



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“Diseño y Construcción de Robots Manipuladores
Reconfigurables”**

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

Que presenta:

Aldo Jesús Parente Rodríguez

Asesor:

Dr. Gilberto González Ávalos

Morelia, Michoacán

Octubre del 2018

Agradecimientos

Quiero agradecer inmensamente a mi familia por apoyarme en cada momento importante de mi vida y que con su gran esfuerzo me han apoyado para realizar cada objetivo que me he propuesto.

A mis amigos cercanos Itzel Fabián, José Jesús, Kareem y Mainor.

A mi asesor el Dr. Gilberto González Ávalos, al cual le tengo un profundo respeto y así mismo admiro su capacidad para defender sus ideales. Le agradezco la paciencia y el buen trato que siempre me ha brindado desde mi etapa como su alumno hasta su asesoramiento para concluir este trabajo.

Agradezco también a todos los profesores que fueron parte fundamental de mi desarrollo como estudiante, ya que gracias a ellos que obtuve la capacidad para realizar este trabajo.

Dedicatoria

Les dedico este trabajo a mis padres por motivarme en los momentos difíciles, por dejarme tomar decisiones propias y por darme siempre un buen ejemplo con valores y con mucho respeto por las personas.

A mi hermano que siempre fue un ejemplo a seguir y por recibirme con los brazos abiertos ante las situaciones de adversidad.

Para mi abuelo Jesús del cual aprendí mucho en sus últimos años de vida.

Resumen

En este trabajo se desarrolló el diseño y construcción de un prototipo a escala de un robot manipulador reconfigurable con tres grados de libertad. El dispositivo tiene la capacidad de poder controlar el movimiento de cada articulación a través de un teclado matricial y una pantalla LCD lo cual permite al usuario interactuar con el prototipo. La estructura del prototipo se construyó en MDF (Tablero de Fibra de Densidad Media), material realizado a partir de los residuos de madera mezclados con resinas sintéticas, y sometido a fuerte presión y calor para formar láminas de diferente grosor. El corte de este material se realizó con una máquina de corte láser a la cual se le introdujo, previamente, el diseño que la máquina debía seguir para realizar el corte. El diseño se realizó en un software de diseño asistido por computadora (CAD) y se hizo contemplando la posibilidad de reconfigurar el dispositivo para poder controlar dos tipos de brazo robótico con el mismo prototipo.

El movimiento de cada articulación la realizan servomotores controlados por una placa Arduino UNO y que a su vez se encarga de recibir los valores del teclado, así como del control de la pantalla LCD. Para comprobar que el dispositivo es funcional, se realizaron pruebas para determinar la cinemática directa aplicando la representación Denavit-Hartenberg, la cual es un proceso matemático que reduce considerablemente la complejidad que otros métodos proponen. Finalmente se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en la práctica y los resultados que las ecuaciones matemáticas arrojan.

Palabras Clave

Cinemática Directa, Tres Grados de Libertad, Representación Denavit-Hartenberg, Brazo Robótico SCARA, Brazo Robótico PUMA.

Abstract

This work developed the design and construction of a scale prototype of a reconfigurable robot manipulator with three degrees of freedom. The device has the ability to control the movement of each joint using a matrix keyboard and a LCD screen that allows the user to interact with the prototype. The structure of the device was built in MDF (Medium-Density Fibreboard), which is made from wood waste mixed with synthetic resins and subjected to strong pressure and heat to form sheets of different thickness. The material was cut with a laser cutting machine to which was introduced, previously, the design that the machine had to follow to make the cut. The design was made in Computer-Aided Design (CAD) software and was made contemplating the possibility of reconfiguring the device to control two types of robotic arm with the same prototype.

The movement of each articulation is done by servomotors controlled by an Arduino UNO board which receives the values of the keyboard and the control of the LCD screen. To verify that the device is functional, tests were performed to determine the forward kinematics by applying the Denavit-Hartenberg convention, a mathematical process that reduces the complexity that other methods propose. Finally, a comparison was made between the results obtained in practice and the results that the mathematical equations showed.

Keywords

Forward Kinematics, Three Degrees of Freedom, Denavit-Hartenberg Parameters, SCARA Robot Arm, PUMA Robot Arm.

