2.1. Robot antropomórfico	7
1.2.2. Robot SCARA (Brazo Robótico de Conformidad Selectiva).....	7
1.3. Cinemática de brazos robóticos	8
1.3.1. Diagramas cinemáticos.....	8
1.3.2. Cinemática directa.....	9
1.3.3. Cinemática inversa	10
1.4. Visión artificial	11
1.4.1. Procesamiento de imágenes	11
1.5. Soldadura de punto.....	12
1.5.1. Principio de funcionamiento.....	12
1.6. Estructura mecánica del brazo robótico	13
1.6.1. Material de estructura mecánica	13
1.6.2. Actuadores	14
1.7. Microcontrolador	16

CAPÍTULO II.....	17
DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	17
2.1. Diseño del sistema de soldadura de punto.....	17
2.2. Diseño de brazo robótico.....	25
2.2.1. Diagrama cinemático del brazo robótico.....	25
2.2.2. Diseño de eslabones del brazo robótico.....	27
2.2.3. Base del brazo robótico.....	32
2.2.4. Cinemática del brazo robótico.....	38
2.3. Diseño del sistema de visión artificial.....	42
2.4. Diseño de la base general del prototipo.....	43
CAPÍTULO III.....	45
CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	45
3.1. Construcción del brazo robótico.....	45
3.2. Construcción del sistema de soldadura por punto.....	49
3.3. Construcción del sistema de visión artificial.....	51
3.4. Construcción de la base general del prototipo.....	54
CAPÍTULO IV.....	56
HARDWARE Y SOFTWARE PARA CONTROL DEL SISTEMA.....	56
4.1. Hardware.....	56
4.1.1. Placa Arduino.....	56
4.1.2. Fuente de poder ATX (Advanced Tecnology Extended).....	57
4.1.3. Módulo regulador de tensión.....	58
4.1.4. Módulo relé de 4 canales.....	59
4.2. Software.....	60
4.2.1. Diseño de la interfaz de control (GUI).....	61
4.2.2. Visión artificial con Matlab.....	64
4.2.3. Control de servomotores con Matlab.....	67
4.2.4. Control de relés.....	69
CAPÍTULO V.....	71
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
5.1. Modelo cinemático inverso.....	71

5.2. Visión artificial	72
5.3. Funcionamiento de servomotores	73
5.4. Soldadora de punto.....	76
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS	80
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de articulaciones: a) Rotacional, b) Lineal.	4
Figura 2. Eslabón.	4
Figura 3. Espacio de trabajo de un robot SCARA.....	5
Figura 4. Efecto final con ventosa.....	5
Figura 5. Grados de libertad de un brazo robótico [3].....	6
Figura 6. Esquema de robot antropomórfico.....	7
Figura 7. Esquema de robot SCARA.....	7
Figura 8. Sistema de coordenadas de un manipulador robótico [3]	8
Figura 9. Parámetros de Denavit & Hartenberg para un eslabón rotatorio [4]	10
Figura 10. Esquema de soldadura por punto.	12
Figura 11. Motor DC con encoder.....	14
Figura 12. Motor a pasos.....	15
Figura 13. Servomotor Tower Pro Mg995 [17].....	15
Figura 14. Señal cuadrada PWM.....	16
Figura 15. Principio de funcionamiento de un transformador.....	18
Figura 16. Gráfica de Calor generado vs. Tiempo.....	21
Figura 17. Diseño del electrodo.....	21
Figura 18. Electrodo de bronce con punta desgastada.....	22
Figura 19. Electrodo de Tungsteno.....	22
Figura 20. Diseño de electrodo de cobre electrolítico	23
Figura 21. Diagrama cinemático de brazo robótico.....	26
Figura 22. Diseño de soporte para servomotores	27
Figura 23. Diseño de eslabonamientos de brazo robótico.....	28
Figura 24. Movimiento del brazo.	28
Figura 25. Sistema de eslabones para efecto final.....	29
Figura 26. Movimiento del efecto final de brazo robótico	29
Figura 27. Posición crítica del brazo robótico.....	30
Figura 28. Diagrama de cuerpo libre del brazo extendido.....	30
Figura 29. Diseño de tren de engranes.....	35
Figura 30. Diseño de estructura para base de brazo robótico.....	36

Figura 31. Diagrama de giro del servomotor de la base.	38
Figura 32. Diagrama de giro del servomotor del antebrazo	39
Figura 33. Movimiento del brazo y antebrazo.....	40
Figura 34. Posición inicial del brazo robótico.....	41
Figura 35. Dimensiones del espacio de trabajo	43
Figura 36. Diseño de la base general	43
Figura 37. Desarrollo de la base general.	44
Figura 38. Ensamblaje final y renderizado.....	44
Figura 39. Base del brazo robótico.	45
Figura 40. Rosca con tarraja en eje de 4 mm.	46
Figura 41. Perforación de 4.5 mm en las piezas de acrílico	46
Figura 42. Acople	47
Figura 43. Ensamble de la parte inferior del brazo robótico	47
Figura 44. Ensamble parte de arriba del brazo robótico	48
Figura 45. Ensamble completo del brazo robótico.	48
Figura 46. Transformador GAL -800E-4	49
Figura 47. Transformador modificado	49
Figura 48. Estructura de la soldadora de punto.	50
Figura 49. Ensamble de bornera para soldadora de punto	50
Figura 50. “Masa” de la soldadora de punto.	51
Figura 51. Electrodo de cobre electrolítico.	51
Figura 52. Fabricación de base para soporte de la cámara.....	52
Figura 53. Soldadura de la base al soporte de la cámara	53
Figura 54. Soporte de cámara ensamblado en la base general.	53
Figura 55. Perforaciones en la base general.	54
Figura 56. Ensamble de las partes del prototipo en la base general.	55
Figura 57. Arduino UNO	56
Figura 58. Fuente ATX [30].....	58
Figura 59. Módulo regulador de tensión 7807 [31]	59
Figura 60. Módulo relé de 4 canales [32]	59
Figura 61. Circuito de control del prototipo.....	60

Figura 62. Montaje de hardware del sistema.....	60
Figura 63. Menú para creación de GUI.....	61
Figura 64. Espacio para crear interfaz	62
Figura 65. Diseño de interfaz para control del prototipo	62
Figura 66. Interfaz iniciada.	63
Figura 67. Procesamiento de imagen.	64
Figura 68. Código de programación para obtención de imagen en tiempo real.....	65
Figura 69. Imagen en tiempo real.	66
Figura 70. Códigos de programación para el procesamiento de imagen.	66
Figura 71. Códigos de programación para marcar el centro de los puntos de interés.	67
Figura 72. Imagen procesada con los puntos de interés.....	67
Figura 73. Código para configuración de servomotores.	68
Figura 74. Diagrama de control del sistema.....	69
Figura 75. Diagrama de flujo del sistema	70
Figura 76. Espacio de trabajo dividido en zonas.	73
Figura 77. Comportamiento del servomotor S_1	75
Figura 78. Comportamiento del servomotor S_2	75
Figura 79. Comportamiento del servomotor S_3	76
Figura 80. Zonas de riesgo del espacio de trabajo.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de robots [4].....	6
Tabla 2. Representación cinemática de eslabones [7]	9
Tabla 3. Parámetro de Denavit-Hartenberg [8]	10
Tabla 4. Características físicas de materiales más comunes [15].....	13
Tabla 5. Cálculo del calor generado en función del tiempo	20
Tabla 6. Cálculo del calor generado por unidad de masa en función del tiempo	24
Tabla 7. Propiedades de los elementos del brazo robótico	30
Tabla 8. Características de engranes rectos.....	32
Tabla 9. Propiedades de los elementos del brazo robótico	36
Tabla 10. Ensayos del modelo cinemático inverso.....	71
Tabla 11. Ensayos de la visión artificial	72
Tabla 12. Rangos de cada zona	73
Tabla 13. Amperajes de servomotores en diferentes zonas	74
Tabla 14. Ensayos con el electrodo de la soldadora de punto	77

RESUMEN

El proyecto técnico consiste en el diseño, construcción y control de un prototipo de brazo robótico antropomórfico de tres grados de libertad para la soldadura de punto de piezas metálicas, mediante la obtención de las coordenadas de los puntos de interés utilizando visión artificial. El proyecto utiliza amplios conocimientos de mecánica, electrónica y programación para automatizar de manera eficaz las funciones que realiza el prototipo.

En este trabajo se detalla paso a paso el diseño y la construcción de cada una de sus partes. También se realiza el estudio del modelo cinemático inverso del brazo robótico para el cálculo de los ángulos de giro de cada servomotor para que el efector final se coloque en una coordenada o punto establecido.

Además, se especifica el hardware y software empleados para el control general del prototipo en el que se incluye la programación en Matlab y la conexión de todos los componentes electrónicos utilizados para establecer el orden lógico de funcionamiento.

Finalmente, se realizan pruebas de funcionamiento y también se calcula el porcentaje de error con el que trabaja tanto la visión artificial como el modelo cinemático inverso.

Palabras claves: brazo robótico, cinemática inversa, soldadura de punto, visión artificial

ABSTRACT

The technical project consists of the design, construction and control of an anthropomorphic robotic arm prototype with three degrees of freedom for spot welding of metal parts, by obtaining the coordinates of the points of interest using artificial vision.

The project uses extensive knowledge of mechanics, electronics and programming to effectively automate the functions performed by the prototype.

This work details the design and construction of each of its parts step by step. The study of the inverse kinematic model of the robotic arm is also carried out to calculate the angles of rotation of each servomotor so that the final effector is placed in an established coordinate or point.

In addition, the hardware and software used for the general control of the prototype in which Matlab programming is included and the connection of all the electronic components used to establish the logical order of specified operation.

Finally, performance tests are performed and the percentage of mistake with which both the artificial vision and the inverse kinematic model works.

Keywords: robotic arm, reverse kinematics, spot welding, artificial vision

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el avance tecnológico se encuentra en constante crecimiento ya que, durante los últimos años, la robótica no solo se ha implementado en el sector industrial sino en el sector de la salud e investigativo, pues permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento como matemáticas, física, mecánica, electrónica, computación, visión e inteligencia artificial, entre otras. Hoy en día existen fábricas totalmente automatizadas por robots manipuladores en el área de producción metalmecánica, papel, envasado, ensamblaje, procesos de soldadura, etc.; esto permite reducir tiempos de fabricación, mejorar la calidad de elaboración de los procesos e incrementar la producción de la empresa.

Sin embargo, en Ecuador la mayor parte de las empresas realizan sus procesos de fabricación de manera tradicional, pues la implementación de sistemas industriales tiene elevados costos y el mercado de adquisición de dichos sistemas es limitado, lo que dificulta el acceso a la automatización, y se provoca un retraso tecnológico en el ámbito industrial.

El presente proyecto tiene como objetivo general diseñar, construir y controlar un prototipo de brazo robótico antropomórfico para la soldadura de punto, con la finalidad de dar a conocer la utilidad de la robótica en la pequeña y mediana industria metalmecánica ecuatoriana.

En el primer capítulo, se realiza la búsqueda bibliográfica correspondiente a los temas a desarrollarse en el proceso de elaboración y control de un brazo robótico antropomórfico como son: Robótica, morfología del robot, tipos de brazos robóticos, cinemática, visión artificial y soldadura de punto.

En el segundo capítulo, se diseñan los elementos del sistema mecánico que conforman el brazo robótico, el sistema de soldadura y visión artificial. Además, se realiza la cinemática inversa del brazo robótico, en el cual se estudia su geometría y alcance para poder posicionar el efector final en una coordenada cartesiana establecida de manera precisa.

En el tercer capítulo, se construye el prototipo de acuerdo al diseño previamente elaborado.

En el cuarto capítulo se estudia el hardware y software empleados para el control general del prototipo.

En el quinto capítulo, se evalúa el funcionamiento del prototipo y se analizan los resultados obtenidos al culminar el proyecto. Finalmente se establecen conclusiones y recomendaciones.

El objetivo general es diseñar, construir y controlar un prototipo de brazo robótico antropomórfico para la soldadura de punto de diferentes figuras, mediante el uso de cinemática inversa y visión artificial.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar las diferentes clases de prototipos de brazos robóticos.
- Estudiar las alternativas de diseño del prototipo del brazo robótico.
- Diseñar la estructura del prototipo (brazo robótico, sistema de soldadura de punto y visión artificial).
- Validar el funcionamiento del prototipo con pruebas de movimiento, precisión y detección de formas.
- Establecer la resolución del problema de cinemática inversa para el posicionamiento exacto del brazo robótico en una coordenada establecida.
- Diseñar e implementar el algoritmo de control del prototipo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Definición de brazo robótico

Desde un punto de vista mecánico se puede definir como una sucesión cinemática de cuerpos rígidos (eslabones) conectados por medio de juntas (articulaciones) [1]. Un brazo robótico o brazo manipulador es un conjunto de componentes electromecánicos que se pueden reprogramar y que provocan el movimiento de un efector final [2].

De acuerdo a la aplicación que se va a dar al robot, el efector final podría ser una pinza, un soplete de soldadura, un electroimán o cualquier otra herramienta [3].

La mayoría de estos manipuladores tienen semejanza con la fisiología de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que al hacer referencia a los elementos que los componen se usan términos como: cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc. [2].

1.1.1. Morfología del robot

La descripción de las partes y estructura mecánica de un robot se denomina morfología. Un manipulador robótico está compuesto por una sucesión de articulaciones y eslabones, cada articulación representa la interconexión entre dos eslabones consecutivos [4].

a. Articulaciones

Pueden producir movimiento lineal de traslación o movimiento rotacional. Las articulaciones que provocan un movimiento lineal se las define como articulaciones lineales, estas articulaciones también son conocidas como prismáticas. Por otro lado, las articulaciones que provocan movimiento rotacional o giratorio se les denomina rotacionales.

Las unidades de medición asociadas a una articulación lineal se dan en metros (m), mientras que para una articulación del tipo rotacional se dan en grados o radianes [4].

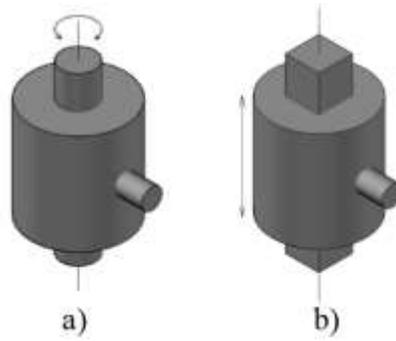


Figura 1. Tipos de articulaciones: a) Rotacional, b) Lineal. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

b. Actuadores

Envían las señales requeridas a las articulaciones para que se produzca el movimiento. Los actuadores utilizados comúnmente en brazos robóticos pueden ser servomotores, elementos eléctricos, neumáticos o hidráulicos [4].

c. Eslabón

Es una parte individual del mecanismo y está compuesto por una barra metálica o de cualquier otro material acoplada mecánicamente al rotor y al estator de la articulación siguiente [4].

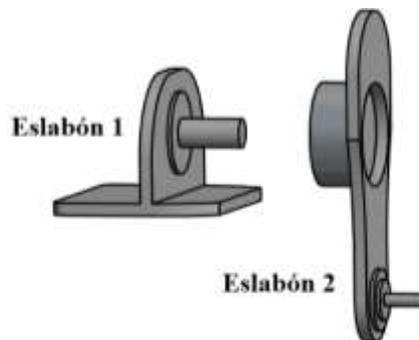


Figura 2. Eslabón. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

d. Espacio de trabajo

Es el lugar o espacio físico en donde el robot realiza todos sus posibles movimientos, está determinado por la naturaleza de sus articulaciones y la geometría del robot [4].

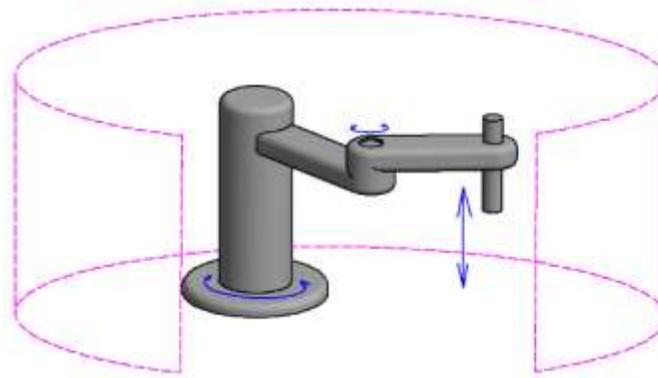


Figura 3. Espacio de trabajo de un robot SCARA. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

e. Efecto final

Es el elemento final del último eslabón. Está destinado a colocar la herramienta necesaria para una aplicación específica [4].



Figura 4. Efecto final con ventosa. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

1.1.2. Grados de libertad

Los grados de libertad que posee un manipulador es el número de variables de posición independientes que tendría que especificarse para poder localizar todos los elementos que componen el mecanismo. El sistema de los brazos robóticos es una cadena cinemática abierta y la posición de cada articulación se define generalmente como una sola variable, el número de articulaciones es igual al número de grados de libertad [3]. Se le conoce con las siglas DOF del inglés Degree of Freedom y usualmente cada grado de libertad necesita de un actuador [5].

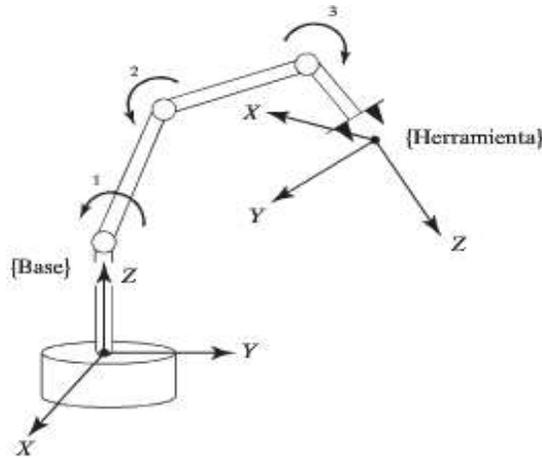


Figura 5. Grados de libertad de un brazo robótico [3]

1.2. Tipos de brazos robóticos

De acuerdo a la geometría del robot manipulador, se tiene cinco clases básicas, las cuales tienen relación con los espacios de trabajo en los que se desenvuelven.

A continuación, se presenta la clasificación de robots en base a sus tres primeras articulaciones, es decir sin incluir la herramienta colocada en su efector final.

Tabla 1. Clasificación de robots [4]

Robot	Características
Antropomórfico (RRR)	3 articulaciones rotacionales
SCARA (RRP)	2 articulaciones rotacionales y 1 lineal
Esférico (RRP)	2 articulaciones rotacionales y 1 lineal
Cilíndrico (RPP)	1 articulación rotacional y 2 lineales
Cartesiano (PPP)	3 articulaciones lineales

De acuerdo a la nomenclatura que se presenta en la Tabla 1, se tiene que la letra P representa una articulación prismática, mientras que la letra R significa que es un tipo de articulación rotacional. Además, el orden como se presentan las letras corresponde a las articulaciones de la base, hombro y codo respectivamente [4]. Se definirá las características de los dos tipos de robot más usuales que son: el antropomórfico y el SCARA.

1.2.1. Robot antropomórfico

Son brazos robóticos que tienen un arreglo antropomórfico, sus eslabones están unidos por tres articulaciones rotacionales y por ello presentan una mejor habilidad en su espacio de trabajo. El espacio de trabajo de esta configuración corresponde a una esfera hueca y su radio corresponde a la suma de las longitudes de sus eslabones [4]. Por su parecido con el brazo humano, la segunda articulación se conoce como “hombro” y la tercera se conoce como “codo”.