Índice

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Palabras Clave.....	iv
Abstract.....	v
Keywords.....	v
Índice.....	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tablas.....	xiii
Glosario de Términos.....	xiv
1 CAPÍTULO 1 Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. La Robótica en la Actualidad.....	3
1.2.1. Aplicaciones Industriales.....	4
1.2.1.1. Trabajos en Fundición.....	4
1.2.1.2. Soldadura.....	5
1.2.1.3. Aplicación de Materiales.....	7
1.2.1.4. Aplicación de Adhesivos y Sellantes.....	8
1.2.1.5. Alimentación de Máquinas.....	9
1.2.1.6. Procesado.....	11
1.2.1.7. Corte.....	12
1.2.1.8. Montaje.....	13
1.2.1.9. Paletización.....	14
1.2.1.10. Control de Calidad.....	16
1.2.1.11. Manipulación en Salas Blancas.....	16
1.2.2. Robots de Servicio.....	17
1.2.2.1. Industria Nuclear.....	19
1.2.2.2. Medicina.....	20
1.2.2.3. Construcción.....	22
1.3. Objetivos.....	23
1.3.1. Objetivo General.....	23

1.3.2.	Objetivos Particulares.....	23
1.4.	Justificación	24
1.5.	Metodología.....	24
1.6.	Contenido de la Tesis.....	25
2	CAPÍTULO 2 Antecedentes de Robots Manipuladores	27
2.1.	Introducción	27
2.2.	Estructura Mecánica de un Robot	32
2.3.	Transmisiones y Reductores	34
2.3.1.	Transmisiones.....	34
2.3.2.	Reductores.....	35
2.4.	Actuadores	36
2.4.1.	Actuadores Neumáticos	37
2.4.2.	Actuadores Hidráulicos.....	38
2.5.	Servomotores Industriales.....	39
2.5.1.	Principios Básicos de Motores Eléctricos	42
2.5.2.	Servomotores de Transmisión Directa	43
2.6.	Cinemática y Dinámica del Brazo Robótico.....	44
2.6.1.	El Problema Cinemático Directo	45
2.6.2.	El Problema Cinemático Inverso.....	45
2.6.3.	Dinámica Del Brazo Robótico	46
2.7.	Planificación de la Trayectoria y Control del Movimiento.....	48
2.7.1.	Consideraciones Generales Sobre la Planificación de la Trayectoria.....	50
3	CAPÍTULO 3 Diseño de Robots Manipuladores Reconfigurables	52
3.1.	Introducción	52
3.2.	Propuesta de Brazos Robóticos.....	53
3.2.1.	Robot Manipulador PUMA	53
3.2.2.	Robot Manipulador SCARA.....	54
3.3.	Descripción General	54
3.3.1.	Eslabones Del Brazo Robótico.....	55
3.3.2.	Módulo de Control.....	56
3.4.	Estructura y Armazón	57
3.4.1.	Diseño Asistido por Computadora del Módulo de Control.....	58
3.4.2.	Diseño Asistido por Computadora de los Eslabones	60
3.4.3.	Corte Láser y Material de la Estructura.....	63

3.5.	Servomotores Electrónicos	66
3.5.1.	Funcionamiento del Servomotor Electrónico	67
3.5.2.	Consumo de Energía.....	68
3.5.3.	Servomotor Futaba S3003 y MicroServo Sg90.....	69
3.6.	Plataforma de Arduino.....	71
3.6.1.	Hardware	71
3.6.2.	Software.....	72
3.6.3.	Ventajas	73
3.7.	Pantalla LCD	74
3.8.	Teclado	75
3.8.1.	Teclado Matricial	75
3.9.	Fuente Externa	77
3.9.1.	Regulador de Voltaje LM317T.....	77
3.9.2.	Diseño de la Fuente para los Servomotores	79
4	CAPÍTULO 4 Implementación y Pruebas.....	82
4.1.	Introducción	82
4.2.	Ensamble de la Estructura.....	83
4.2.1.	Acoplamiento de los Elementos Electrónicos.....	83
4.2.2.	Acoplamientos de los Servomotores	84
4.3.	Implementación del Arduino UNO.....	86
4.3.1.	Conexión de la Pantalla	86
4.3.2.	Conexión del Teclado	87
4.3.3.	Conexión de los Servomotores.....	88
4.4.	Programación del Arduino UNO.....	89
4.4.1.	Encabezado	90
4.4.2.	Función Setup.....	91
4.4.3.	Función Loop.....	91
4.4.4.	Función del Control de los Servomotores	93
4.5.	Prototipo Terminado	97
4.5.1.	Módulo de Control.....	97
4.5.2.	Brazos Robóticos	99
4.5.2.1.	Brazo Robótico SCARA.....	99
4.5.2.2.	Brazo Robótico PUMA.....	100
4.5.3.	Energización del Prototipo	103