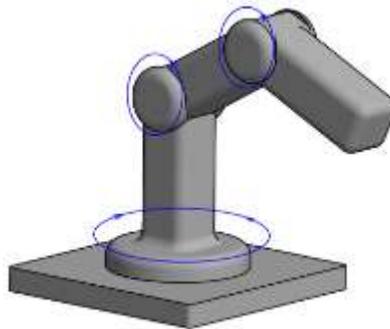


Figura 6. Esquema de robot antropomórfico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

1.2.2. Robot SCARA (Brazo Robótico de Conformidad Selectiva)

Según Reyes [4], este es un brazo planar antropomórfico de tres articulaciones, una de ellas es lineal, las otras dos rotacionales para la base y hombro respectivamente que se mueven en un plano horizontal. Este manipulador soporta cargas en forma vertical, por lo que su estructura mecánica tiende a ser de alta rigidez y son apropiados para procesos de ensamble.

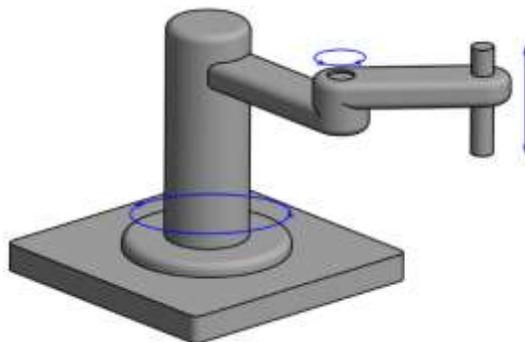


Figura 7. Esquema de robot SCARA. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

1.3. Cinemática de brazos robóticos

La cinemática estudia la geometría del movimiento de los cuerpos (la posición, velocidad, aceleración) sin tomar en cuenta las fuerzas que lo provocan [3].

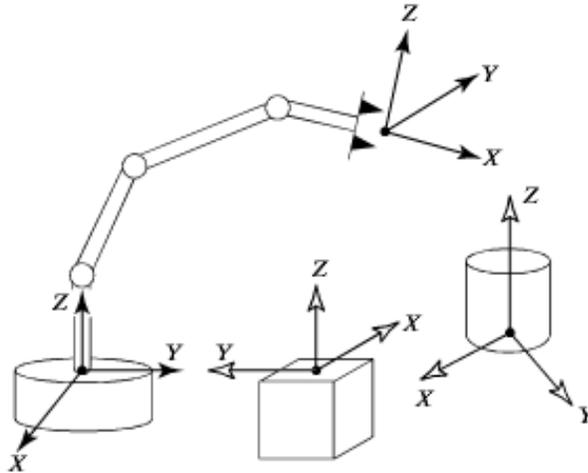


Figura 8. Sistema de coordenadas de un manipulador robótico [3]

Para el trabajo de la cinemática Denavit & Hartenberg [6], propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de la cadena cinemática.

Este método usa una matriz de transformación homogénea para representar la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

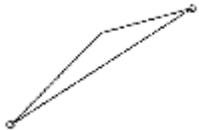
$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3.1. Diagramas cinemáticos

En el análisis de movimiento de una estructura mecánica, se dificulta la visualización de los componentes ensamblados. Es más sencillo representar las partes de forma esquemática de tal manera que solo se muestren las dimensiones que influyen en el

movimiento del mecanismo. A continuación, se muestran los símbolos usados para diagramas cinemáticos de eslabones [7].

Tabla 2. Representación cinemática de eslabones [7]

Componente	Forma Común	Representación Cinemática
Eslabón Simple		
Eslabón simple (Con punto de interés)		
Eslabón complejo		

1.3.2. Cinemática directa

Es una función vectorial que relaciona las coordenadas cartesianas con las articulares del robot, así como la ubicación del efector final, considerando la geometría del sistema mecánico del robot [4]. Es decir que establece la posición y orientación que adopta la herramienta del brazo robótico, independientemente de su configuración, cuando cada una de las variables que determinan la posición de sus articulaciones obtiene valores determinados [8].

Para la elaboración del modelo cinemático directo se utiliza el algoritmo de Denavit Hartenberg [8] y se considera 4 transformaciones básicas que consiste en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento:

- Rotación en torno al eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación longitudinal de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $d_i(0,0,d_i)$.
- Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $a_i(a_i,0,0)$.
- Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

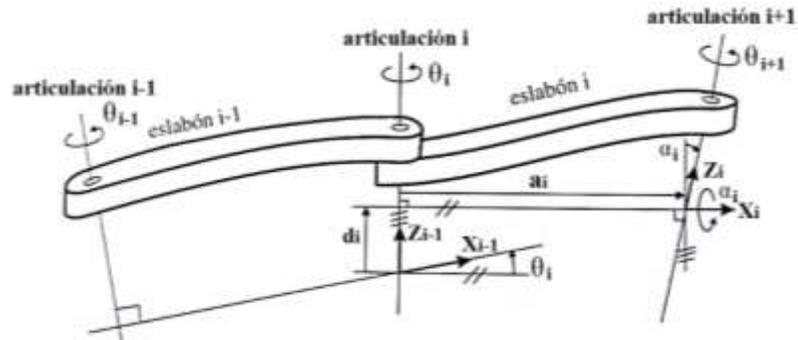


Figura 9. Parámetros de Denavit & Hartenberg para un eslabón rotatorio [4]

Donde las transformaciones se refieren al sistema móvil:

Tabla 3. Parámetro de Denavit-Hartenberg [8]

Características de eslabones	
θ_i	Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} .
d_i	Es la distancia medida a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i .
a_i	Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema $(i-1)$ -ésimo.
α_i	Ángulo de separación entre el eje z_{i-1} y el eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i .

1.3.3. Cinemática inversa

“Es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas. Dada la posición cartesiana y la orientación de la herramienta colocada en el extremo final del robot, se obtiene los ángulos de las articulaciones” [4].

En otros términos, determina que valores deben tomar las variables articulares para que el brazo robótico se posicione en una coordenada dada.

Para resolver la cinemática inversa se recurre a métodos matemáticos iterativos o métodos geométricos [5].

El método geométrico es el más adecuado para brazos robóticos de pocos grados de libertad y el procedimiento consiste en encontrar relaciones geométricas en las que interviene las coordenadas del extremo del brazo robótico y las dimensiones de los eslabones [8].

1.4. Visión artificial

El objetivo principal de la visión artificial es replicar el sentido de la vista humana mediante la adquisición de imágenes con una cámara para analizarlas e interpretarlas y así obtener la información necesaria para un proceso específico. El sistema de visión artificial determina la longitud entre dos o más ubicaciones geométricas de un objeto y establece si se cumple o no con las especificaciones establecidas. Comprende todas las aplicaciones industriales y no industriales en las que una combinación de software y hardware brinda una guía operativa para los dispositivos y establezcan sus funciones en relación a la captación y procesamiento de imágenes [9].

1.4.1. Procesamiento de imágenes

Los softwares que procesan imágenes obtienen una matriz de puntos en donde se adquieren coordenadas y la intensidad de color, en el caso de una imagen a blanco y negro, y para imágenes a color corresponde al arreglo denominado RGB (red-green-blue) de la siguiente manera [10]:

- Negro (0,0,0)
- Blanco (255,255,255)
- Amarillo (255,255,0)
- Rojo (255,0,0)
- Verde (0,255,0)
- Azul (0,0,255)

En una imagen RGB, cada píxel está compuesto por un valor de intensidad correspondiente a cada componente primaria. El color resultante del píxel vendrá por tanto definido por la "cantidad" de intensidad que tenga cada componente. Así, el color blanco estará compuesto de la máxima intensidad de color para los tres componentes. Por el contrario, el color negro será el resultado de reducir al mínimo la intensidad de los componentes [10].

Las aplicaciones más comunes de la visión artificial dentro de la robótica son la clasificación de objetos mediante reconocimiento, ensamblado, soldadura, y el guiado de robots móviles [11].

1.5. Soldadura de punto

También es conocida como soldadura por resistencia y es destinada a la soldadura de chapas o láminas metálicas [12], es un proceso de soldadura en donde el calor generado por la resistencia al pase de la corriente eléctrica genera calor que produce la unión de los metales [13].

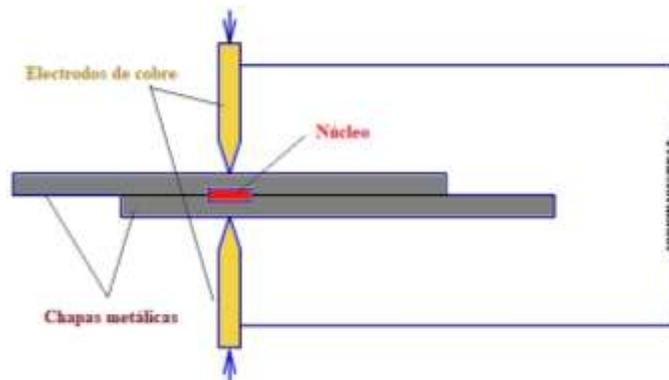


Figura 10. Esquema de soldadura por punto. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

1.5.1. Principio de funcionamiento

La operación de soldadura por punto implica la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica, con el tiempo y magnitud adecuada; la corriente eléctrica pasa entre las varillas que funcionan como electrodos y se las presionan para asegurarla unión de las placas [13].

En primer lugar, se debe generar suficiente calor para llevar un volumen confinado del metal al estado fundido. De inmediato, se permite que este metal se enfríe bajo presión hasta que tenga la fuerza suficiente para mantener unidas las piezas. La duración de la soldadura debe ser lo bastante corta como para evitar un calentamiento excesivo de las caras de los electrodos, pues tan elevadas temperaturas podrían adherir los electrodos a las placas, reduciendo su vida útil [13].

1.6. Estructura mecánica del brazo robótico

La estructura mecánica de un brazo robótico comprende una secuencia de eslabones rígidos conectados en cadena abierta por medio de articulaciones (motores) [4]. Para el diseño de esta estructura se deben tomar en cuenta aspectos como [14]:

- Material a utilizar en los elementos que conformar el prototipo
- Tipo de actuador a emplear en las articulaciones

1.6.1. Material de estructura mecánica

Según Martínez et al. [14], al momento de seleccionar el material de la estructura se debe considerar el costo, que tan manipulable es el material, resistencia mecánica, disponibilidad en el mercado y el uso que se le vaya a dar al robot. En la Tabla 4 se mencionan algunas características físicas importantes de los materiales utilizados frecuentemente en la construcción de prototipos de robots.

Tabla 4. Características físicas de materiales más comunes [15]

Material	Disponibilidad	Costo	Resistencia	Corte
Madera	Excelente	Bueno	Malo-Excelente	Malo-Excelente
Contrachapada	Excelente	Regular	Excelente	Regular
Acero	Buena	Bueno	Excelente	Malo-Excelente
Aluminio	Buena	Regular	Buena	Regular-Bueno
Acrílico	Buena	Bueno	Buena	Bueno-Excelente
Poliestireno	Buena	Regular	Mala-Regular	Bueno-Excelente

1.6.2. Actuadores

Para seleccionar el actuador adecuado en aplicaciones de robótica se debe tomar en cuenta el costo, la inercia, par, velocidad, frenado, el modo de control que se empleará. Actualmente existen variedad de actuadores que se pueden utilizar, entre ellos: Motores de corriente continua, los motores paso a paso y servomotores [14].

a. Motores DC con encoder

Los motores de corriente continua se utilizan la mayoría de veces con sistemas de engranes para reducir su velocidad y aumentar su torque, poseen escobillas mecánicas para el cambio interno de polaridad, lo que provoca inestabilidad [14].



Figura 11. Motor DC con encoder.

El encoder es un codificador óptico que va acoplado al eje del motor y se encarga de conocer la posición del eje mediante la emisión y recepción de luz a través de un disco transparente que tiene una serie de marcas separadas entre sí y colocadas de forma radial, se caracterizan por tener una elevada precisión y resolución [8].

b. Motores paso a paso

Son actuadores electromagnéticos giratorios que transforman señales digitales o pulsos en movimiento mecánico o desplazamiento angular. La velocidad de desplazamiento está directamente relacionada con la frecuencia de pulsos y la posición de rotación está en función del número de pulsos. Tiene su movimiento rotacional a pasos [16]. Son motores DC sin escobillas y con múltiples bobinas lo que permite un control más preciso de la posición (paso) y velocidad del eje del motor. Tiene alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento, su principal desventaja es que requiere de un sensor para establecer una posición inicial antes de arrancar el motor [14].



Figura 12. Motor a pasos. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

c. Servomotores

Es un motor de corriente continua con un sistema de engranajes y un circuito electrónico que mediante la comparación de un voltaje permite ubicar el eje en una determinada posición y mantenerla. El objetivo principal de la utilización de servomotores es generar una rotación limitada, algo que no se puede lograr con un motor DC [14].

Un servomotor está compuesto principalmente por tres elementos: amplificador electrónico, motor eléctrico y sensor de posición, el cual mide el desplazamiento rotacional o lineal [4].



Figura 13. Servomotor Tower Pro Mg995 [17]

Los servomotores funcionan con PWM (modulación por ancho de pulso), esto se utiliza en circuito digitales cuando se necesita modificar la cantidad de energía que se envía a una carga. Estas señales son cuadradas y su ancho varía acorde al período, esto es conocido como ciclo de trabajo (Duty cycle) y se representan en porcentajes [18].

$$D = \frac{t}{T} \cdot 100\% \quad (2)$$

En donde:

D: es el ciclo de trabajo.

t: es el tiempo en que la señal es positiva.

T: es el período.

La duración de cada pulso se explica como una instrucción de posicionamiento del servomotor y la frecuencia usada para enviar los pulsos tiene una frecuencia de 50 Hz, esto quiere decir que cada ciclo dura 20 ms [18].

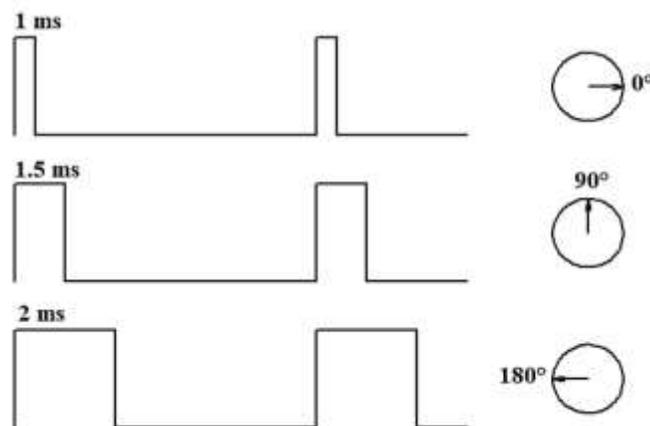


Figura 14. Señal cuadrada PWM. Elaborada por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Usualmente los anchos de pulso de los servomotores son de 1 ms a 2 ms y al ser aplicados se genera un desplazamiento de -90° a 90° , en resumen, el giro de un servomotor está determinado por el ancho de pulso [18].

1.7. Microcontrolador

Es un circuito integrado digital monolítico que está compuesto por los elementos de un procesador digital síncrono programable y se caracteriza porque su sistema físico se adapta a las particularidades del sistema al que se conecta cuando se aplican las señales eléctricas adecuadas. Son de tamaño pequeño y su capacidad de configuración han hecho que su campo de aplicación sea extenso [19]. El microcontrolador recibe información de las entradas, la procesa y escribe un 1 o un 0 en las salidas, actuando sobre el dispositivo que tenemos conectado [20].

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se realizó el diseño de los elementos mecánicos que constituyen el prototipo, además se escogió el material idóneo para su construcción con respecto a la función que cumple cada elemento. Los elementos a diseñar son los siguientes:

- Sistema de soldadura de punto
- Brazo robótico
- Sistema de visión artificial
- Base general del prototipo

El software elegido para realizar el diseño mecánico del sistema es Autodesk Inventor, ya que es un programa que, permite construir modelos 3D, validar su funcionamiento mediante simulaciones para ahorrar tiempo y dinero en la construcción del mismo.

2.1. Diseño del sistema de soldadura de punto

Según Ordóñez [21], para poder soldar acero de bajo carbono de 2 mm de espesor se necesita un mínimo de 400 amperios. Para obtener este alto amperaje se necesita un transformador.

Un transformador es un artefacto estático constituido por dos bobinados o devanados, los cuales están enrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario tiene N_2 espiras. El circuito de esta máquina lo constituye un núcleo magnético realizado con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí.

Se requiere que al disminuir el voltaje por defecto aumente el amperaje; eso sucede cuando el devanado del secundario tiene menos vueltas que el devanado primario y el calibre del conductor (secundario) aumenta significativamente.

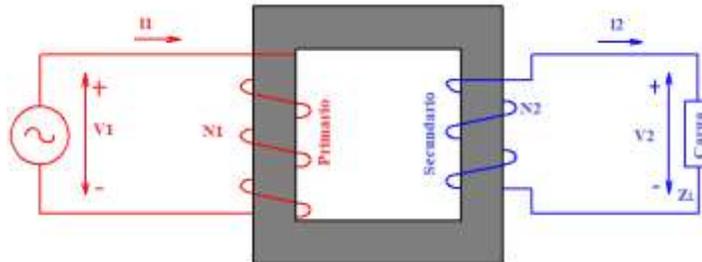


Figura 15. Principio de funcionamiento de un transformador. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi.

El amperaje de salida de un transformador se rige por la relación [22]:

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot N_1}{N_2} \quad (3)$$

Donde:

I_2 : Es el amperaje de salida del transformador y el parámetro de interés.

I_1 : Es el amperaje del bobinado primario.

N_1 : Número de vueltas del bobinado primario.

N_2 : Número de vueltas del bobinado secundario.

Para el diseño de la máquina soldadora de puntos se conocen los siguientes datos de placa del transformador:

I_1 : 7 A

N_1 : 160 vueltas en el bobinado primario

En el bobinado secundario se emplearán 3 vueltas, con ello se calcula el amperaje de salida:

$$I_2 = 373.33A$$

Este amperaje a la salida del transformador es suficiente para poder soldar placas de metal de pequeño espesor. Para calcular el calor generado por la soldadora de punto es necesario conocer el voltaje a la salida del transformador, para ello empleamos la siguiente fórmula [22]:

$$P = V_1 \cdot I_1 \quad (4)$$

Donde:

P: Es la potencia eléctrica en Watts

V₁: Es el voltaje de entrada al transformador (110 V)

I₁: Es el amperaje de entrada en Amperios (7 A)

$$P = (110V)(7A)$$

$$P = 770 \text{ W}$$

Por lo tanto:

$$P = V_2 \cdot I_2$$

$$V_2 = \frac{P}{I_2}$$

$$V_2 = \frac{770W}{373.33A}$$

$$V_2 = 2.06 \text{ V}$$

La cantidad de calor que se genera en el proceso de la soldadura depende del amperaje (I), la resistencia del conductor y del material a soldar (R) medida en Ohms y el tiempo (t) de duración del proceso en segundos [13]. Y se calcula como sigue:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (5)$$

Para calcular la resistencia del conductor utilizamos la Ley de Ohm [22]:

$$R = \frac{V_2}{I_2} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{2.06V}{373.33A}$$

$$R_2 = 5.5 \times 10^{-3} \Omega$$

Tabla 5. Cálculo del calor generado en función del tiempo

N°	Tiempo (s)	Intensidad (A)	Resistencia (Ω)	Calor generado (KJ)
1	0.5	373.33	5.5×10^{-3}	0.38
2	1	373.33	5.5×10^{-3}	0.77
3	1.5	373.33	5.5×10^{-3}	1.15
4	2	373.33	5.5×10^{-3}	1.54
5	2.5	373.33	5.5×10^{-3}	1.92
6	3	373.33	5.5×10^{-3}	2.31
7	3.5	373.33	5.5×10^{-3}	2.69
8	4	373.33	5.5×10^{-3}	3.08
9	4.5	373.33	5.5×10^{-3}	3.46
10	5	373.33	5.5×10^{-3}	3.85

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

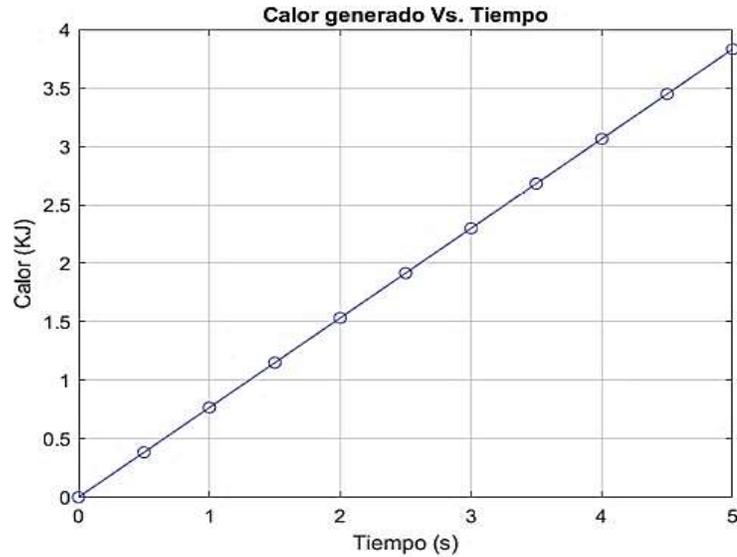


Figura 16. Gráfica de Calor generado vs. Tiempo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para realizar el proceso de soldadura de punto se necesita diseñar un electrodo que tendrá la función de transmitir el calor generado a un punto específico en la chapa metálica que se requiere soldar, es por ello que debe estar construido de un material que tenga las propiedades adecuadas, tanto para conducir y soportar temperaturas elevadas sin que se funda durante el proceso.