4.6.	Representación Denavit-Hartenberg.....	105
4.6.1.	Cinemática Directa del Robot PUMA	108
4.6.2.	Cinemática Directa del Robot SCARA.....	110
4.7.	Comprobación del Modelo.....	111
4.7.1.	Brazo Robótico SCARA	112
4.7.1.1.	Primera Prueba.....	113
4.7.1.2.	Segunda Prueba.....	115
4.7.1.3.	Tercera Prueba.....	117
4.7.2.	Brazo Robótico PUMA.....	119
4.7.2.1.	Primera Prueba.....	120
4.7.2.2.	Segunda Prueba	122
4.7.2.3.	Tercera Prueba.....	123
4.7.3.	Observaciones.....	125
5	CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones.....	126
5.1.	Conclusiones.....	126
5.2.	Recomendaciones	128
5.2.1.	Fuente Externa.....	128
5.2.2.	Arduino	128
5.2.3.	Pantalla	129
5.2.4.	Estructura	129
	Bibliografía.....	130

Lista de Figuras

FIGURAS DEL CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1: ÁREA MULTIDISCIPLINARIA	3
FIGURA 1.2: ROBOT INDUSTRIAL PARA FUNDICIÓN KUKA	5
FIGURA 1.3: ROBOT INDUSTRIAL PARA SOLDADURA ABB.....	6
FIGURA 1.4: ROBOT INDUSTRIAL PARA PINTURA Y REVESTIMIENTO FANUC.....	8
FIGURA 1.5: ROBOT INDUSTRIAL PARA APLICACIÓN DE ADHESIVOS BETAFORCE.....	9
FIGURA 1.6: ROBOT INDUSTRIAL KAWASAKI DE CARGA/DESCARGA.....	10
FIGURA 1.7: ROBOT INDUSTRIAL PARA DESBARBADO FANUC	11
FIGURA 1.8: ROBOT INDUSTRIAL PARA CORTE LÁSER SUNTOP	12
FIGURA 1.9: ROBOT INDUSTRIAL DE MONTAJE DE PRECISIÓN ZBV.....	14
FIGURA 1.10: ROBOT INDUSTRIAL PALETIZADOR TMI.....	15
FIGURA 1.11: ROBOT INDUSTRIAL DE MEDICIÓN LÁSER LEONI	16
FIGURA 1.12: ROBOT INDUSTRIAL PARA SALAS LIMPIAS FANUC	17
FIGURA 1.13: ROBOT PARA ESTACIÓN NUCLEAR TEPCO	19
FIGURA 1.14: ROBOT QUIRÚRGICO DA VINCI.....	21
FIGURA 1.15: ROBOT PARA DEMOLICIÓN BROKK 90	22

FIGURAS DEL CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1: GALLO DE ESTRASBURGO.....	27
FIGURA 2.2: ROBOT COMERCIAL VERSATRAN.....	29
FIGURA 2.3: ROBOT MANIPULADOR SCARA.....	30
FIGURA 2.4: TIPOS DE ARTICULACIONES.....	32
FIGURA 2.5: CONFIGURACIONES MÁS UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA.....	33
FIGURA 2.6: MANIPULADOR ARC MATE 120/S-12 DE FANUC	33
FIGURA 2.7: MOTOR NEUMÁTICO DE ALETAS ROTATIVAS.....	38
FIGURA 2.8: ACTUADOR HIDRÁULICO TIPO CILINDRO.....	38
FIGURA 2.9: SERVOMOTOR ACTUAL PARA USO ROBÓTICO	40
FIGURA 2.10: GENERACIÓN DE SEÑALES TRIFÁSICAS.....	41
FIGURA 2.11: ROBOT DE TRANSMISIÓN DIRECTA DESARROLLADO EN LA BUAP	44

FIGURAS DEL CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1: ESQUEMA ROTACIONAL DEL ROBOT MANIPULADOR PUMA.....	53
FIGURA 3.2: ESQUEMA ROTACIONAL DEL MANIPULADOR SCARA	54
FIGURA 3.3: ESQUEMA DEL BRAZO ROBÓTICO PUMA (PROYECCIÓN ISOMÉTRICA)	55
FIGURA 3.4: ESQUEMA DEL BRAZO SCARA (PROYECCIÓN ISOMÉTRICA)	56
FIGURA 3.5: ESQUEMA DEL MÓDULO DE CONTROL (PROYECCIÓN ISOMÉTRICA)	57
FIGURA 3.6: DISEÑO DE LOS ELEMENTOS CORRESPONDIENTES A LOS LATERALES, PARTE TRASERA Y SUPERIOR DEL MÓDULO DE CONTROL	58
FIGURA 3.7: DISEÑO DE LOS ELEMENTOS CORRESPONDIENTES AL SOPORTE DEL TECLADO, SOPORTE DE LA PANTALLA LCD, LA BASE Y PARTE FRONTAL DEL MÓDULO DE CONTROL	59
FIGURA 3.8: ELEMENTOS CORRESPONDIENTES A LA BASE QUE SOSTIENE LA PRIMERA ARTICULACIÓN	59
FIGURA 3.9: DISEÑO DE LAS PIEZAS CORRESPONDIENTES AL PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO SCARA.....	60

FIGURA 3.10: DISEÑO DEL SEGUNDO Y TERCER ESLABÓN DEL BRAZO SCARA	61
FIGURA 3.11: DISEÑO DEL PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA	62
FIGURA 3.12: DISEÑO DEL SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO PUMA	62
FIGURA 3.13: DISEÑO DEL TERCER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA	63
FIGURA 3.14: PIEZA LATERAL REALIZADA CON CORTE LÁSER	65
FIGURA 3.15: PIEZA TRASERA REALIZADA CON CORTE LÁSER	65
FIGURA 3.16: COMPONENTES DE UN SERVOMOTOR ELECTRÓNICO	66
FIGURA 3.17: COLORES TÍPICOS DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE UN SERVOMOTOR	67
FIGURA 3.18: ANCHOS DE PULSO Y SUS CORRESPONDIENTES POSICIONES	67
FIGURA 3.19: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SERVOMOTOR	68
FIGURA 3.20 SERVOMOTOR FUTABA S3003	70
FIGURA 3.21: MICROSERVO TOWER PRO SG90	71
FIGURA 3.22: PANTALLA LCD DE 16X2 CARACTERES	74
FIGURA 3.23: TECLADO MATRICIAL DE 16 BOTONES	76
FIGURA 3.24: DISTRIBUCIÓN DE PINES DEL TECLADO MATRICIAL	76
FIGURA 3.25: REGULADOR DE VOLTAJE LM317T	77
FIGURA 3.26: ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL REGULADOR LM317T	78
FIGURA 3.27: ESQUEMA DE LA FUENTE Y LOS COMPONENTES QUE LA CONFORMAN	80
FIGURA 3.28: IMPRESIÓN DEL DISEÑO DE LA FUENTE DE VOLTAJE	81

FIGURAS DEL CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1: TORNILLO M3 CON TUERCA	84
FIGURA 4.2: SERVOMOTOR FUTABA S3003 CON ACOPLADOR	84
FIGURA 4.3: ACOPLADORES PARA EL SERVOMOTOR	85
FIGURA 4.4: SUJECIÓN DEL ACOPLADOR A LA ESTRUCTURA	85
FIGURA 4.5: PLACA ARDUINO UNO	86
FIGURA 4.6: CONEXIÓN DEL LCD AL ARDUINO UNO	87
FIGURA 4.7: CONEXIÓN DE LA PANTALLA LCD Y TECLADO MATRICIAL A LA PLACA ARDUINO UNO	88
FIGURA 4.8: CONEXIÓN DE LA PANTALLA LCD, TECLADO MATRICIAL Y CONTROL DE LOS SERVOMOTORES A LA PLACA ARDUINO UNO	89
FIGURA 4.9: VISTA FRONTAL DEL MÓDULO DE CONTROL TERMINADO	97
FIGURA 4.10: VISTA LATERAL DEL MÓDULO DE CONTROL TERMINADO	98
FIGURA 4.11: VISTA TRASERA DEL MÓDULO DE CONTROL TERMINADO	98
FIGURA 4.12: PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO SCARA (VISTA SUPERIOR)	99
FIGURA 4.13: PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO SCARA (VISTA LATERAL)	99
FIGURA 4.14: SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO SCARA (VISTA SUPERIOR)	100
FIGURA 4.15: SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO SCARA (VISTA LATERAL)	100
FIGURA 4.16: PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA SUPERIOR)	101
FIGURA 4.17: PRIMER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA LATERAL DERECHO)	101
FIGURA 4.18: SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA LATERAL DERECHO)	101
FIGURA 4.19: SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA SUPERIOR)	102
FIGURA 4.20 SEGUNDO ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA LATERAL IZQUIERDO)	102
FIGURA 4.21: TERCER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA LATERAL IZQUIERDO)	102
FIGURA 4.22: TERCER ESLABÓN DEL BRAZO PUMA (VISTA SUPERIOR)	103
FIGURA 4.23: ELIMINADOR DE 9V A 1A	103