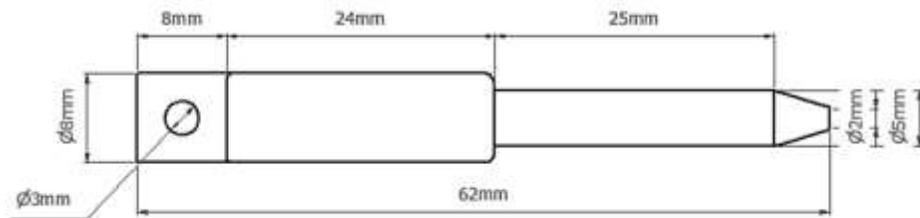


Figura 17. Diseño del electrodo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Según la investigación y las pruebas realizadas se optó por utilizar cobre electrolítico en la fabricación del electrodo por las siguientes razones:

- Realizando pruebas experimentales, primero se fabricó un electrodo utilizando bronce como material de construcción. El bronce es una aleación de cobre con estaño, es por ello que a alta temperatura la punta del electrodo se fundió y esto

ocasionó problemas de precisión debido al desgaste constante del electrodo por lo que se descartó el bronce para la construcción.



Figura 18. Electrodo de bronce con punta desgastada. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

- También se optó por utilizar Tungsteno como alternativa en la construcción del electrodo, ya que su temperatura de fusión es alrededor de $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$ y su conductividad térmica es de $174\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ y es utilizado en procesos de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) [23], en las pruebas el electrodo no se fundió, pero se adhería al material a soldar lo que ocasionaría el desplazamiento de las piezas de la zona de trabajo y problemas en la adquisición de coordenadas por la visión artificial.



Figura 19. Electrodo de Tungsteno. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

- El electrodo se diseñó con cobre electrolítico ya que es un elemento sin alear que se caracteriza por excelente conductividad eléctrica y térmica. Su temperatura de fusión ronda los $1085\text{ }^{\circ}\text{C}$, su conductividad térmica es de $401\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ y su densidad es 8933 Kg/m^3 , lo que lo convierte en el material idóneo para este proceso [23].

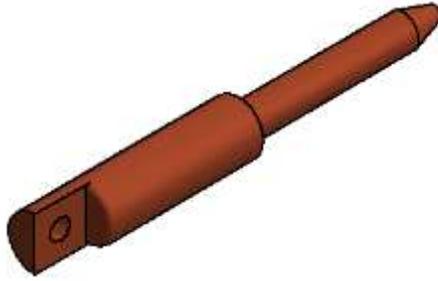


Figura 20. Diseño de electrodo de cobre electrolítico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

El material que se va a soldar es acero de bajo carbono de 0.4 mm de espesor, se conoce que el calor por unidad de masa o también llamado calor latente de fusión es de 96 KJ/Kg y su densidad es 7850 Kg/m³ [23].

Para calcular la masa que el electrodo va a fundir, se realiza el siguiente cálculo [23]:

$$m = \rho \cdot V \quad (7)$$

Donde:

m: Es la masa (Kg)

ρ : Densidad (Kg/m³)

V: Volumen de acuerdo al diámetro del electrodo (m³)

Para calcular el volumen que se va a fundir en el proceso de soldadura usamos la siguiente fórmula [23]:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (8)$$

Donde:

r: Radio del electrodo (m).

L: Es la suma de los espesores de las chapas a soldar (m).

$$V = \pi \cdot (0.001m)^2 \cdot (0.0008m)$$

$$V = 2.51 \times 10^{-9} m^3$$

$$m = (7850Kg / m^3) \cdot (2.51 \times 10^{-9} m^3)$$

$$m = 2 \times 10^{-5} Kg$$

Tabla 6. Cálculo del calor generado por unidad de masa en función del tiempo

N°	Tiempo (s)	Calor generado (KJ)	Masa (Kg)	Calor por unidad de masa (KJ/Kg)
1	0.5	0.38	2×10^{-5}	19226.67
2	1	0.77	2×10^{-5}	38453.33
3	1.5	1.15	2×10^{-5}	57680.00
4	2	1.54	2×10^{-5}	76906.67
5	2.5	1.92	2×10^{-5}	96133.33
6	3	2.31	2×10^{-5}	115360.00
7	3.5	2.69	2×10^{-5}	134586.67
8	4	3.08	2×10^{-5}	153813.33
9	4.5	3.46	2×10^{-5}	173040.00
10	5	3.85	2×10^{-5}	192266.67

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Adicionalmente, se calcula la masa del electrodo en función de su densidad y geometría:

$$m = \rho \cdot V$$

Donde:

m: Es la masa del electrodo (Kg)

ρ : Densidad del cobre electrolítico (Kg/m³)

V: Volumen de acuerdo a la geometría del electrodo (m³)

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

Donde:

r: Radio del electrodo (m)

L: Longitud del electrodo (m)

$$V = \pi \cdot (0.004m)^2 \cdot (0.062m)$$

$$V = 3 \times 10^{-6} m^3$$

$$m = (8933Kg / m^3) \cdot (3 \times 10^{-6} m^3)$$

$$m = 0.027 \text{ Kg}$$

2.2. Diseño de brazo robótico

El brazo a diseñar es de tipo antropomórfico ya que todas sus articulaciones son rotacionales y por sus características geométricas permite tener un amplio espacio de trabajo para realizar movimientos.

2.2.1. Diagrama cinemático del brazo robótico

Una propiedad de mucha importancia en el diseño de mecanismos es el número de grados de libertad del eslabonamiento.

Según Myszka [7], el grado de libertad es el número de actuadores independientes necesarios para posicionar con precisión todos los eslabones de un mecanismo con respecto al origen.

Los grados de libertad para un mecanismo se calculan con la ecuación de Gruebler [7]:

$$M = 3(n-1) - 2j_p - j_h \quad (9)$$

Donde:

M: grados de libertad.

n: número total de eslabones del mecanismo.

j_p : número total de uniones principales.

j_h : número total de uniones de orden superior (Uniones de levas o engranes).

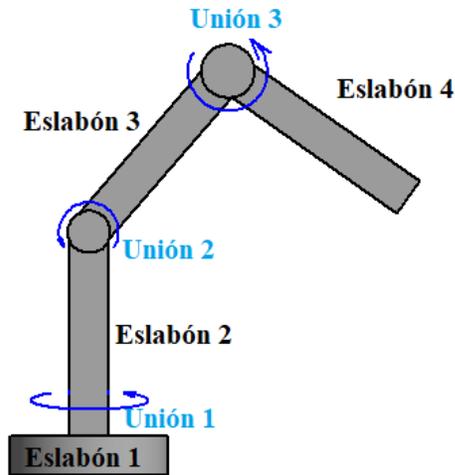


Figura 21. Diagrama cinemático de brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

De acuerdo con la Figura 15 se tiene cuatro eslabones y tres uniones principales, con lo cual se calcula:

$$M = 3(4 - 1) - 2(3) - 0$$

$$M = 9 - 6 - 0$$

$$M = 3$$

El brazo se diseña para tener tres grados de libertad los mismos que representan: uno en la base de rotación, otro en la articulación de tipo hombro y un tercero para la articulación de tipo codo.

De acuerdo a la Tabla 4 el material adecuado para la construcción de la estructura mecánica es el Acrílico (polimetilmetacrilato) de 4 mm de espesor, ya que mediante el corte láser su proceso de maquinado es fácil, su resistencia mecánica es apta para la elaboración de prototipos, su costo es moderado y se puede adquirir fácilmente en el mercado.

2.2.2. Diseño de eslabones del brazo robótico

Como se observa en el diagrama cinemático explicado en la Figura 21, se debe colocar un actuador (servomotor) en cada articulación, pero con este método existe un problema, ya que el servomotor ubicado en el hombro debe vencer el torque generado por el peso del servomotor de la articulación del codo sumado el peso del eslabón y el peso del efector final, por lo que se opta en generar un diseño en el cual los dos servomotores serán ubicados en la parte inferior del prototipo para disminuir la carga que tiene que vencer el primer servomotor (articulación de hombro).

Se diseñó dos soportes laterales para la sujeción de los servomotores, los mismos que estarán ubicados a la misma altura.

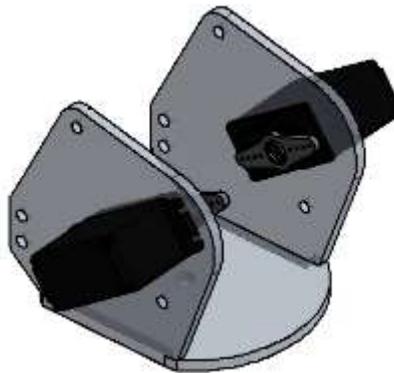


Figura 22. Diseño de soporte para servomotores. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

El servomotor de la izquierda controlará el movimiento de la articulación del codo, y el servomotor de la derecha controla la articulación del hombro.

Se desea que cuando el brazo robótico esté totalmente extendido tenga un alcance máximo de 300 mm. La estructura del antebrazo está conformada por dos eslabones principales que serán conectados al servomotor mediante un eje de 6 mm de diámetro y 35 mm de longitud. Estos eslabones tienen una longitud de 150 mm y están conectados entre sí, mediante dos ejes de acero inoxidable de 4 mm de diámetro y 35 mm de longitud.

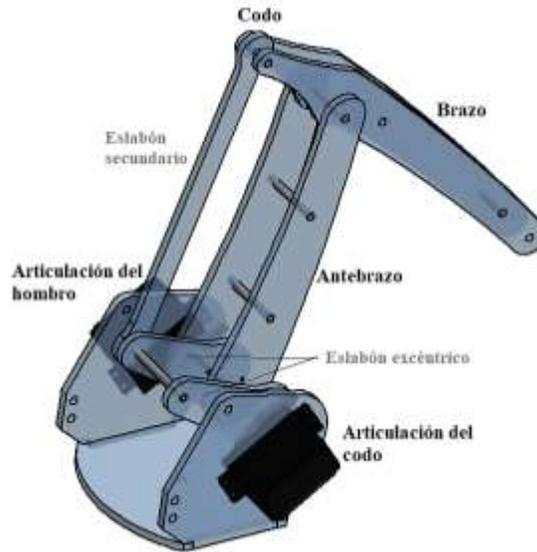


Figura 23. Diseño de eslabonamientos de brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Al servomotor, que controla el movimiento en la articulación del codo, se conectan dos eslabones excéntricos, los cuales transmiten el giro mediante un eslabón secundario hacia el brazo como se observa en la Figura 20.

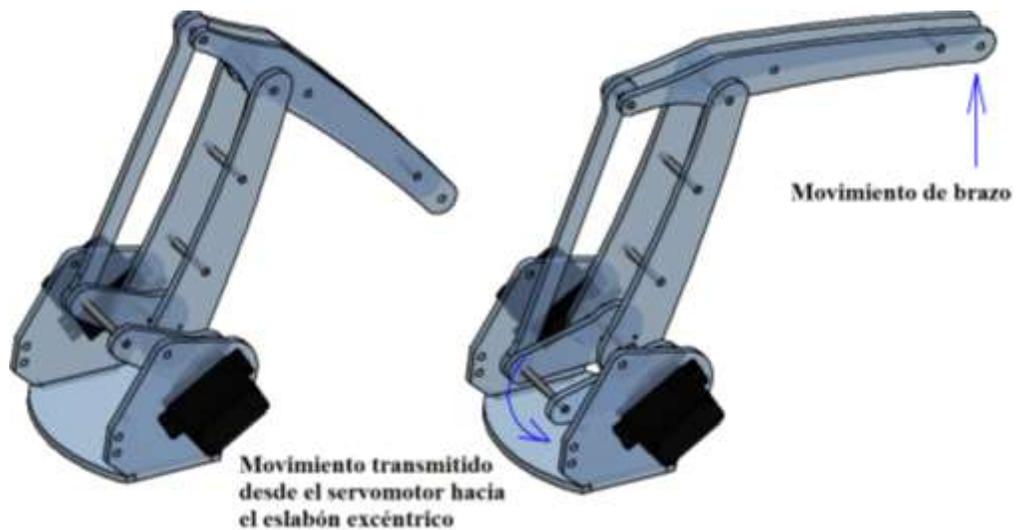


Figura 24. Movimiento del brazo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para colocar la herramienta en el efector final se diseña un mecanismo de eslabones, dos eslabones simples y dos complejos, para que la herramienta siempre llegue a la

coordenada establecida a un ángulo de 0° con respecto a la horizontal, como se muestra en la Figura 25 y 26:

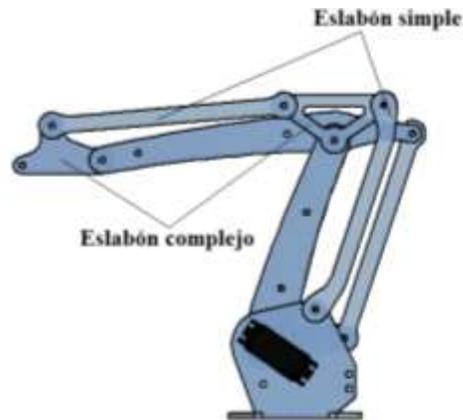


Figura 25. Sistema de eslabones para efector final. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

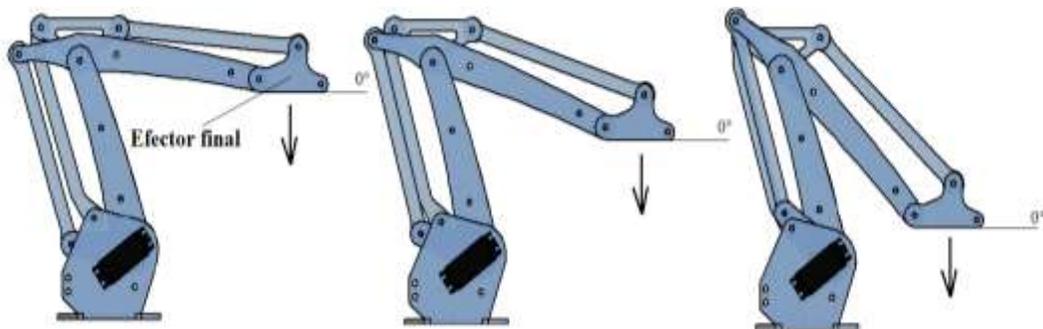


Figura 26. Movimiento del efector final de brazo robótico: Elaborado por Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Una vez realizado el diseño en el software CAD (Diseño asistido por computador), se determina que el brazo robótico cumple con el rango requerido de funcionamiento y no existen colisiones entre sus eslabones.

Para la selección del servomotor de la articulación del hombro se realizan los siguientes cálculos de acuerdo a la geometría del diseño. Se considera la posición más crítica del brazo robótico cuando está extendido en su totalidad como se aprecia en la Figura 27.

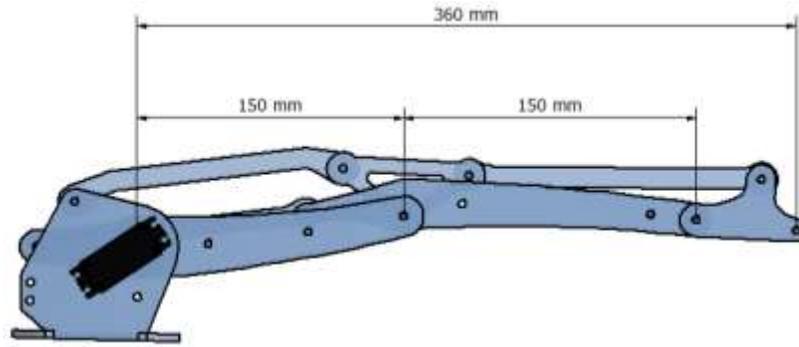


Figura 27. Posición crítica del brazo robótico. Elaborado por Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Tabla 7. Propiedades de los elementos del brazo robótico

Elemento	Masa (Kg)
Electrodo	0.027
Efector final	0.013
Brazo	0.21
Antebrazo	0.19
Total	0.231

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para calcular el torque requerido se realiza el siguiente cálculo:

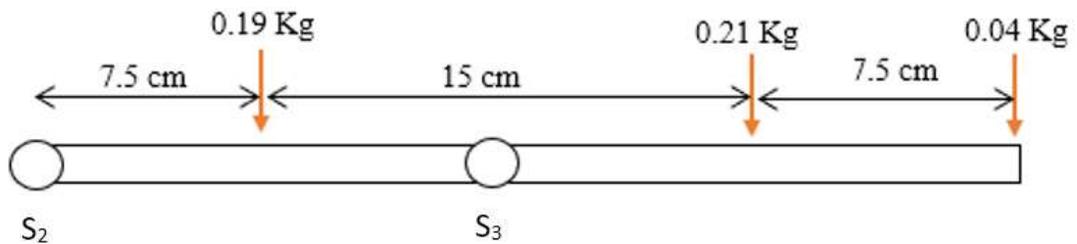


Figura 28. Diagrama de cuerpo libre del brazo extendido. Elaborado por Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

$$T_{requerido} = F_1 \cdot d_1 + F_2 \cdot d_2 + F_3 \cdot d_3 \quad (10)$$

$$T_{requerido} = (0.19 \text{ Kg}) \cdot (7.5 \text{ cm}) + (0.21 \text{ Kg}) \cdot (22.5 \text{ cm}) + (0.04 \text{ Kg}) \cdot (30 \text{ cm})$$

$$T_{requerido} = 7.35 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

De acuerdo a la investigación realizada previamente se llegó a la decisión de usar servomotores, debido a que, para colocar el prototipo en una posición determinada se requiere alta precisión en sus movimientos, estos actuadores tienen un sistema de engranes por lo que brinda un alto torque en el eje de salida, su programación es sencilla, fáciles de adquirir en el mercado y son ideales para la construcción de prototipos robóticos.

Para la construcción de este prototipo se utilizará tres servomotores, uno por cada articulación, de la serie MG995 Tower Pro, las características son especificadas en la hoja de datos del componente [24]:

- Tipo de engranes: Metálicos.
- Voltaje de operación: De 4-7 V.
- Velocidad de operación: 6.5 rad/s
- Torque: 15 kg/cm (si es alimentado a 7 V).
- Rango de giro: De 0 - 180°.
- Peso: 55 g
- Temperatura de funcionamiento: 0 °C - 55 °C

Para calcular el factor de seguridad con el que está diseñado el sistema se emplea el siguiente procedimiento [25]:

$$F_s = \frac{\text{Torque de servicio}}{\text{Torque requerido}} \quad (11)$$

$$F_s = \frac{15 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}{7.35 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}$$

$$F_s = 2.04$$

El factor de seguridad calculado nos indica que el servomotor escogido está sobredimensionado y esto garantiza una baja probabilidad de fallo del sistema.