FIGURA 4.24: ELIMINADOR DE 12V A 2A.....	103
FIGURA 4.25: ALIMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	104
FIGURA 4.26: PANTALLA DE BIENVENIDA DEL PROTOTIPO	104
FIGURA 4.27: MENÚ DE LAS ARTICULACIONES	105
FIGURA 4.28: INTERFAZ DE LA PRIMERA ARTICULACIÓN	105
FIGURA 4.29: PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG PARA UNA ARTICULACIÓN ROTATIVA	107
FIGURA 4.30: EJES DE LAS ARTICULACIONES DE UN MANIPULADOR ANTROPOMÓRFICO	108
FIGURA 4.31: EJES CONVENCIONALES (EMPLEADOS POR EL USUARIO).....	111
FIGURA 4.32: EJES ESTABLECIDOS POR EL CRITERIO DENAVIT-HARTENBERG (MODELO MATEMÁTICO).....	112
FIGURA 4.33: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INGRESADOS POR EL USUARIO (PRIMERA PRUEBA).....	113
FIGURA 4.34: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO SCARA. PRIMERA PRUEBA (VISTA SUPERIOR).....	113
FIGURA 4.35: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO SCARA. PRIMERA PRUEBA (VISTA LATERAL).....	114
FIGURA 4.36: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INGRESADOS POR EL USUARIO (SEGUNDA PRUEBA)	115
FIGURA 4.37: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO SCARA (SEGUNDA PRUEBA)	116
FIGURA 4. 38: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INGRESADOS POR EL USUARIO (TERCERA PRUEBA).....	117
FIGURA 4.39: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO SCARA. TERCERA PRUEBA (VISTA SUPERIOR).....	117
FIGURA 4.40: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO SCARA. TERCERA PRUEBA (VISTA LATERAL)	118
FIGURA 4.41: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INGRESADOS POR EL USUARIO (PRIMERA PRUEBA).....	120
FIGURA 4.42: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO PUMA (PRIMERA PRUEBA)	120
FIGURA 4.43: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INTRODUCIDOS POR EL USUARIO (SEGUNDA PRUEBA).....	122
FIGURA 4.44: POSICIÓN FINAL DEL PROTOTIPO PUMA (SEGUNDA PRUEBA).....	122
FIGURA 4.45: PANTALLA DE LOS ÁNGULOS INTRODUCIDOS POR EL USUARIO (TERCERA PRUEBA)	124
FIGURA 4.46: POSICIÓN FINAL DEL DISPOSITIVO PUMA (TERCERA PRUEBA)	124

Lista de Tablas

TABLAS DEL CAPÍTULO 2

TABLA 2.1: ACONTECIMIENTOS IMPORTANTES EN LA ROBÓTICA.....	31
TABLA 2.2: DESCRIPCIÓN DE LAS TRANSMISIONES COMUNES.....	35
TABLA 2.3: VALORES ACEPTADOS EN REDUCTORES PARA ROBÓTICA	36
TABLA 2.4: MODOS DE CONTROL DE UN MANIPULADOR	48

TABLAS DEL CAPÍTULO 3

TABLA 3.1: ESPECIFICACIONES DEL SERVOMOTOR FUTABA S3003	69
TABLA 3.2: ESPECIFICACIONES DEL MICROSERVO TOWER PRO SG90	70
TABLA 3.3: COMPONENTES DE LA FUENTE DE VOLTAJE	79

TABLAS DEL CAPÍTULO 4

TABLA 4.1: MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	83
TABLA 4.2: PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG DEL ROBOT PUMA.....	109
TABLA 4.3: PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG DEL ROBOT SCARA	110
TABLA 4.4: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG DEL ROBOT SCARA.....	112
TABLA 4.5: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. SCARA (PRIMERA PRUEBA)	114
TABLA 4.6: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. SCARA (SEGUNDA PRUEBA)	116
TABLA 4.7: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. SCARA (TERCERA PRUEBA)	118
TABLA 4.8: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG DEL ROBOT PUMA	120
TABLA 4.9: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. PUMA (PRIMERA PRUEBA)	121
TABLA 4.10: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. PUMA (SEGUNDA PRUEBA).....	123
TABLA 4.11: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG. PUMA (TERCERA PRUEBA).....	124

Glosario de Términos

C

Código Abierto: Software cuyo código fuente es parte del dominio público. . 71

Control Numérico Computarizado: Dispositivo que realiza una determinada tarea siguiendo el patrón de un diseño asistido por computadora..... 57

E

Efecto Final: Dispositivo en el extremo de un brazo robótico que interactúa con el ambiente..... 53

Eslabones: Estructuras sólidas unidas entre sí por las articulaciones..... 55

G

Grados de Libertad: Número de articulaciones de un brazo robótico. ... 55

M

Movimiento Prismático: Movimiento lineal realizado por ciertas articulaciones del robot manipulador..... 32

Movimiento de Rotación: Movimiento generado de forma circular sobre el eje del motor. 32

P

Paletización: Colocación de mercancías sobre una superficie. 14

Palpador: Dispositivo transductor para evaluar un objeto a través del tacto... 16

Problema Cinemático Directo: Técnica para determinar la posición final de un brazo robótico..... 45

Problema Cinemático Inverso: Técnica que permite determinar las coordenadas articulares para obtener una posición.45

R

Robot Industrial: Dispositivos que realizan trabajos específicos en los procesos industriales..... 8

S

Servomotores: Motores eléctricos con la capacidad de controlar su posición o su velocidad..... 66

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La palabra robot fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karel Capek [1890-1938] estrena en el teatro nacional de Praga su obra *Rossum's Universal Robot*. Su origen es la palabra eslava «robot», que se refiere al trabajo de manera forzada. Estos robots eran máquinas andróides fabricadas a partir de la “fórmula” obtenida por un brillante científico llamado Rossum. Los robots servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños destruyendo toda la vida humana excepto a uno de sus creadores con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse.