2.2.3. Base del brazo robótico

En la base se encuentra un servomotor, para esto se realiza un tren de engranes que serán los encargados de transmitir el giro mas no de aumentar el torque para que el peso total del brazo no ejerza una presión directa sobre el eje de salida del servomotor.

El tren de engranes estará constituido por tres engranes, el primero estará conectado al eje del servomotor, el segundo será un engrane que se denomina “*loco*” ya que sirve únicamente para invertir la dirección de rotación de la salida y el tercero estará conectado directamente al brazo robótico para producir el giro.

Para realizar este sistema se adquiere en el mercado tres engranes rectos con las siguientes características:

Tabla 8. Características de engranes rectos

Características de engranes			
Terminología	Engrane 1	Engrane 2	Engrane 3
Número de dientes	41	30	41
Diámetro del círculo de paso	4 cm	3 cm	4 cm
Ángulo de presión	20°	20°	20°

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para realizar las perforaciones, donde se colocarán los ejes que soportan los engranes, es necesario calcular la distancia entre centros. La distancia se formula de la siguiente manera [7]:

$$C = \frac{N_1 + N_2}{2 \cdot Pd} \quad (12)$$

Donde:

C: Es la distancia entre centros expresado en pulgadas (in).

N₁: Es el número de dientes del engrane impulsor.

N₂: Es el número de dientes del engrane impulsado.

Pd: Es el paso diametral.

Para calcular el paso diametral se emplea la siguiente fórmula [7]:

$$Pd = \frac{N}{d} \quad (13)$$

Donde:

N: Es el número de dientes del engrane impulsado o impulsor.

d: Es el diámetro del círculo de paso del engrane impulsado o impulsor.

$$Pd = \frac{41}{1.57}$$

$$Pd = 26$$

Una vez encontrado el paso diametral, se obtiene la distancia entre centros de los engranes acoplados:

$$C = \frac{41 + 30}{2 \cdot (26)}$$

$$C = 1.36 \text{ in}$$

$$C = 34.54 \text{ mm}$$

Para validar el diseño del tren de engranes es importante calcular la razón de contacto de los mismos. La razón de contacto es el número promedio de dientes que están en acoplados en un momento determinado. Myszka [7], dice que los valores recomendados de razón de contacto deberán ser mayores a 1.2, estos valores indican que un par de dientes siempre están en contacto, mientras un segundo par está en contacto 20 % de las veces; si los valores de la razón son mayores a 1.2, implica que el movimiento es suave, y la carga no solo se ejerce en un diente, sino que se comparte.

Para calcular la razón de contacto se emplea la siguiente fórmula:

$$mp = \frac{N_1(\sqrt{(r_2 + a)^2 - (r_2 \cdot \cos \phi)^2} - r_2 \cdot \sin \phi + \sqrt{(r_1 + a)^2 - (r_1 \cdot \cos \phi)^2} - r_1 \cdot \sin \phi)}{\pi \cdot d_1 \cdot \cos \phi} \quad (14)$$

Donde:

mp: Es la razón de contacto.

r₂: Es el radio del círculo de paso.

a: Es el adendo del engrane.

ϕ: Es el ángulo de presión

Según las especificaciones de la AGMA (American Gear Manufacturer's Association), para engranes de paso fino, el adendo se calcula como sigue:

$$a = \frac{1}{Pd} \quad (15)$$

$$a = \frac{1}{26}$$

$$a = 0.038 \text{ in}$$

Finalmente, se obtiene la razón de contacto:

$$mp = \frac{41 \cdot (\sqrt{0.08382} - 0.575 \cdot \sin 20) + \sqrt{0.1331} - 0.785 \cdot \sin 20}{\pi \cdot 1.57 \cdot \cos 20}$$

$$mp = 1.676$$

La desventaja del uso de engranes rectos es la posible interferencia entre los dientes. Cuando en un sistema existe interferencia, los dientes pueden generar desgaste excesivo, ruido y vibraciones [7]. Es por ello que es necesario verificar mediante cálculos si en el sistema diseñado existe interferencia.

La siguiente ecuación determina el máximo número de dientes que el engrane debe tener para evitar la interferencia:

$$N_2 < \left| \frac{N_1^2 \cdot \text{sen}^2(\phi) - 4 \cdot (a \cdot Pd)^2}{4(a \cdot Pd) - 2 \cdot N_1 \cdot \text{sen}^2(\phi)} \right| \quad (16)$$

$$N_2 < \left| \frac{41^2 \cdot \text{sen}^2(20) - 4 \cdot (0.988)^2}{4(0.988) - 2 \cdot 41 \cdot \text{sen}^2(20)} \right|$$

$$N_2 < 34.17 \text{ dientes}$$

El número de dientes del engrane impulsado es 30 y es menor que el valor límite de 34.17 por lo que la interferencia no es un problema en el sistema diseñado.

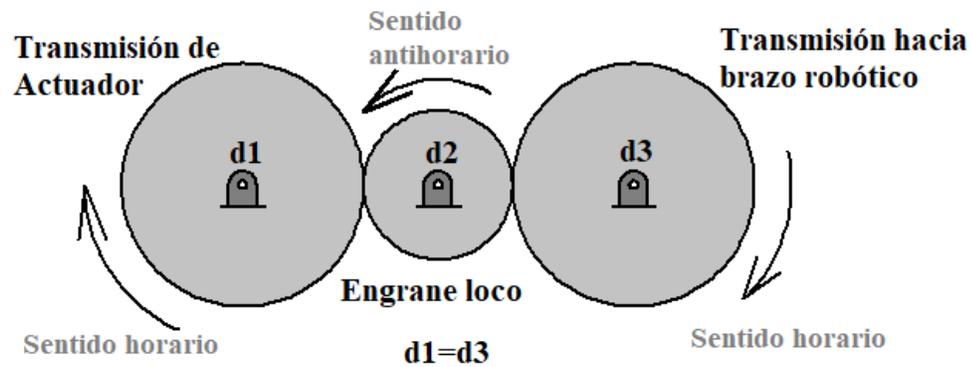


Figura 29. Diseño de tren de engranes. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Se observa en la Figura 29 que, el diámetro 1 (d1) es igual al diámetro 3 (d3), debido a que, sólo se requiere transmisión de movimiento, por lo que se demuestra que el torque inicial (T_1) y final (T_3) es el mismo:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (17)$$

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot d_1}{d_2}$$

$$\frac{T_2}{T_3} = \frac{d_2}{d_3} \rightarrow T_3 = \frac{T_2 \cdot d_3}{d_2}$$

$$\text{como: } d1 = d3$$

$$T_3 = \frac{T_2 \cdot d_1}{d_2}$$

$$\therefore T_1 = T_3$$

Para la sujeción del tren de engranes y servomotor se diseñó la siguiente estructura:

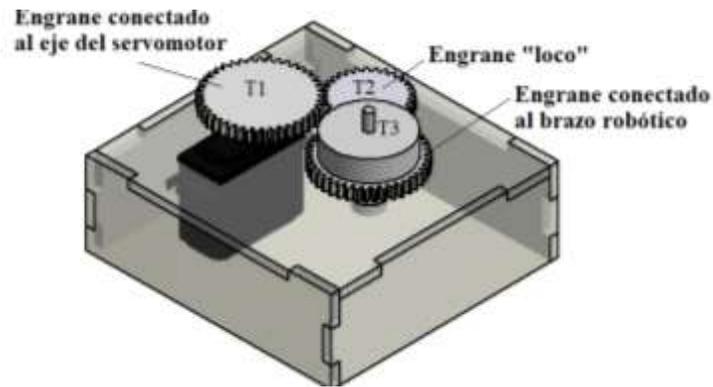


Figura 30. Diseño de estructura para base de brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para calcular el torque que necesita la base para efectuar su movimiento rotacional se considera las siguientes propiedades:

Tabla 9. Propiedades de los elementos del brazo robótico

Elemento	Masa (Kg)
Electrodo	0.027
Efector final	0.013
Brazo	0.21
Antebrazo	0.19
Servomotores	0.1
Estructura de sujeción de servomotores	0.2
Total	0.74

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Asumiendo que en la construcción se puede aumentar elementos e incrementar la masa total del prototipo se establece que la masa total es de 1 Kg.

El torque se calcula de la siguiente forma [26]:

$$T_{Br} = I_{Br} \cdot \alpha \quad (18)$$

Donde:

T_{Br} : Torque de la base (Kg.m)

I_{Br} : Inercia del brazo

α : Velocidad angular servomotor (rad/s)

$$I_{Br} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot r^2 \quad (19)$$

Donde:

M : Masa del brazo robótico (Kg)

r : Longitud del brazo extendido en su totalidad (m)

$$I_{Br} = \frac{1}{2} \cdot (1 \text{ Kg}) \cdot (0.36 \text{ m})^2$$
$$I_{Br} = 0.0648 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Entonces T_{Br} se calcula como sigue:

$$T_{Br} = (0.0648 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (6.5 \text{ rad} / \text{s})$$

$$T_{Br} = 0.42 \text{ N} \cdot \text{m} \approx 4.21 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$Fs = \frac{\text{Torque de servicio}}{\text{Torque requerido}}$$

$$Fs = \frac{15 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}{4.21 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}$$

$$Fs = 3.56$$

2.2.4. Cinemática del brazo robótico

Como se vio anteriormente la cinemática inversa será de utilidad para encontrar los ángulos de giro que deberán adoptar los servomotores para que el efector final pueda llegar a una coordenada, generada por la visión artificial, en el espacio de trabajo.

Existen varios métodos para determinar la cinemática inversa de brazos robóticos según diferentes bibliografías, pero de acuerdo al modelo antropomórfico de tres grados de libertad diseñado se optó por un método geométrico.

Para realizar el cálculo de la cinemática inversa se determinará el ángulo de giro de tres servomotores, de la base (S_1), antebrazo (S_2) y brazo (S_3).

Para el cálculo del ángulo de giro del servomotor S_1 se realiza el siguiente diagrama:

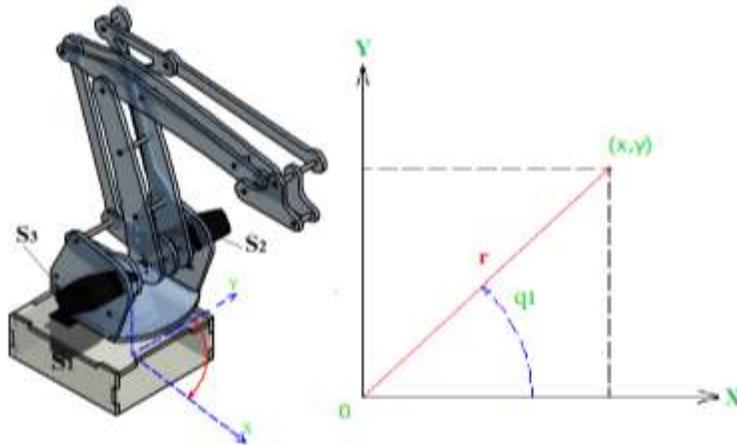


Figura 31. Diagrama de giro del servomotor de la base. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (20)$$

Donde:

q_1 : Ángulo de giro del servomotor S_1 .

x : Coordenada en el eje X de un punto en el espacio de trabajo.

y: Coordenada en el eje Y de un punto en el espacio de trabajo.

La distancia (r) del origen del brazo robótico a la coordenada (x, y) está determinada por:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (21)$$

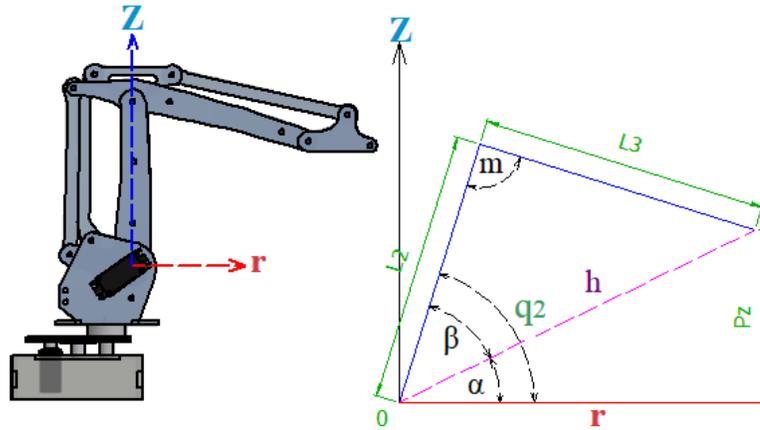


Figura 32. Diagrama de giro del servomotor del antebrazo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

De la Figura 32 se determina que P_z es la altura del objeto que se desea soldar y a donde el efector final debe llegar.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{r}\right) \quad (22)$$

$$h = \sqrt{P_z^2 + r^2} \quad (23)$$

Para calcular los ángulos β y m se plantea la “Ley del Coseno”, para el triángulo formado por los segmentos L_2 , L_3 y h de la siguiente manera:

$$L_3^2 = L_2^2 + h^2 - 2 \cdot L_2 \cdot h \cdot (\cos \beta) \quad (24)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + h^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot h}\right)$$

Donde:

L_2 : Longitud del antebrazo (mm).

L_3 : Longitud del brazo (mm).

De acuerdo al diagrama geométrico el ángulo q_2 que debe girar el servomotor S_2 es:

$$q_2 = \alpha + \beta \quad (25)$$

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{r}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + h^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot h}\right) \quad (26)$$

El ángulo m es aquel que se necesita para que el efector final vaya a la coordenada dada con respecto a L_2 .

$$h^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot \cos(m) \quad (27)$$

$$m = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - h^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3}\right) \quad (28)$$

Si en el diseño del brazo robótico cada articulación tuviera un servomotor el ángulo m sería directamente la instrucción de giro para el servomotor S_3 , sin embargo, el movimiento del diseño propuesto se da como se muestra en la Figura 54.

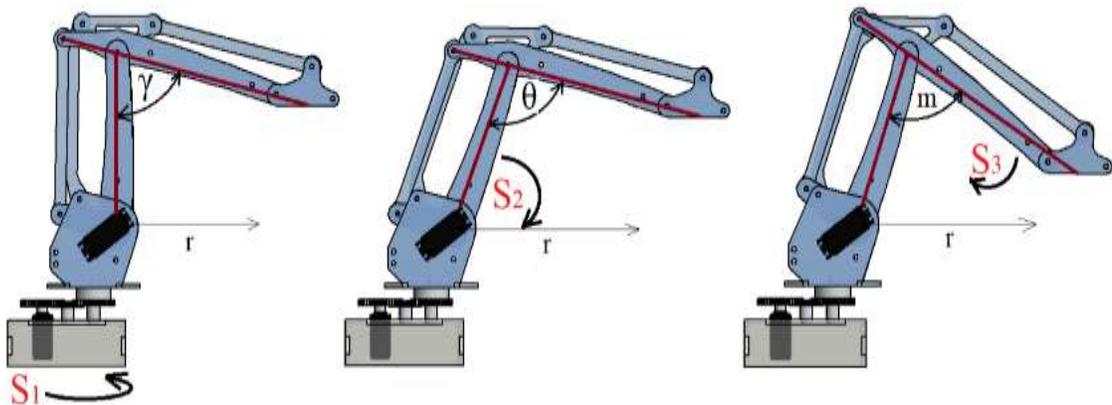


Figura 33. Movimiento del brazo y antebrazo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Se observa que para la operación que va a realizar, el antebrazo está colocado a un ángulo de 90° y forma un ángulo inicial γ con el brazo, el primer giro lo hace el servomotor S_1 , para direccionar el brazo robótico hacia el objeto, luego el servomotor S_2 mueve el antebrazo y por último el servomotor S_3 posiciona al brazo y efector final en la coordenada establecida.

En el diseño realizado, al rotar el servomotor S_2 el servomotor S_3 está detenido por lo que el brazo se mantiene estático y forman un ángulo θ , éste no será el mismo que el ángulo m , pero se necesita conocer para determinar el ángulo de giro del servomotor S_3 y se calcula por ángulos alternos e internos que se forman en la Figura 33 y queda de la siguiente manera:

$$\theta = 90 + \gamma - q_2 \quad (29)$$

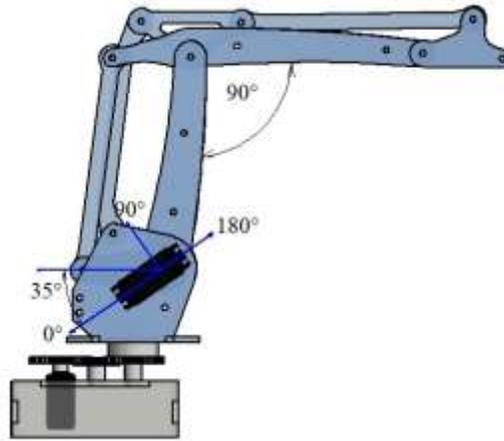


Figura 34. Posición inicial del brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Cuando el brazo robótico está en su posición inicial, el ángulo γ será igual a 90° , este ángulo se forma cuando el servomotor S_3 gira 35° , de lo cual se deduce que para calcular q_3 se toma en cuenta este ángulo y se evalúa si el ángulo θ es mayor o menor que m :

$$\begin{aligned} &\text{Si } \theta > m \\ &q_3 = 35 + (\theta - m) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \text{Si } \theta < m \\ q_3 &= 35 - (m - \theta) \end{aligned} \quad (31)$$

Los tres ángulos obtenidos q_1 , q_2 y q_3 , se utilizarán en la programación para poder posicionar el efector final del brazo robótico en la coordenada de interés establecida por la visión artificial.

2.3. Diseño del sistema de visión artificial

En este proyecto, la visión artificial es la encargada de adquirir, procesar y analizar la imagen del espacio de trabajo donde se encuentra el objeto que se desea soldar. Los elementos necesarios que conforman el sistema son la cámara digital, el espacio de trabajo y el soporte regulable de la cámara. En este apartado no podemos realizar el diseño de la cámara ni del soporte, debido a que éstos se adquieren en el mercado. Para el diseño del espacio de trabajo se utiliza la resolución de la cámara que es 1280 x 720 pixeles. Un pixel es una unidad básica de una imagen digitalizada en pantalla, lo que se expresa de la siguiente manera:

Para dimensionar el espacio de trabajo se toma como referencia la resolución de la cámara y se establece una escala adecuada, para que éste sea enfocado en su totalidad.

La escala para este caso es 1:0.3 y la unidad de medida son milímetros:

$$1280 \times 0.3 = 384mm$$

$$720 \times 0.3 = 216mm$$

Por lo tanto, el espacio de trabajo tiene las dimensiones de 384 x 216 mm, estas medidas son proporcionales a la resolución de la cámara con el fin de obtener coordenadas con el menor porcentaje de error.

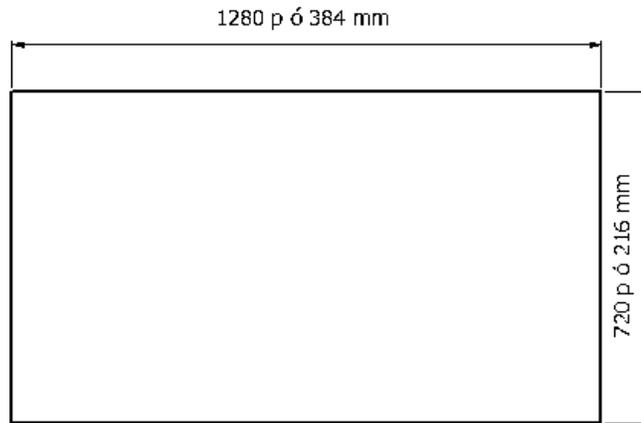


Figura 35. Dimensiones del espacio de trabajo: Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

2.4. Diseño de la base general del prototipo

En la base general se colocan todos los elementos que conforman el prototipo, para ello se toma en cuenta de las dimensiones de los elementos y se establece una medida adecuada para ensamblarlas. Para el diseño se utiliza acero de bajo carbono de 1 mm de espesor.

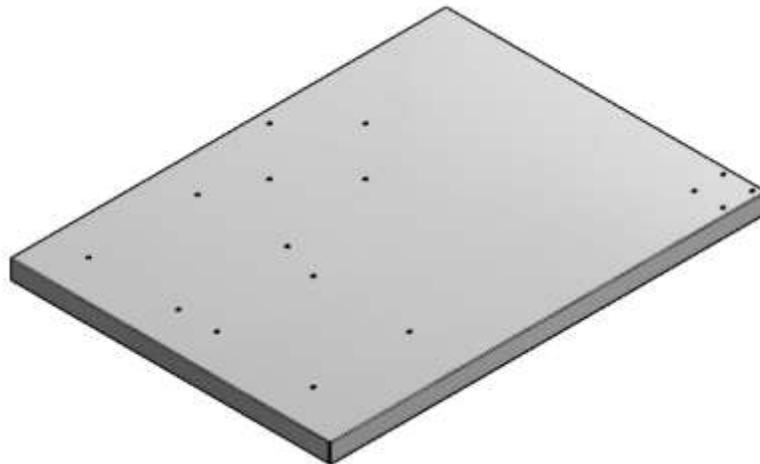


Figura 36. Diseño de la base general. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Con el entorno de chapa metálica de Inventor se creó el desarrollo de la pieza y el contorno para realizar el corte y los pliegues respectivos para obtener la forma de la Figura 37.

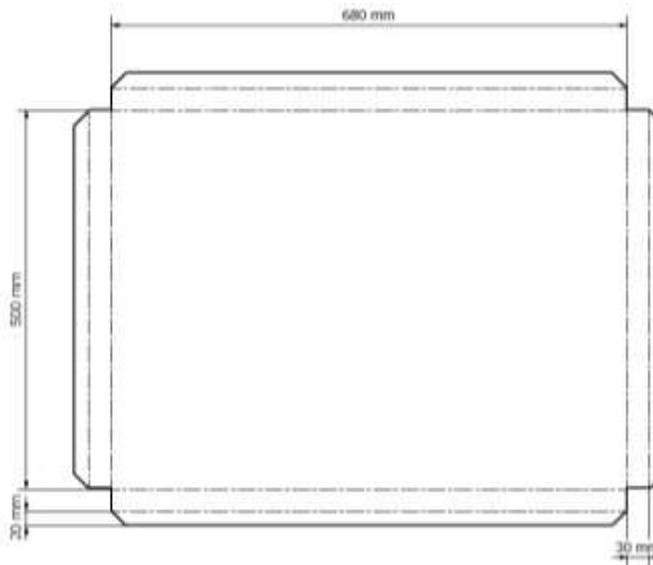


Figura 37. Desarrollo de la base general. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Con la ayuda del software Inventor se ensambló todos los componentes en la base y se renderizó para crear efectos y poder visualizar el prototipo en la realidad.

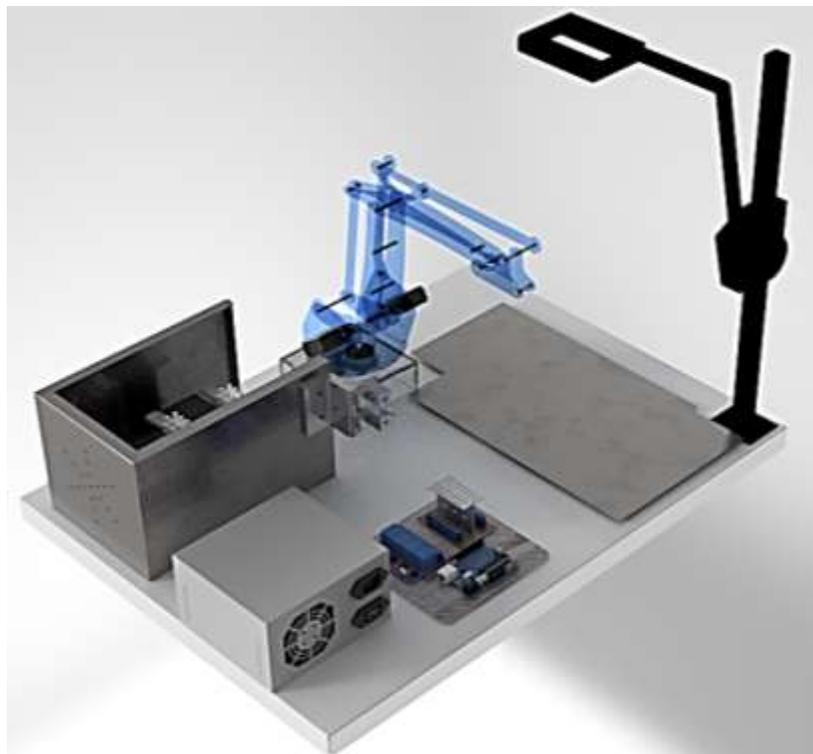


Figura 38. Ensamblaje final y renderizado. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez que el diseño realizado no presenta ningún problema se procede a la construcción del prototipo.

3.1. Construcción del brazo robótico

En la elaboración de la estructura del brazo robótico se usa como material el Acrílico y para su maquinado se emplea una máquina de corte láser.

Para la unión de las partes de la base del brazo robótico se emplearon pernos de 4 mm de diámetro y tuercas de seguridad para evitar que la estructura se desmonte debido a vibraciones. Esta base es una caja que se ensambla con ángulos de sujeción de aluminio.

En la base se monta el servomotor encargado del movimiento rotacional en el plano XY y los engranes respectivos, los cuales están hechos de Duralon. Son tres engranes, dos de 41 dientes y uno de 30 dientes (engrane “loco”). El eje de los engranes se introduce en rodamientos de 6 mm para garantizar que su giro será estable. También se ensamblan ángulos de sujeción en los costados de la base para poder sujetarlo a una superficie más amplia donde va a estar colocado todo el prototipo.

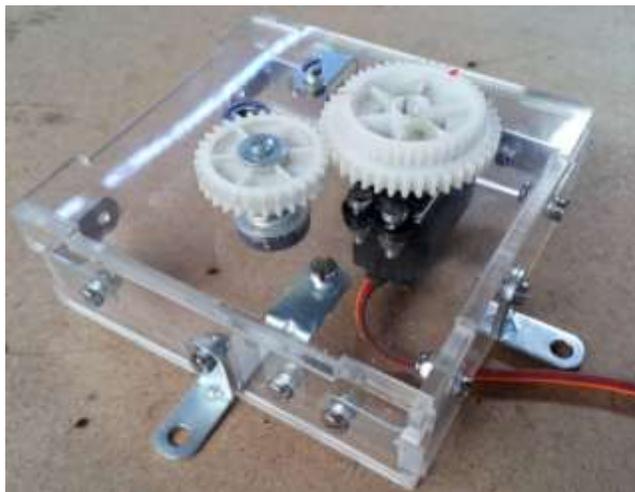


Figura 39. Base del brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para la unión de los eslabones del brazo robótico se utiliza ejes de acero de 4 mm de diámetro y siendo necesario realizar una rosca en los extremos para poderlos ajustar con la tuerca de seguridad, la tarraja que se utilizó para este propósito fue de $M4 \times 0.7$ mm.



Figura 40. Rosca con tarraja en eje de 4 mm. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para la unión se realizan perforaciones de 4.5 mm en las piezas de acrílico.



Figura 41. Perforación de 4.5 mm en las piezas de acrílico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para la unión de los eslabones con el eje del servomotor se emplearon acoples de aluminio, los cuales tienen sistema denominado prisionero para ajustarse con el eje del servomotor.

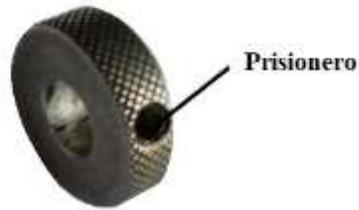


Figura 42. Acople. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

En el eje del servomotor de la derecha se acoplan los eslabones del antebrazo y los eslabones excéntricos del brazo, en uno de los excéntricos se colocó un rodamiento para que su movimiento dependa únicamente del servomotor de la izquierda. Los eslabones se acoplaron al eje con ayuda de los accesorios plásticos propios del servomotor.

En la parte inferior del brazo robótico se colocó un engrane con eje para que la rotación del servomotor de la base se transmita al mecanismo, para esto se toma en cuenta la altura del tren de engranes de la base ya que debe estar perfectamente alineado para evitar el cabeceo al momento de girar.

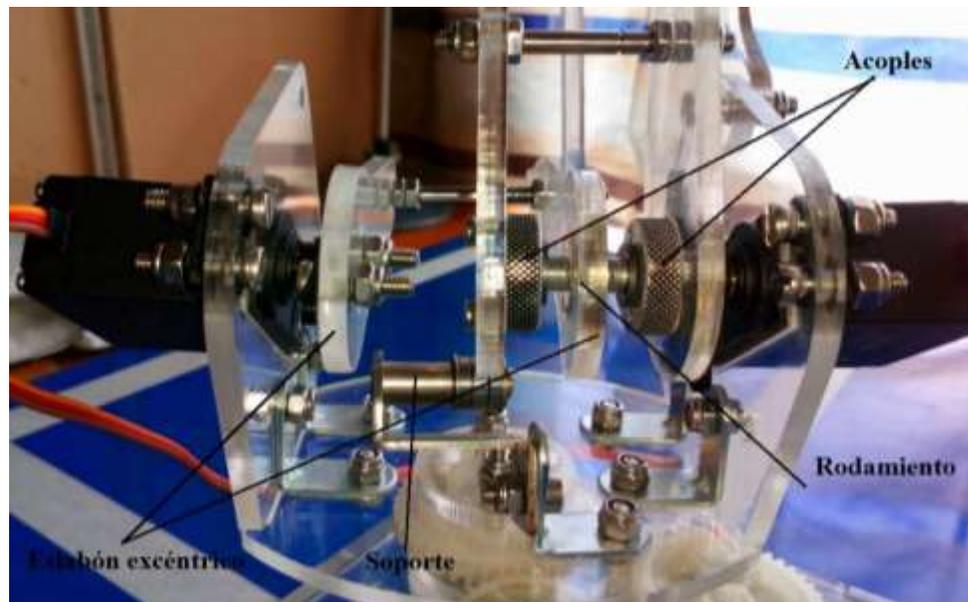


Figura 43. Ensamble de la parte inferior del brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Debido al peso de la estructura, el eje de la derecha se desalineó, así que se colocó un apoyo con rodamientos para que sirva de soporte y el eje esté alineado, uno de los eslabones del antebrazo se desliza sobre el soporte.

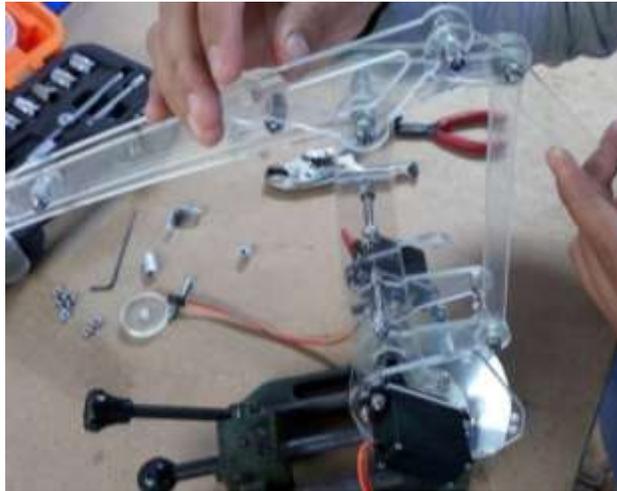


Figura 44. Ensamble parte de arriba del brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para el ensamble de la parte superior del brazo se necesitan realizar separaciones, para ello se usa tubo de aluminio de 4 mm y se corta de acuerdo a la separación de los eslabones paralelos.



Figura 45. Ensamble completo del brazo robótico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Una vez unidas todas las partes del brazo robótico se procede a ajustar las tuercas de seguridad y a verificar que su movimiento sea fluido y estable.

3.2. Construcción del sistema de soldadura por punto

En los cálculos del diseño de la soldadora de punto, se requiere un transformador que en la salida se obtenga 373.33 A, para ello se adquirió un transformador de alto voltaje de la serie GAL-800E-4 de 800 W utilizados comúnmente en los microondas. Se utiliza este modelo de transformador debido a que es un prototipo.



Figura 46. Transformador GAL -800E-4. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Mediante procesos mecánicos se extrajo el bobinado secundario y se lo reemplazo con 3 vueltas de cable flexible de cobre calibre 8 de acuerdo a los cálculos realizados para aumentar la intensidad de corriente y disminuir el voltaje en la salida.



Figura 47. Transformador modificado. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Se construyó una estructura para proteger los componentes de la soldadura de punto, en la cual internamente se encuentra el transformador modificado y un ventilador para el enfriamiento durante el proceso de soldadura.

Primero se realizó el corte de la lámina de acero inoxidable y perforaciones para la admisión de aire en la parte posterior y perforaciones para el ensamble con la base.

Después se procedió a plegar la lámina, generando la forma que se ve en la Figura 48, se colocó el ventilador en la parte trasera y se perforó un agujero en uno de los laterales para la salida de cables.



Figura 48. Estructura de la soldadora de punto. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Adicionalmente, se construyó una bornera y se colocó en uno de los costados de la soldadora de punto, para sujetar los cables de la salida del transformador.



Figura 49. Ensamble de bornera para soldadora de punto. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

En la salida de la soldadora de punto se tiene dos cables de calibre grueso, el primero estará conectado al electrodo y colocado en el efector final del brazo robótico, el segundo se conectará en el espacio de trabajo, que hará la función de “masa” para cerrar el circuito una vez que se proceda a soldar.



Figura 50. “Masa” de la soldadora de punto. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Para la fabricación del electrodo se usó un eje de cobre electrolítico de 8 mm de diámetro y se mecanizó con la ayuda de un torno para obtener la geometría propuesta en el diseño.



Figura 51. Electrodo de cobre electrolítico. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

3.3. Construcción del sistema de visión artificial

Como se vio anteriormente el sistema de visión artificial está directamente relacionado con el procesamiento de imagen, para ello se utiliza una cámara digital marca Genius FaceCam 1000X con las siguientes especificaciones [27]:

- Sensor de imagen: CMOS de pixeles de alta definición 720 p.
- Tipo de lente: objetivo de enfoque manual.
- Resolución: 1280 x 720 pixeles.
- Dimesiones: 20 x 22 x 60 mm

- Puerto USB

Se adquirió un soporte regulable para colocar la cámara y se fabrica una base para soldarla en la parte inferior.



Figura 52. Fabricación de base para soporte de la cámara. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Se cortó una platina, de 5 mm de espesor de acero al carbono, de 50 x 60 mm y se realizan cuatro perforaciones en el centro de la placa para hacer un agujero cuadrado de 20 x 20 mm, para ensamblar el tubo cuadrado del soporte.

Luego se hacen perforaciones de 5.5 mm de diámetro a 8 mm de los lados para empernar con la base general.



Figura 53. Soldadura de la base al soporte de la cámara. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Se soldó la base al soporte de la cámara con un proceso de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) y se ensambla en la base general.



Figura 54. Soporte de cámara ensamblado en la base general. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

El soporte tiene un regulador que permite subir o bajar la cámara y así poder calibrar la imagen, ya que en la base se encuentra delimitado el espacio de trabajo del brazo robótico por lo que la cámara debe enfocar correctamente esta área.

3.4. Construcción de la base general del prototipo

Una vez construidos todos los elementos del prototipo se fabrica la base en donde irá montado todos los componentes construidos. El material que se usó es acero al carbono de 1 mm de espesor y se cortó con las dimensiones establecidas en el diseño, luego se hicieron pliegues con la ayuda de una dobladora de tol con lo que se obtuvo la forma deseada. En la parte interior de la base se colocó triplex de 15 mm de espesor para ayudar a la sujeción de los pernos.

Posteriormente, se realizan perforaciones de 5 mm de diámetro en lugares donde estarán ensambladas las partes del prototipo.



Figura 55. Perforaciones en la base general. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Finalmente, se prepara el metal para aplicar fondo “uniprimer” de color gris y luego se aplica pintura de color gris. Una vez lista la base se empieza a ensamblar todas las partes del prototipo como se ve en la figura.

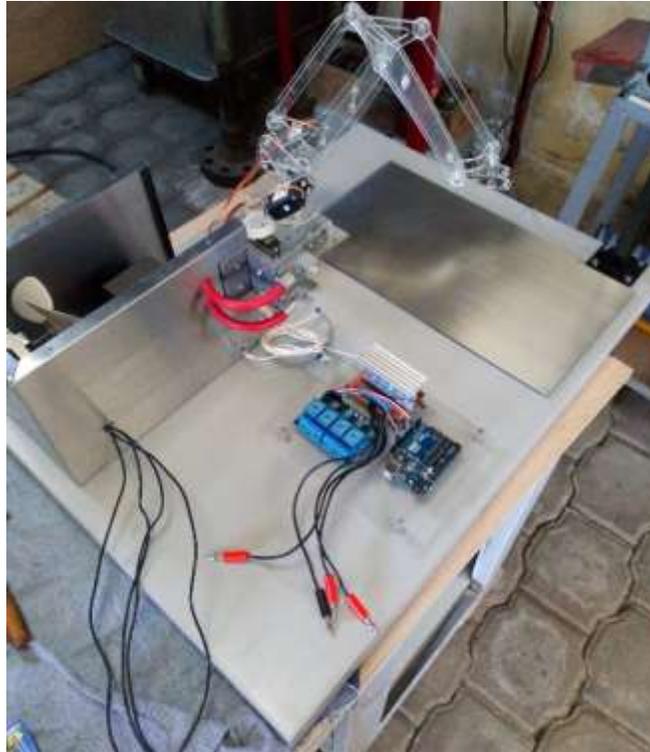


Figura 56. Ensamble de las partes del prototipo en la base general. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

CAPÍTULO IV

HARDWARE Y SOFTWARE PARA CONTROL DEL SISTEMA

Este capítulo hace referencia a los elementos necesarios para el control del sistema, es por ello que se divide en dos partes importantes que son el hardware y software del sistema donde se explica el funcionamiento, las características y comandos de programación utilizados.

4.1. Hardware

El hardware se puede definir como el conjunto de elementos que forman la parte física de un sistema de control. En este caso serían los elementos que se utilizan para controlar el brazo robótico y la soldadura de punto [28].

4.1.1. Placa Arduino

Para el control general del prototipo se utiliza una tarjeta “Arduino UNO”, que es una placa de hardware de uso libre que posee un microcontrolador reprogramable de la serie ATMEGA 328p se incorpora una serie de pines con múltiples usos que permiten conectar de forma muy sencilla actuadores, sensores, etc. [29].



Figura 57. Arduino UNO

El Arduino trabaja con un voltaje de 5 V y una intensidad de 0.5 A, esta tensión y amperaje se obtiene conectando la placa al computador mediante conexión USB.

La conexión USB de la tarjeta Arduino, aparte de servir como medio de alimentación eléctrica, también sirve como un medio de transmisión de datos entre el computador y la placa o viceversa.

La placa Arduino UNO contiene 14 pines de entradas o salidas digitales que se utilizan según convenga, están enumeradas del 0 al 13. En estos pines se conectan actuadores, sensores u otros componentes para que la tarjeta envíe ordenes preestablecidas en la programación. Es importante mencionar que cada pin individual puede entregar o recibir una corriente con un máximo de 400 mA [29].

A continuación, se especifican las razones por las que se escogió la placa Arduino UNO para el control del prototipo:

- Su ambiente de programación es multiplataforma ya que se puede instalar e iniciar en sistemas operativos como: Mac Os, Windows y Linux.
- El lenguaje de programación es fácil de aprender y de utilizar.
- Las placas Arduino son muy accesibles en el mercado y su costo es moderado.
- Son reutilizables y reprogramables es por ello que se puede aprovechar la misma placa para programar diferentes procesos.

4.1.2. Fuente de poder ATX (Advanced Technology Extended)

Es una fuente de alimentación eléctrica encargada de generar la diferencia de potencial necesaria para que fluya la corriente para alimentar el circuito eléctrico del prototipo.