El término posiblemente hubiera caído en desuso si no hubiese sido por los escritores del género de ciencia ficción, algunos de los cuales retomaron la palabra e incluso el mensaje de la obra de Capek: la dominación de la especie humana por seres hechos a su propia imagen. Pero sin duda alguna, fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov [1920-1992] el máximo impulsor de la palabra «robot». En octubre de 1945 publicó en la revista *Galaxy Science Fiction* una historia en la que por primera vez anunció sus tres leyes de la robótica:

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

Así pues, se le atribuye a Asimov la creación del término robótica y sin lugar a duda, desde su obra literaria, ha contribuido decisivamente a la divulgación y difusión de la robótica. [1]

Durante los últimos cincuenta años, la robótica no sólo ha incursionado en la industria, centros de investigación, universidades y hospitales, ya que actualmente existen fábricas completamente automatizadas mediante robots manipuladores. Hoy en día, la robótica es tan familiar que se pueden encontrar robots en el hogar realizando tareas domésticas. No obstante, se considera un área joven y en constante crecimiento.

La naturaleza multidisciplinaria de la robótica permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, electrónica, computación, mecánica, visión e inteligencia artificial, entre otras. Por otro lado, aun cuando la robótica es un área experimental, todos sus resultados están sustentados con un estricto rigor científico.

Existen varias definiciones para describir a un robot. Entre todas ellas, la que proporciona una mejor descripción es la adoptada por el Robot Institute of America [RIA] la cual establece:

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.

Desde el punto de vista científico, los robots manipuladores como objetos de estudio ofrecen un amplio espectro en la formulación de problemas teórico-prácticos debido a la naturaleza no lineal y multivariable de su comportamiento dinámico. Los robots han tenido gran aceptación en la industria, al grado de que se han convertido en pieza fundamental para el proceso de automatización industrial, debido a los beneficios que han traído consigo tales como reducción de costos, incremento de productividad, mejoramiento de la calidad del producto y reducción de problemas en ambientes peligrosos para el ser humano como, por ejemplo, ambientes radioactivos.

Entre las principales áreas que se cultivan en robótica se encuentran: control de movimiento, diseño de ambientes de programación, inteligencia artificial, sensores, visión, planificación y coordinación, entre otras. Los robots manipuladores representan nuevas fronteras para el desarrollo y bienestar de la sociedad, son piezas clave de la modernización tecnológica y han representado un factor clave en la economía mundial.

Las aplicaciones que por el momento lideran la utilización de la robótica son aquellas en las que la precisión juega un papel clave como, por ejemplo, teleoperación, medicina, agricultura, operaciones espaciales y manufactura. [2]

1.2. La Robótica en la Actualidad

La robótica es un área que aborda el análisis, desarrollo de robots y sus potenciales aplicaciones. Hoy en día, se ha convertido en un área estratégica y clave para todo país en desarrollo ya que es sinónimo de modernización. Dentro del sector industrial todos los procesos productivos se encuentran automatizados a través de robots. Industrias como armadoras automotrices, fundidoras, alimentos, maquiladoras, etc., emplean robots manipuladores como tecnología indispensable debido a que elevan la productividad y calidad del producto que está destinado al consumidor. La rentabilidad y viabilidad de empresas está en manos de la robótica.

Dentro del sector salud, operaciones peligrosas que antaño eran sumamente complicadas, hoy en día resultan relativamente simples gracias al empleo de robots manipuladores que se han convertido en herramientas sofisticadas de alta precisión y desempeño, circunstancia