El proceso para transformar la corriente alterna en continua se establece en 4 fases que se analizan a continuación:

- El voltaje de la línea comercial se reduce de 110 V AC a 12 V DC mediante bobinas reductoras.
- Mediante el uso de diodos, se deja pasar solo los valores positivos de la onda para transformar la corriente alterna en continua.

- Por medio del uso de capacitores, se realiza un filtrado, esto quiere decir que se suaviza el voltaje y se mejora la calidad de la corriente.
- Finalmente se estabiliza el voltaje mediante el uso de un circuito integrado.

Cabe mencionar que con la fuente de poder ATX se consigue un voltaje de 12 V de corriente continua (DC).



Figura 58. Fuente ATX [30]

En el prototipo, la fuente ATX tiene la función de alimentar los servomotores de las articulaciones del brazo robótico, debido a que se necesita de una fuente externa, ya que el Arduino no puede suministrar el voltaje y corriente necesarios para los actuadores mencionados.

4.1.3. Módulo regulador de tensión

Como se mencionó anteriormente, la fuente de poder ATX suministra un voltaje de 12 V y los servomotores empleados en el brazo robótico necesitan un voltaje de alimentación de 7 V. Para ello se empleó un regulador de tensión de la serie 7807 para regular los 12 V en 7 V. El regulador de tensión se compone de tres terminales: el primero corresponde al voltaje de entrada, el segundo corresponde a la masa y el tercero corresponde al voltaje de salida regulado. Con ello garantizamos que el voltaje de alimentación de los servomotores sea el indicado para evitar dañar la electrónica de los componentes del prototipo.



Figura 59. Módulo regulador de tensión 7807 [31]

4.1.4. Módulo relé de 4 canales

Un relé es un dispositivo electromagnético que, accionado por una corriente baja por lo general 5 V y 500 mA, abre o cierra un circuito en el cual circula un voltaje mucho más elevado que en el circuito estimulador.



Figura 60. Módulo relé de 4 canales [32]

En el prototipo, la función de los relés será de activar los componentes de la soldadura de punto cuando la placa Arduino UNO envíe la señal, debido a que la soldadora de punto está compuesta por un transformador y por un ventilador encargado de enfriar la zona, ambos alimentados por 110 V, voltaje que no puede suministrar la tarjeta de control.

Es por ello que los relés dan paso al voltaje alto mediante una señal de voltaje enviada por el controlador para encender la soldadora de punto en determinados lapsos de tiempo mediante la programación establecida.

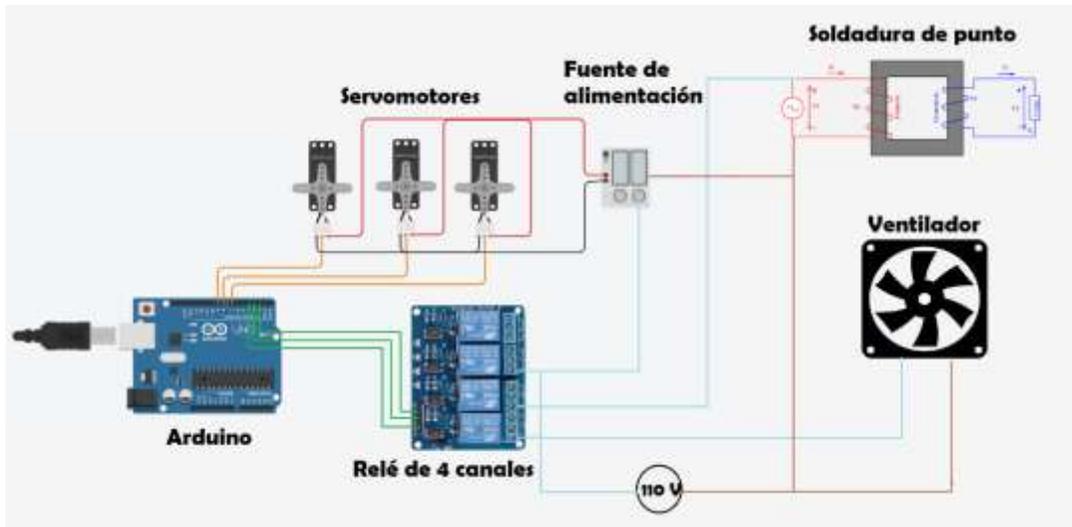


Figura 61. Circuito de control del prototipo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

La placa Arduino, el módulo relé de 4 canales, la fuente ATX y los reguladores de tensión se montan en la base general del prototipo como se muestra en la Figura:

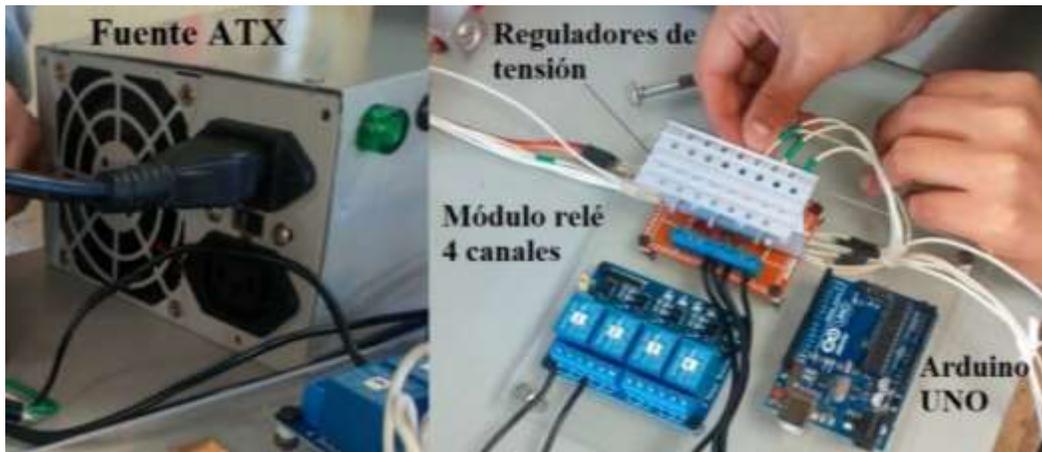


Figura 62. Montaje de hardware del sistema. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

4.2. Software

El software es el equipamiento lógico que está conformado por instrucciones y normas informáticas que permiten ejecutar diferentes tareas en una computadora.

Para la programación de la tarjeta Arduino, se emplea el software de MATLAB, que utiliza un lenguaje de programación matemático de alto nivel integrado con entorno

grafico amigable, procesamiento de imágenes y computación numérica para desarrollar algoritmos matemáticos [33].

4.2.1. Diseño de la interfaz de control (GUI)

GUI o también conocidas como interfaces gráficas de usuario permiten un control sencillo del prototipo, para generar la interfaz se emplea la herramienta GUIDE (Entorno de desarrollo de GUI) de MATLAB, que permite crear interfaces en las cuales se incluyen controles como menús, barra de herramientas, botones y controles deslizantes.

Para acceder a la creación de GUI se escribe el comando “guide” en la ventana de comandos de MATLAB (Command Window). A continuación, se despliega una ventana de opciones y se selecciona “Create New GUI”.

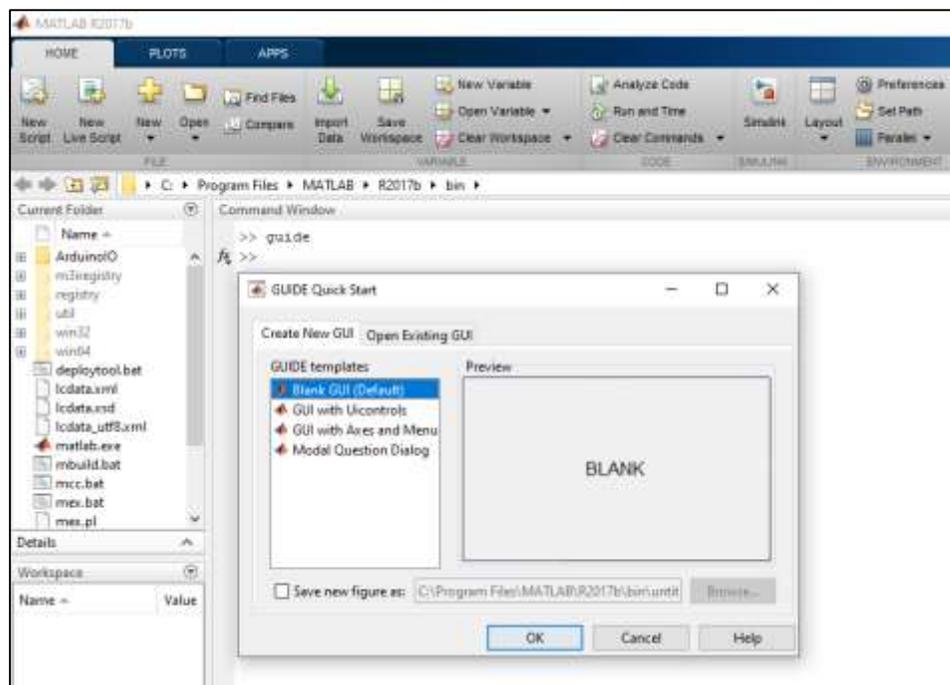


Figura 63. Menú para creación de GUI. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Aparece una nueva ventana en la que se procede a crear la interfaz utilizando los diferentes botones de la barra de herramientas.

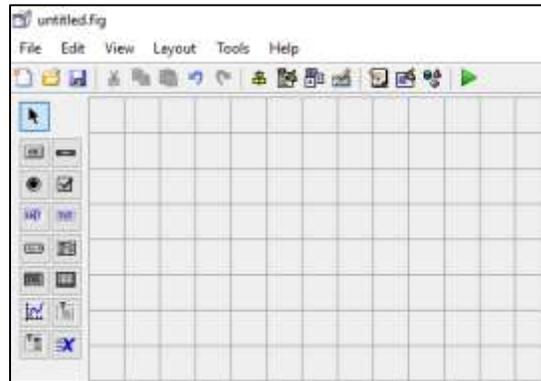


Figura 64. Espacio para crear interfaz. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

La GUI para el control del prototipo se compone de los siguientes elementos:

- Cinco botones principales con las funciones de: “Iniciar Sistema”, “Procesar y Soldar”, “Home Robot”, “Soldar” y “Apagar Sistema”.
- Tres “Slider” para controlar manualmente el brazo robótico, en los cuales se configura el rango de giro de cada servomotor de acuerdo la cinemática inversa.
- También consta de tres “axes”, que son ventanas o cuadros cartesianos que pueden mostrar imágenes, gráficas, videos, etc. El “axes 1” mostrará la imagen en tiempo real del espacio de trabajo, el “axes 2” indica la imagen procesada de los puntos de interés que se requiere soldar y el “axes 3” muestra el logotipo de la institución.
- De igual forma se utiliza cuadros de texto para colocar etiquetas y títulos.

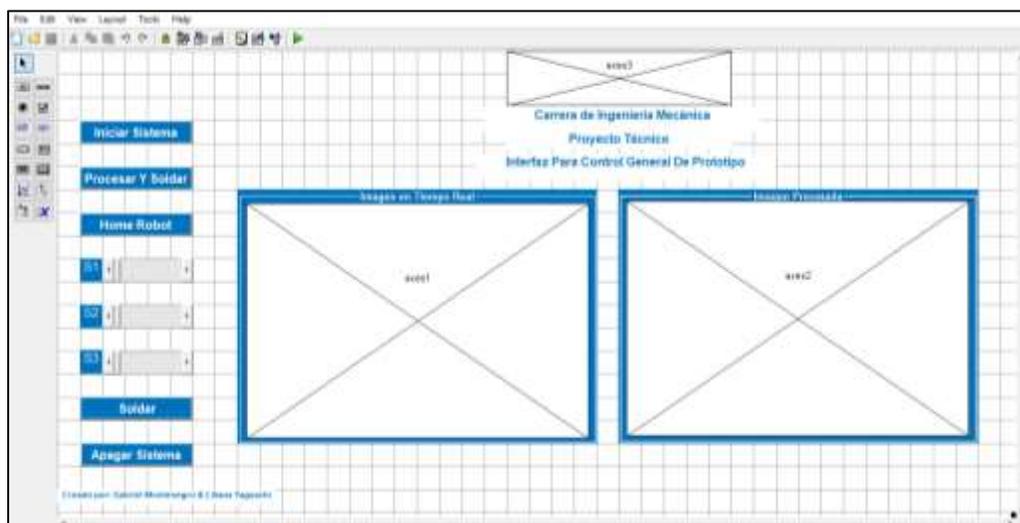


Figura 65. Diseño de interfaz para control del prototipo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana

Yaguachi

Finalmente se proporciona un clic en “Save Figure” y automáticamente se genera un código de MATLAB para realizar la programación de cada una de las funciones. El funcionamiento de la interfaz gráfica para el control del prototipo se explica a continuación:

Cuando se presiona el botón de “Iniciar Sistema”, se establece una conexión entre la interfaz y la placa de Arduino mediante comunicación serial para poder enviar y recibir datos según se requiera. Seguidamente un relé activa la fuente de alimentación y el brazo robótico se coloca en su posición inicial o también denominada como “Home”, después un segundo relé activa el ventilador de la soldadora de punto para enfriar constantemente el transformador, finalmente en el “Axes 1” se proyecta la imagen en tiempo real del espacio de trabajo y a continuación se muestra un mensaje que indica que el sistema está dispuesto para usarse, por lo que el prototipo estaría listo para iniciar sus funciones.



Figura 66. Interfaz iniciada. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Cuando se presiona el botón de “Procesar y Soldar”, la cámara digital adquiere la imagen del espacio de trabajo, enseguida se procesa la imagen de tal manera que en el “Axes 2” se muestra una imagen binarizada únicamente con los puntos de interés que previamente fueron señalados. En la imagen binarizada también se detecta las coordenadas del centroide de los puntos procesados. Las coordenadas detectadas de los centroides de los puntos de interés son enviadas a un algoritmo en el cual se transforman a coordenadas angulares con el fin de posicionar los servomotores en el punto exacto donde se requiere

soldar. Una vez posicionado el brazo robótico, un relé activa la soldadura de punto durante un tiempo determinado para unir las piezas. Este proceso se repite dependiendo del número de puntos de interés encontrados por el sistema.



Figura 67. Procesamiento de imagen. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

El botón “Home Robot” tiene la función de colocar al brazo robótico en su posición inicial en caso de que este colocado en un lugar diferente al momento de realizar la captura de la imagen para evitar obstrucción en la imagen del espacio de trabajo.

Los “Slider” tienen la función del control manual de los servomotores y una vez posicionado el brazo robótico se presiona el botón “Soldar” para realizar la soldadura.

Cuando se presiona el botón “Apagar Sistema”, se desconectan los relés y se apaga la fuente de alimentación, y el sistema de soldadura de punto.

4.2.2. Visión artificial con Matlab

La función de la visión artificial en el prototipo es la de detectar las coordenadas cartesianas en el plano de trabajo XY de los puntos de interés donde se debe ubicar el efector final del brazo robótico para realizar el proceso de soldadura por punto.

En Matlab existen algoritmos para la detección de esquinas de una figura mediante procesamiento de imágenes, pero el problema radica en que puede detectar objetos que no

se requiere soldar, ya sean sombras, reflejos en el espacio de trabajo y en la pieza, por lo que los datos obtenidos serán incorrectos. Por ello se optó por colocar marcas de color rojo en donde se desea soldar para facilitar el procesamiento de la imagen.

Se utilizaron códigos de programación para la detección y adquisición de las coordenadas del centroide de los puntos marcados previamente, con lo que se garantiza que la soldadura se realizará únicamente en los lugares destinados para este proceso, la programación se explica a continuación:

- Primero se declaró una variable global llamada “global video”, esto permite utilizar la variable en toda la programación sin necesidad de llamarla constantemente.
- Posteriormente se programa que en el “axes 1” se muestre la imagen en tiempo real obtenida por la cámara digital 2 instalada en el prototipo, ya que la cámara digital 1 es la frontal del computador, se coloca líneas de programación para adquirir la resolución por defecto de la cámara 2.

```
53 - axes(handles.axes1);  
54 - video=videoinput('winvideo',2);  
55 - video.ReturnedColorSpace='rgb';  
56 - vidRes=get(video,'VideoResolution');  
57 - nBands=get(video,'NumberOfBands');  
58 - himage=image(zeros(vidRes(2),vidRes(1),nBands));  
59 - preview(video,himage);
```

Figura 68. Código de programación para obtención de imagen en tiempo real. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi



Figura 69. Imagen en tiempo real. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

- Para el procesamiento de imagen se declara una variable global llamada “global captura”.
- Luego se obtiene la imagen del espacio de trabajo y se eliminan las tonalidades verde y azul del RGB de la imagen para únicamente extraer la tonalidad roja y mediante un filtro declaramos que se tome en cuenta la tonalidad mayor a 60 en el rango de Rojo (255, 0, 0), para evitar errores o “ruidos” que afecten el procesamiento correcto de los puntos de interés.
- Con la propiedad “regionprops” se obtiene las coordenadas del centroide de los puntos en donde se va a soldar.

```

69 -   captura=getsnapshot(video);
70 -   im_g=rgb2gray(captura);
71 -   imR= double(captura(:,:,1));
72 -   imG= double(captura(:,:,2));
73 -   imB= double(captura(:,:,3));
74 -   bw=imR -imG-imB ;
75 -   ib=bw>60;
76 -   ibf=medfilt2(ib);
77 -   axes(handles.axes2);
78 -   imshow(ibf);
79 -   prop=regionprops(ibf);
80 -   hold on

```

Figura 70. Códigos de programación para el procesamiento de imagen. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

- Una vez procesada la imagen se encierra en un rectángulo y se marca con una “x” el centro de los puntos marcados. Finalmente se muestra la imagen binarizada en el “axes 2”.

```
81 - for n=1:length(prop)
82 -     rectangle('Position',prop(n).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',1);
83 -     x=prop(n).Centroid(1);
84 -     y=prop(n).Centroid(2);
85 -     plot(x,y,'x')
```

Figura 71. Códigos de programación para marcar el centro de los puntos de interés. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

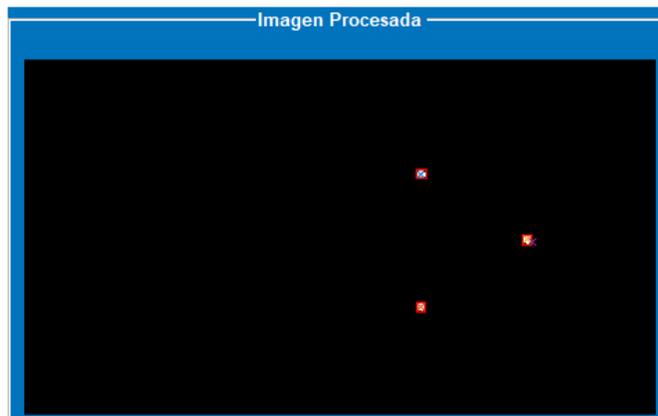


Figura 72. Imagen procesada con los puntos de interés. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

4.2.3. Control de servomotores con Matlab

El control de los servomotores es mediante PWM (modulación por ancho de pulso) y se controlan mediante Arduino, para ellos declaramos la variable “global a”, que es la encargada de la conexión serial entre Matlab y Arduino. También, se declaran las variables globales “s1”, “s2” y “s3” que corresponden a los tres servomotores utilizados. En la programación se especifica la pulsación máxima y mínima de cada servomotor y el pin en el que está conectado en la placa Arduino para enviar las señales.

```

36 - global a
37 - global s1
38 - global s2
39 - global s3
40 - a= arduino;
41 - s1=servo(a,'D7','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',1990*10^-6);
42 - s2=servo(a,'D8','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',2250*10^-6);
43 - s3=servo(a,'D9','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',2250*10^-6);

```

Figura 73. Código para configuración de servomotores. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

El rango de los servomotores utilizados es de 0 a 180°, pero en Matlab no se pueden ingresar dichos valores ya que únicamente admite valores entre 0 y 1 por lo que se hace la siguiente conversión:

Si se requiere que el servomotor gire 45° entonces:

$$\begin{aligned}
 180^\circ &\rightarrow 1 \\
 45^\circ &\rightarrow x = ? \\
 x &= \frac{45^\circ \times 1}{180^\circ} \\
 x &= 0.25
 \end{aligned}$$

Para que el servomotor 1 gire 45° se introduce sentencia “writePosition(s1,0.25)” y de igual manera se realiza el proceso con los demás servomotores de acuerdo al ángulo que se necesite. También se incluyó el control manual de los servomotores por medio de tres “Slider” y la programación es la siguiente:

- En la variable “u” se almacena el ángulo de giro de acuerdo al desplazamiento del “Slider ” con el código “u=get(hObject,'Value)’”.
- El valor almacenado se coloca en la línea de programación para el servomotor y con el código “writePosition(s1,u)” se genera el giro del servo.