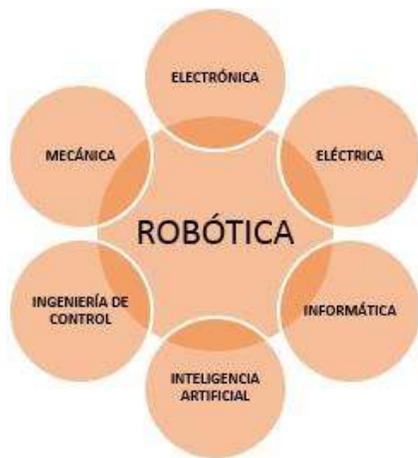


Figura 1.1: Área Multidisciplinaria

que ha proporcionado una mejor esperanza de vida a los pacientes. El empleo de robots en aplicaciones de fisioterapia asistida por robótica es otro escenario donde los robots han ganado terreno y popularidad. Como una referencia de importancia que ha tenido la robótica a nivel internacional se tiene que una gran cantidad de escuelas, universidades latinoamericanas, europeas, norteamericanas, asiáticas desde el nivel medio superior, hasta doctorado, cultivan como carrera o especialidad el área de la robótica. México no es la excepción, ya que universidades y centros de investigación de al menos 29 entidades federativas la incluyen en el plan de estudios o realizan investigaciones en robótica. Como se muestra en la **figura 1.1**, por su característica multidisciplinaria, la

robótica requiere desarrollar habilidades y conocimiento. Estudiar robótica implica conocer diversos idiomas, así como la capacidad para trabajar en equipo y poseer sólidos conocimientos de las ciencias exactas e ingeniería. Como disciplina no sólo es tecnología y conocimientos, también involucra arte y cultura, pues es de estas últimas de donde nace este campo. [2]

1.2.1. Aplicaciones Industriales

La implantación de un robot industrial en un determinado proceso exige un detallado estudio previo del proceso en cuestión, examinando las ventajas e inconvenientes que conlleva la introducción del robot.

Será preciso siempre estar dispuesto a admitir cambios en el desarrollo del proceso primitivo (modificaciones en el diseño de piezas, sustitución de unos sistemas por otros, etc.) que faciliten y hagan viable la introducción del robot.

En cuanto al tipo de robot a utilizar, se deberá considerar aspectos de diversa índole como área de acción, velocidad de carga, capacidad de control, coste, etc.

En la actualidad, ciertas aplicaciones industriales cuentan con suficiente experiencia en su robotización como para poder fijar unas líneas generales en cuanto a las posibilidades reales del robot en ellas, así como a las dificultades, cambios y ventajas a las que la introducción del robot puede dar lugar. El primer proceso robotizado, la fundición inyectada, instalado en la General Motors en 1960, cuenta con el tiempo suficiente para poder analizar las ventajas y desventajas de su implementación.

Actualmente, los campos en los que los robots manipuladores se desempeñan es amplio, a pesar de seguir en constante crecimiento, por lo que se analizarán algunas de las aplicaciones industriales de robots dando una breve descripción del proceso, exponiendo el modo en el que el robot entra a formar parte del proceso, así como el análisis de las ventajas e inconvenientes.

1.2.1.1. Trabajos en Fundición

En este proceso, el material usado que se encuentra en estado líquido es inyectado a presión directamente al molde. Este último está formado por dos mitades que se mantienen unidas durante la inyección del líquido mediante la presión ejercida por dos cilindros. La pieza solidificada se extrae del molde y se enfría para su posterior desbarbado. El molde, una vez limpio de residuos y lubricado correctamente, puede ser utilizado de nuevo.

En la fundición por inyección, el robot puede realizar diversas tareas auxiliares como son:

- Extracción de piezas del molde, así como el transporte de estas a un lugar de enfriado y posteriormente a otro proceso.
- Limpieza y mantenimiento de los moldes eliminando rebabas (por aplicación de aire comprimido) y aplicando el lubricante.
- Colocación de piezas en el interior de los moldes.

Las cargas manejadas por los robots en estas tareas suelen ser de medias a altas (por encima de diez kilogramos), no necesitan una gran precisión a menos que sean empleados para el acomodo de piezas en el interior de los moldes y su campo de acción ha de ser grande. Su sistema de control generalmente es sencillo basado en movimientos articulares y polares.

Otro proceso de fundición es la denominada fundición a la cera perdida, por microfundición o a la cáscara. Este sistema permite fundir piezas con gran precisión y buen acabado superficial.



Figura 1.2: Robot Industrial para Fundición KUKA

En este proceso, el robot puede realizar las tareas relativas a la formación del molde de material refractario a partir del modelo de cera, por sucesivas inmersiones controladas en baños de arenas refractarias. El robot, dotado de una pinza especial, recoge un racimo de modelos y los introduce en una masa de grano fino, intercalando extracciones y centrifugaciones para conseguir un reparto uniforme del recubrimiento. Varios robots en serie pueden ir introduciendo secuencialmente los racimos en diferentes tipos de arenas y, por último, en un horno para lograr un proceso lineal de fabricación de moldes.

En la **figura 1.2** se observa la imagen de un robot manipulador de la desarrolladora KUKA, empresa alemana y uno de los principales fabricantes de robots industriales a nivel mundial. El manipulador de la imagen en cuestión es, un robot industrial de seis grados de libertad empleado en tareas de fundición.