4.2.4. Control de relés

La placa Arduino puede enviar únicamente voltaje de 5 V en sus pines de salida, pero la Fuente ATX y el sistema de soldadura funcionan con 110 V, es por ello que se emplean relés que, mediante una señal de 5 V se activan bobinas para dar paso a un voltaje más alto. Para el control de estos elementos con Matlab se utiliza el siguiente código de programación:

- Para activar el relé “writeDigitalPin(a,'D3',0)”
- Para desactivar el relé “writeDigitalPin (a,'D3',1)”

Para la programación del prototipo se utilizan estos códigos de acuerdo a las funciones del prototipo.

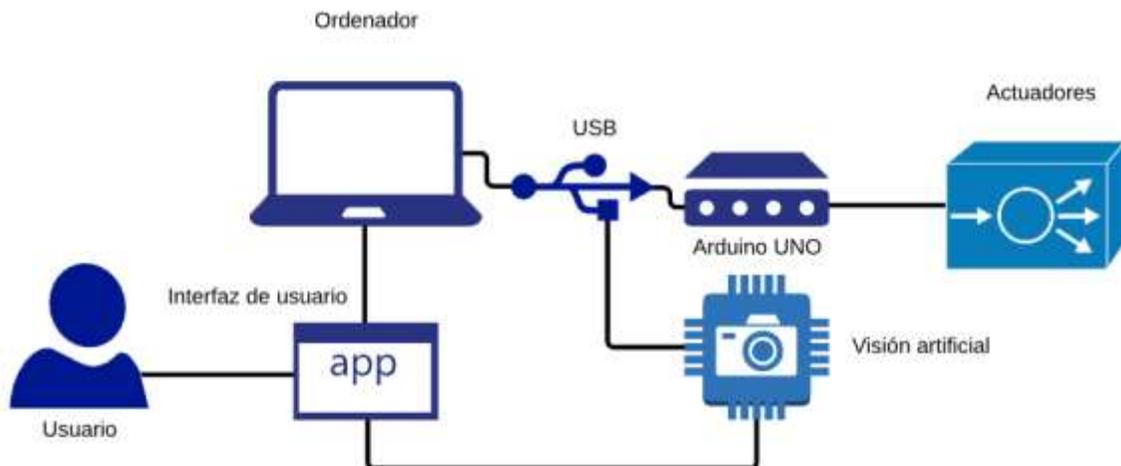


Figura 74. Diagrama de control del sistema. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

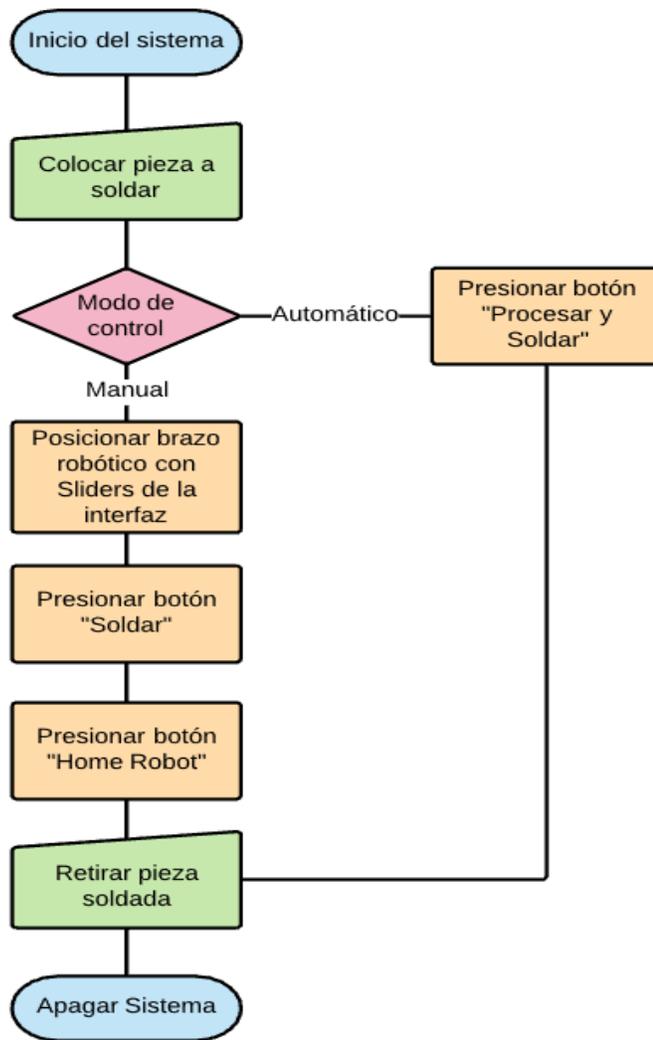


Figura 75. Diagrama de flujo del sistema. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

CAPÍTULO V
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se examinan los resultados que se obtuvieron con las pruebas realizadas al prototipo, tales como: la cinemática inversa, funcionamiento de servomotores, visión artificial y la soldadura de punto.

5.1. Modelo cinemático inverso

Para las pruebas de funcionamiento del brazo robótico antropomórfico de tres grados de libertad, se establecen las coordenadas teóricas que son medidas previamente y son las que se van a introducir en el modelo cinemático inverso para el movimiento de los servomotores. Luego tenemos las coordenadas experimentales, estas son medidas una vez que el brazo robótico haya realizado los movimientos respectivos para llegar a la coordenada dada.

Tabla 10. Ensayos del modelo cinemático inverso

No.	Coordenadas Teóricas		Coordenadas Experimentales		Error Porcentual	
	$x_t(mm)$	$y_t(mm)$	$x_e(mm)$	$y_e(mm)$	Error x	Error y
1	13	12.70	13.3	13	2.31 %	2.36 %
2	15.30	17.35	15.7	17	2.61 %	2.02 %
3	23.10	10.20	23.3	10.4	0.87 %	1.96 %
4	6.55	19.67	6.7	19.8	2.29 %	0.66 %
5	18	16.65	18.2	16.5	1.11 %	0.90 %
6	13.25	13	13.6	13.3	2.64 %	2.31 %
7	12.59	12.27	12.8	12.5	1.67 %	1.87 %
8	11.81	11.45	12	11.3	1.61 %	1.31 %
9	18.24	7.89	18.1	7.7	0.77 %	2.41 %
10	23.45	11.25	23.7	11	1.07 %	2.22

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

5.2. Visión artificial

La visión artificial del sistema procesara la imagen obtenida por la cámara digital del espacio de trabajo para obtener las coordenadas “x” y “y” del centroide de la figura de color rojo que representa el lugar donde se posicionara el efector final del brazo robótico para realizar la soldadura por punto.

La prueba consiste en calcular el error porcentual entre las coordenadas teóricas y las experimentales, para ello se realizaron 10 ensayos y los resultados se observan en la Tabla 11.

Tabla 11. Ensayos de la visión artificial

No.	Coordenadas Teóricas		Coordenadas Experimentales		Error Porcentual	
	$x_t(mm)$	$y_t(mm)$	$x_e(mm)$	$y_e(mm)$	Error x	Error y
1	84	143	84.6	143	0.71%	0.00%
2	203	85	204	86	0.49%	1.18%
3	184	113	184.8	114	0.43%	0.88%
4	300	180	303	179.6	1.00%	0.22%
5	63	187	64.9	185.5	3.02%	0.80%
6	318	163	321	162.2	0.94%	0.49%
7	290	166	290.9	167	0.31%	0.60%
8	177	123	178.3	122.4	0.73%	0.49%
9	205	170	206.9	169.6	0.93%	0.24%
10	225	115	226.1	116	0.49%	0.87%

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Como se observa, existe errores que no superan el 2 % tanto en la coordenada “x” como en la coordenada “y”. Los datos enseñan que la visión artificial funciona correctamente y el punto de soldadura será ubicado en el sitio establecido con un mínimo porcentaje de error.

5.3. Funcionamiento de servomotores

Con las pruebas que se realizó de la cinemática inversa, se observó que en algunas coordenadas el brazo robótico tenía vibraciones y no se colocaba con precisión en los puntos marcados. Debido a esto, se dividió en 6 partes la zona de trabajo para analizar en cuál de ellas el brazo robótico ejerce mayor esfuerzo.

El esfuerzo se puede determinar por el incremento de amperaje en los servomotores con ayuda de una pinza amperimétrica. Las zonas están divididas en los siguientes rangos:

Tabla 12. Rangos de cada zona

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
X(cm)	0-12.8	0-12.8	12.8-25.6	12.8-25.6	25.6-38.4	25.6-38.4
Y(cm)	0-10.8	10.8-21.6	10.8-21.6	0-10.8	0-10.8	10.8-21.6

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

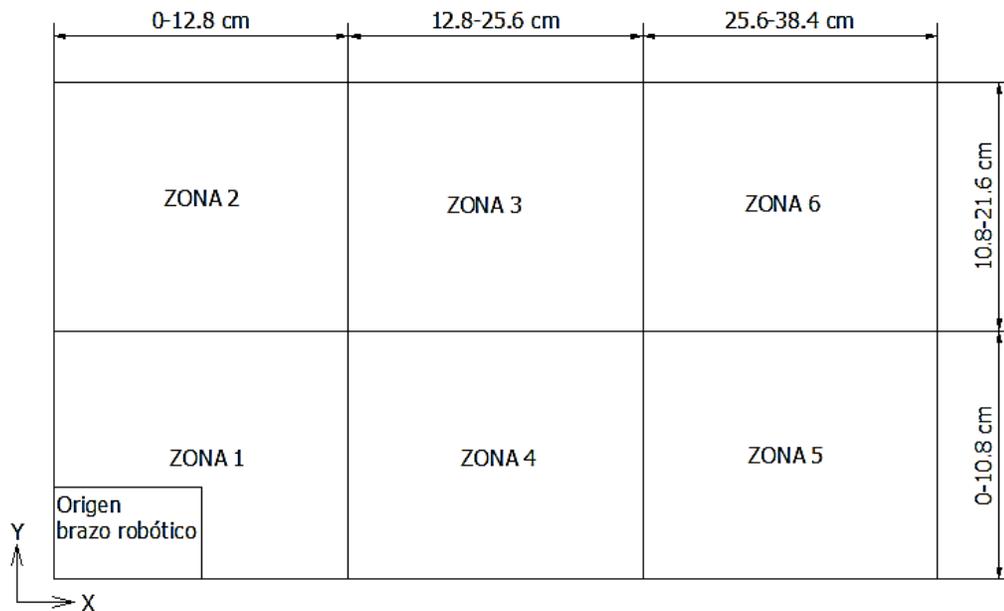


Figura 76. Espacio de trabajo dividido en zonas. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada zona para cada uno de los servomotores:

Tabla 13. Amperajes de servomotores en diferentes zonas

Zona	Coordenada		Servomotor 1 (Amperios)	Servomotor 2 (Amperios)	Servomotor 3 (Amperios)
	x (cm)	y (cm)			
2	7	15	0.11	0.26	0.45
2	9	20	0.115	0.24	0.4
2	12	12	0.12	0.22	0.3
2	4	18	0.1	0.23	0.25
	Promedio		0.11	0.237	0.35
3	16	15.5	0.1	0.31	0.06
3	20	17.5	0.09	0.29	0.1
3	23	13	0.1	0.3	0.12
3	14	20	0.11	0.27	0.08
	Promedio		0.1	0.297	0.09
4	21	6	0.1	0.23	0.44
4	19.5	6.5	0.12	0.28	0.35
4	24	9	0.09	0.25	0.3
4	15	4	0.09	0.22	0.3
	Promedio		0.1	0.245	0.347
5	30	7.5	0.1	0.4	0.79
5	34	9	0.1	0.3	0.95
5	27	5	0.11	0.41	0.9
5	28	3	0.11	0.45	0.95
	Promedio		0.1	0.39	0.89
6	29.8	15.7	0.12	0.4	0.97
6	33	17	0.13	0.5	0.9
6	26.5	18.5	0.12	0.47	0.96
6	27.5	21	0.14	0.5	0.94
	Promedio		0.127	0.467	0.942

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

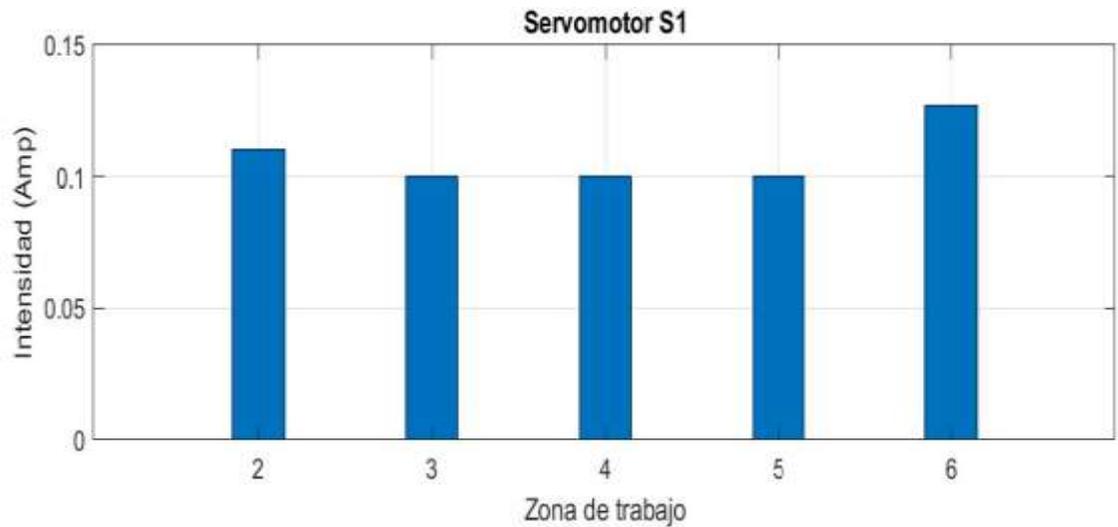


Figura 77. Comportamiento del servomotor S₁. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

Como se observa en la Figura 77 la intensidad de corriente del servomotor S₁ es de 0.1 a 0.12 A, es decir que su variación es baja y el servomotor no realiza un alto esfuerzo, pues según la hoja de datos del actuador el límite de corriente admitida es de 0.5 A.

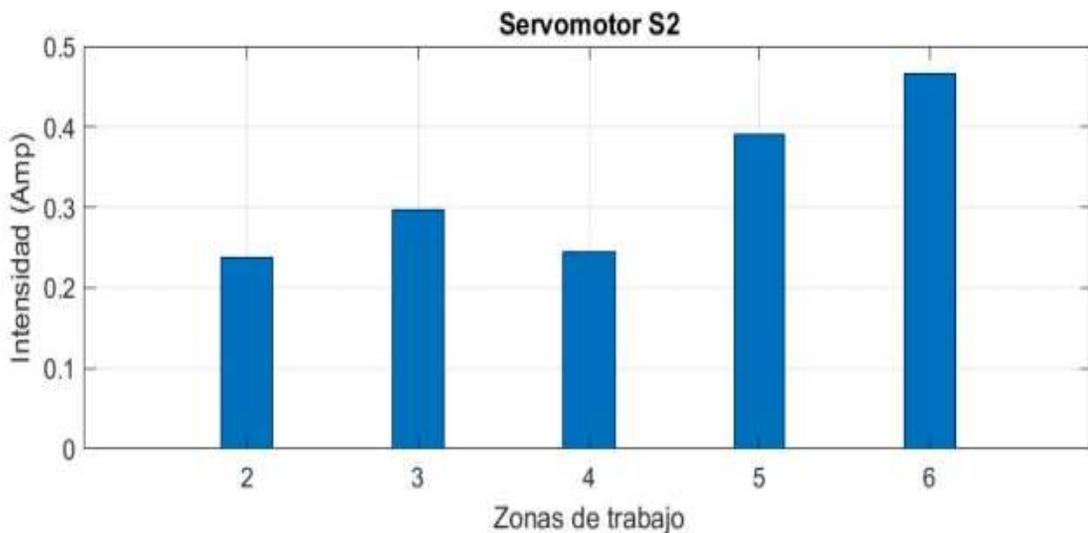


Figura 78. Comportamiento del servomotor S₂. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

En el servomotor S₂ la intensidad de corriente más baja se da en las Zonas 2, 3 y 4 con 0.237, 0.297 y 0.245 respectivamente, por otro lado, en las Zonas 5 y 6 se dan las corrientes más altas que van desde 0.39 a 0.467 A llegando casi al límite permitido.

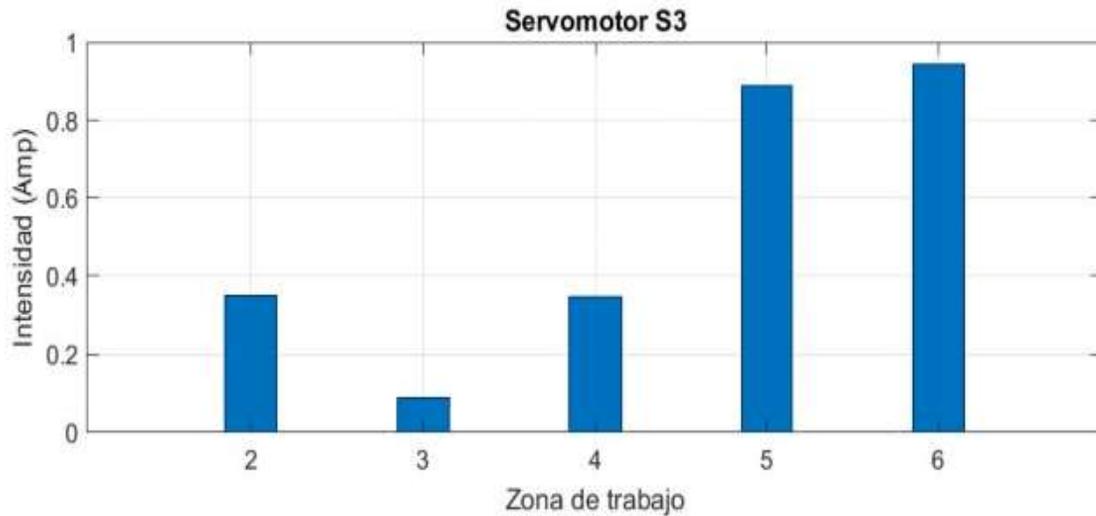


Figura 79. Comportamiento del servomotor S3. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

En las Zonas 5 y 6 incrementa el amperaje hasta 0.942 A lo que provoca que el servomotor S₃ se recaliente y con el uso prolongado se averíe el sistema electrónico. La zona que afectan el desempeño y que ocasionarían daños en el brazo robótico se pueden observar en la Figura 80, siendo el color rojo el de mayor riesgo, naranja riesgo medio y el color celeste bajo riesgo.

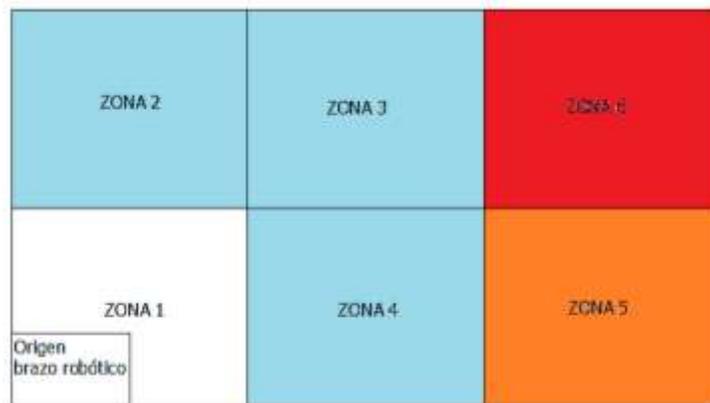


Figura 80. Zonas de riesgo del espacio de trabajo. Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

5.4. Soldadora de punto

Para la fabricación del electrodo de la soldadora de punto se consideraron tres materiales como son el bronce, tungsteno y el cobre. Se analizaron sus propiedades y se realizaron

las pruebas soldando acero de bajo carbono con un espesor de 0.8 mm, los resultados y observaciones se detallan a continuación.

Tabla 14. Ensayos con el electrodo de la soldadora de punto

Propiedades	Material		
	Bronce	Tungsteno	Cobre electrolítico
Conductividad	52 W/m °C	174 W/m °C	401 W/m °C
Punto de Fusión	1020 °C	3387 °C	1085 °C
Corriente	373.33 A	373.33 A	373.33 A
Observación	Requiere mucho tiempo de soldadura debido a que tiene baja conductividad térmica y además este material se desgasta en cada uso.	El material se funde correctamente pero el electrodo se adhiere a la chapa metálica cuando finaliza el proceso de soldadura.	El tiempo de soldadura es menor con respecto al bronce y al tungsteno debido a su excelente conductividad térmica, no sufre ningún desgaste y no se adhiere a la chapa metálica al finalizar el proceso de soldadura.

Elaborado por: Gabriel Montenegro & Liliana Yaguachi

CONCLUSIONES

Para analizar el modelo cinemático inverso, se realizaron una cantidad considerable de pruebas, las cuales arrojaron un error en el movimiento cartesiano de 1.7 % en el eje “x” y en el eje “y” un error de 1.80 %. Este error se debe a la holgura que existe entre los engranes, lo que genera un desfase en el posicionamiento del brazo robótico.

Al realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo, se apreció que las zonas 5 y 6 son críticas para el alcance de los servomotores S_2 y S_3 , debido a que el brazo se extiende casi en su totalidad provocando que el torque necesario para elevar la carga sea alto con respecto al torque con el que cuentan los actuadores, esto genera también que el amperaje incremente en un 41.6 % con relación al límite establecido por el fabricante que es de 0.5 A. Es importante mencionar que, geométricamente el brazo robótico puede colocarse en la zona 5 y 6 pero se provocarían daños eléctricos y mecánicos en los actuadores.

La soladora de punto trabajó con una corriente 373.3 A, esta corriente genera el calor necesario para fundir una chapa de hasta 2 mm de espesor, este valor es sobredimensionado con respecto a las chapas de 0.8 mm que va a soldar el prototipo, el motivo de realizar este ajuste de corriente se debe que al aumentar la temperatura se reduce el tiempo durante el proceso de soldadura.

Para realizar las pruebas de funcionamiento con el módulo de visión artificial en el área de trabajo, se utilizó una zona de acero con acabado superficial de tipo brillante y otra de tipo mate; con el primero se crearon distorsiones, como reflejos y sombras ocasionados por la luz, lo que provocó un procesamiento erróneo de la imagen, al utilizar el acabado mate se eliminaron los problemas antes mencionados obteniéndose así errores considerablemente bajos, alrededor de 0.9 % en el eje “x” y de 0.57% en el eje “y”. El error es provocado por la holgura del soporte regulable, por vibraciones generadas por el movimiento del brazo robótico y por el enfoque de la cámara hacia la zona de trabajo.

RECOMENDACIONES

Para la fabricación de la estructura del prototipo, se recomienda utilizar materiales livianos para disminuir la carga y por ende reducir el torque que deben vencer los actuadores, además, deben ser de fácil maquinado para obtener la geometría deseada con un bajo costo.

Para realizar el modelo cinemático inverso en brazos robóticos de hasta tres grados de libertad, se recomienda utilizar el método geométrico.

Los actuadores que se recomiendan utilizar en las articulaciones de los brazos robóticos son los motores DC con encoder, ya que su precisión y torque son favorables en este tipo de aplicaciones, pero el costo de implementar este sistema es alto, por ello se optó por utilizar servomotores con PWM con lo que se redujo el costo, pero también se disminuyó la precisión y torque de servicio del actuador.

Es importante colocar disipadores de calor en los reguladores de tensión para evitar su sobrecalentamiento y fallas en el sistema.

Para mejorar la fluidez en el movimiento del brazo robótico se recomienda ubicar un polo de la soldadura de punto en la zona de trabajo y el otro polo en el efector final.

El transformador de la soldadora de punto requiere de un ventilador para evitar el calentamiento excesivo de la máquina mientras realiza el proceso.

Este proyecto se puede implementar en la industria no solo para el proceso de soldadura por punto, sino también para realizar procesos con soldadura MIG.

REFERENCIAS

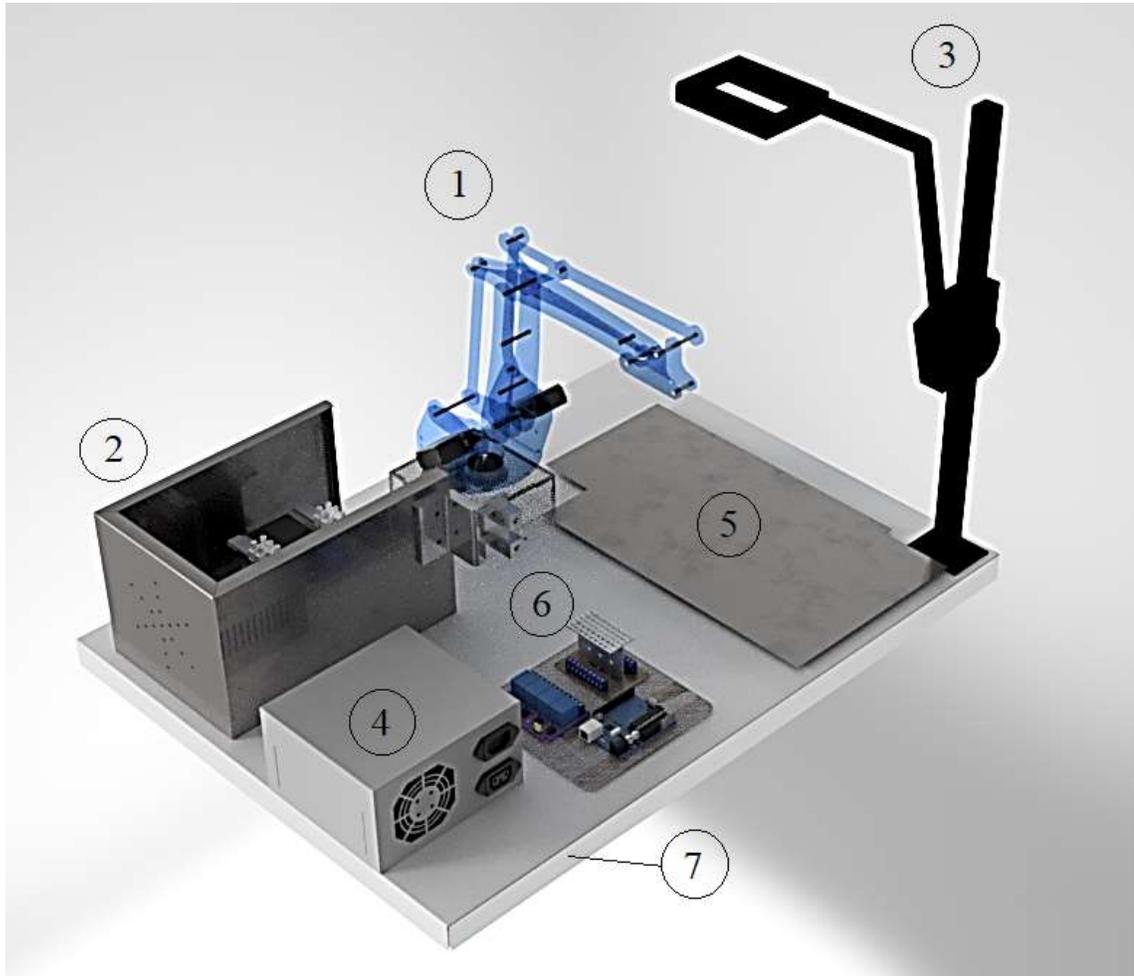
- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, «Kinematics,» de *Robotics: Modelling, Planning and Control*, London, Springer, 2010, pp. 39-103.
- [2] . G. M. Martínez A, S. A. Jáquez O, J. Rivera M y R. Sandoval R, «Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5 GDL,» *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación (RIEE&C)*, vol. 4, n° 1, pp. 9-15, 2008.
- [3] J. J. Craig, *Robótica*, Tercera ed., México: PEARSON, 2006.
- [4] F. Reyes Cortéz , *Robótica: Control de robots manipuladores*, México D.F: Alfaomega, 2015.
- [5] E. L. Arnáez Braschi, *Enfoque práctico de la teoría de robots : Con aplicaciones en Matlab*, Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2015.
- [6] . J. Denavit y R. S. Hartenberg, «A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,» *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, pp. 215-221, 1995.
- [7] D. H. Myszka, *Máquinas y Mecanismos*, Cuarta ed., México: PEARSON, 2012.
- [8] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*, Madrid: Mc Graw Hill, 2007.
- [9] COGNEX, «Introducción a la visión artificial,» *COGNEX (Corporate Headquarters)*, n° 518, p. 24, 2016.
- [10] J. J. Sanabria S y J. F. Archila D, «Detección y análisis de movimiento usando visión artificial,» *Scientia et technica*, vol. 3, n° 49, pp. 180-188, 2011.
- [11] J. A. Sánchez, *Avances en robótica y visión por computador*, La Mancha: COMPOBELL, 2002.
- [12] Disprocar, «El chapista,» 2008. [En línea]. Available: http://www.elchapista.com/soldadura_por_puntos_en_las_carrocerias.html. [Último acceso: 2 Marzo 2019].
- [13] American Welding Society, *Manual de soldadura: Tomo II*, Octava ed., R. L. O'Brien, Ed., México: PEARSON, 1996.
- [14] F. H. Martínez Sarmiento, D. M. Acero Soto y M. Castiblanco Ortiz, *Robótica autónoma: Acercamiento a algunos problemas centrales*, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.

- [15] G. McComb, Robot Builder's Bonanza. TAB Electronics, 2 ed., McGraw-Hill, 2000.
- [16] F. Reyes Cortés, J. Cid Monjaraz y E. Vargas Soto, Mecatrónica: Control y automatización, Primera ed., México: Alfaomega, 2013.
- [17] Electronicos Caldas, [En línea]. Available: <http://www.electronicoscaldas.com/es/motores-y-servos/608-servo-motor-mg995.html>. [Último acceso: 25 Julio 2019].
- [18] C. Platt, Encyclopedia of Electronic Components, Estados Unidos de América: O'REILLY, 2013.
- [19] E. Mandado Pérez, E. López Matos, L. M. Menéndez Fuertes y L. Fernández Ferreira, Microcontroladores PIC: Sistema Integrado para el Autoaprendizaje, Primera ed., Barcelona: Marcombo, 2007.
- [20] I.E.S. Burguillos-Dpto. de Tecnología, Teoría de Arduino 4º ESO, Colombia, 2000.
- [21] S. Ordóñez, «Diseño y construcción de una pinza para soldadura de punto para robot industrial KUKA KR16,» Quito, 2016.
- [22] P. Vallejo Ayala, Física Vectorial Básica, 11 ed., Quito: Gráficas Cobos, 2012.
- [23] Y. U. Cengel y A. J. Ghajar, Transferencia de calor y masa, 3 ed., México: MC Graw Hill, 2011.
- [24] Electrónicos Caldas, «Electrónicos Caldas,» [En línea]. Available: https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG995_Tower-Pro.pdf. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [25] R. G. Budynas y J. K. Nisbet, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Octava ed., México: McGraw-Hill Education, 2008.
- [26] P. Vallejo Ayala y J. Zambrano, Física Vectorial 2, Novena ed., Ecuador: RODIN, 2012.
- [27] Genius, «Genius,» [En línea]. Available: <http://mx.geniusnet.com/product/facecam-1000x>. [Último acceso: 3 Abril 2019].
- [28] J. Porto Pérez y M. Merino, «Definición.de,» 2015. [En línea]. Available: <https://definicion.de/hardware/>. [Último acceso: 1 Agosto 2019].
- [29] Ó. Torrente Artero, ARDUINO: Curso práctico de formación, Madrid: RC Libros, 2013, pp. 64-67.

- [30] PROMETEC, «PROMETEC,» [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/las-fuentes-de-alimentacion-de-pc/>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [31] MOUSER ELECTRONICS, «MOUSER ELECTRONICS,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.mouser.ec/ProductDetail/ROHM-Semiconductor/BA7807CP-E2?qs=Bakm8ERcljp0D%252BecpRGTrg%3D%3D>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [32] Talos Electronics, «Talos Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.taloselectronics.com/products/modulo-relevador-de-4-canales>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [33] J. F. Reyes Cortés, MATLAB aplicado a la robótica y mecatrónica, México: Alfaomega, 2012.

ANEXOS

Anexo 1. Diseño de prototipo y partes principales.



1. Brazo robótico.
2. Soldadora de punto
3. Soporte regulable y cámara para visión artificial.
4. Fuente de alimentación 7 V para servomotores.
5. Zona de trabajo
6. Placa de control: Arduino, relés y reguladores de tensión.
7. Base general del prototipo.

Anexo 2. Programación utilizando el software Matlab para el control del prototipo.

```
function varargout = Interfaz_Control_General(varargin)

gui_Singleton = 1;

gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Interfaz_Control_General_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Interfaz_Control_General_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Interfaz_Control_General_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
l=imread('LogoUPS.png');
image(l);
axis off
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
function varargout = Interfaz_Control_General_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

%Boton 1.- Iniciar Sistema%
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global video
global a
global s1
global s2
global s3
a= arduino;
s1=servo(a,'D7','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',1990*10^-6);
s2=servo(a,'D8','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',2250*10^-6);
s3=servo(a,'D9','MinPulseDuration',600*10^-6,'MaxPulseDuration',2250*10^-6);
writeDigitalPin(a,'D2',0);% encender fuente
writePosition(s1,0);
pause(1);
writePosition(s2,0.5);
pause(1);
writePosition(s3,0.19444);
```

```

pause(2);
writeDigitalPin(a,'D3',0);% encender ventilador
handles.output = hObject;
axes(handles.axes1);
video=videoinput('winvideo',2);
video.ReturnedColorSpace='rgb';
vidRes=get(video,'VideoResolution');
nBands=get(video,'NumberOfBands');
himage=image(zeros(vidRes(2),vidRes(1),nBands));
preview(video,himage);
msgbox(' Sistema iniciado correctamente ', 'Mensaje')

```

% Boton de procesar y soldar%

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global captura
global video
global a
global s1
global s2
global s3
captura=getsnapshot(video);
im_g=rgb2gray(captura);
imR= double(captura(:,:,1));
imG= double(captura(:,:,2));
imB= double(captura(:,:,3));
bw=imR -imG-imB ;
ib=bw>60;
ibf=medfilt2(ib);
axes(handles.axes2);
imshow(ibf);
prop=regionprops(ibf);
hold on
for n=1:length(prop)
    rectangle('Position',prop(n).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',1);
    x=prop(n).Centroid(1);
    y=prop(n).Centroid(2);
    plot(x,y,'x')
    cx=(x*0.03);
    cy=((720-y)*0.03);
w=14.78;
b=15.96;
z=-4;
r=(sqrt((cx^2)+(cy^2)))-7.5;
h=sqrt((r^2)+(z^2));
alfa=((180/pi)*(atan(z/r)));
beta=((180/pi)*(acos(((w^2)+(h^2)-(b^2))/(2*w*h))));
m=((180/pi)*(acos(((w^2)+(b^2)-(h^2))/(2*w*b))));

```

```

e=(180/pi)*(atan(cy/cx));
f=alfa+beta;
q1=e/180;
q2=f/180;
teta=(180-f);
if m<teta
    q3=(teta-m+35)/180;
else
    q3=35-(m-teta)/180;
end
pause(2);
for angle0 = 0:0.015:q1
    writePosition(s1, angle0)
    pause(0.15);
end
pause(2);
writePosition(s2, q2);
pause(2);
for angle2 = 0.1944:0.015:q3
    writePosition(s3, angle2);
    pause(0.15);
end
pause(2);
writeDigitalPin(a,'D4',0);% encender Soldadora
pause(5);
writeDigitalPin(a,'D4',1); %Apagar Soldadora
pause(5);
writePosition(s3,0.1944);
pause(2);
writePosition(s2,0.5);
pause(2);
writePosition(s1,0);
pause(2);
end

% Boton Home Robot%
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a
global s1
global s2
global s3
writePosition(s2,0.5);
pause(1.5);
writePosition(s1,0);
pause(1.5);
writePosition(s3,0.1944);
% Boton Apagar Sistema

```

```

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a
global video
global s1
global s2
global s3
writePosition(s2,0.5);
pause(1.5);
writePosition(s1,0);
pause(1.5);
writePosition(s3,0.19444);
writeDigitalPin(a,'D2',1);% Apagar fuente
pause(1.5);
writeDigitalPin(a,'D3',1);% Apagar ventilador
pause(1.5);
writeDigitalPin(a,'D4',1);% Apagar soldadora
pause(1.5);
clear all ports
close(gcbf)

```

% Boton Soldar%

```

function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a
global s1
global s2
global s3
writeDigitalPin(a,'D4',0);% Encender soldadora
pause(5);
writeDigitalPin(a,'D4',1);% Encender soldadora

```

% Slider servomotor S1%

```

function slider6_Callback(hObject, eventdata, handles)
u=get(hObject,'Value');
global a
global s1
writePosition(s1,u);
function slider6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

```

% Slider servomotor s2%

```

function slider7_Callback(hObject, eventdata, handles)
v=get(hObject,'Value');
k=0.5-v;
global a
global s2

```

```
writePosition(s2,k);  
function slider7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);  
end
```

% Slider servomotor s3%

```
function slider8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
g=get(hObject,'Value');  
global a  
global s3  
writePosition(s3,g);  
function slider8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);  
end
```

Anexo 3. Instrucciones de uso del prototipo

1. Conectar el cable de poder en la línea comercial de 110 V.
2. Conectar los cables USB de la cámara digital y de la placa Arduino Uno en el ordenador a utilizar.
3. Abrir el programa Matlab y ejecutar la interfaz de control de prototipo.
4. Presionar el botón “Iniciar Sistema” y únicamente empezar a utilizar el prototipo cuando se exhiba el mensaje “Sistema iniciado correctamente”.
5. Cuando se requiera finalizar se presiona el botón “Apagar Sistema” y todos los componentes son desconectados y la aplicación se cierra.

Existen dos formas del control del prototipo: Automático y manual.

En el modo automático se realiza el siguiente proceso:

6. Colocar la pieza metálica en el espacio de trabajo y marcar de color rojo los puntos donde se requiere soldar.
7. Presionar el botón “Procesar y Soldar” y esperar que se realice el proceso.
8. Retirar la pieza del espacio de trabajo únicamente cuando se muestre el mensaje “Retirar pieza”.

En el control manual se realiza el siguiente proceso:

9. Colocar el brazo robótico en la posición deseada con la ayuda de los “Sliders”.
10. En el instante que el brazo este posicionado en el punto que se requiere soldar se debe presionar el botón “Soldar”.
11. Culminado el proceso se presiona el botón “Home robot” para que el brazo robótico regrese a su posición inicial o denominada “Home”