1.2.1.2. Soldadura

La industria automovilística ha sido la gran impulsora de la robótica industrial, empleando la mayor parte de los robots hoy en día instalados. La tarea robotizada que frecuentemente se encuentra dentro de la fabricación de automóviles es, sin duda alguna, la soldadura de carrocerías. En este proceso, dos piezas metálicas se unen en un punto por la fusión conjunta de ambas partes, denominándose a éste tipo de soldadura por puntos.

Para ello, se hace pasar una corriente eléctrica de elevada intensidad (1500 A) y baja tensión a través de dos electrodos enfrentados entre los que se sitúan las piezas a unir. Los electrodos instalados en una pinza de soldadura, deben sujetar las piezas con una presión determinada, además, deben ser controlados los niveles de tensión e intensidad necesarios, así como el tiempo de aplicación. Todo ello exige el empleo de un sistema de control del proceso de soldadura.

La robotización de la soldadura por puntos admite dos soluciones: el robot transporta la pieza presentándola a los electrodos que están fijos, o bien, el robot transporta la pinza de soldadura posicionando los electrodos en el punto exacto de la pieza en la que se desea realizar la soldadura. El optar por uno u otro método depende del tamaño, peso y manejabilidad de las piezas.

En las grandes líneas de soldadura de carrocerías de automóviles, estas pasan secuencialmente por varios robots frecuentemente situados a manera de pasillo. Una vez colocada la carrocería en el pasillo, los robots, de manera coordinada, posicionan las pinzas de soldadura realizando varios puntos consecutivamente. Los robots de soldadura por puntos precisan capacidad de carga del orden de los 50-100 kilogramos, y una estructura articular con suficientes grados de libertad como para posicionar y orientar la pinza de soldadura en lugares de difícil acceso. En cuanto al control, suele ser suficiente con un control punto a punto.

El otro tipo de soldadura, también ampliamente robotizado aunque en menor grado que el anterior, es el de soldadura por arco en el que se unen dos piezas mediante la aportación de un flujo de material fundido procedente de una varilla de metal (electrodo). Un arco eléctrico, entre la pieza a soldar y el electrodo, origina las altas temperaturas que funden este último. La **figura 1.3** muestra a un robot desempeñando la soldadura por arco, el cual, pertenece a la compañía alemana KUKA y es empleado para unir componentes de automóviles.



Figura 1.3: Robot Industrial para Soldadura ABB

La calidad de la soldadura depende de la distancia entre la pieza y el electrodo, de la velocidad de desplazamiento del mismo sobre la trayectoria de soldadura, la tensión e intensidad empleadas, del ángulo de ataque del electrodo, etc.

La dificultad de mantener constantes las variables antes citadas, junto con el ambiente poco agradable en el que se desarrolla la soldadura como la radiación ultravioleta, el humo, las chispas entre otras, propician que el robot sustituya al hombre en este proceso.

Algunos fabricantes han dotado a las unidades de control de sus robots, con instrucciones especiales para efectuar la soldadura por arco, pudiéndose especificar los parámetros de soldadura. Asimismo, la posible imprecisión en el posicionamiento de las piezas a unir dificulta el posicionamiento inicial y seguimiento del cordón. Por ello, los nuevos robots están dotados de sensores para localizar el comienzo y seguir el cordón de manera automática. [1]

1.2.1.3. Aplicación de Materiales

El acabado de superficies por recubrimiento de un cierto material (pintura, esmalte, partículas de metal, etc.) con fines decorativos o de protección, es una parte crítica en muchos procesos de fabricación. Tanto en la pintura como en el metalizado, esmaltado o arenado, la problemática a resolver es similar, siendo la primera la que cuenta con mayor difusión. Su empleo está generalizado en la fabricación de automóviles, electrodomésticos, muebles, etc.

En estos procedimientos se cubre una superficie de forma tridimensional y en general complicada, con una mezcla de aire y material pulverizada mediante una pistola. Es preciso conseguir una perfecta homogeneidad en el reparto de la pintura, realizándose para ello un control de la viscosidad, de la distancia entre la pieza y la pistola, velocidad de movimiento de la misma, número de pasadas, etc. Todos estos parámetros, tradicionalmente se controlan visualmente por un operario.

Por otra parte, el entorno en el que el proceso de pintura se realiza es sumamente peligroso para el ser humano ya que se tiene un espacio reducido, una atmósfera tóxica, un alto nivel de ruido, un riesgo de incendio, entre otras. Estas circunstancias han hecho de la pintura y operaciones afines, un proceso interesante para la robotización.

Con el empleo del robot se eliminan los inconvenientes ambientales y se gana en cuanto a homogeneidad en la calidad del acabado, así como un ahorro de pintura y mayor productividad. La siguiente imagen (**figura 1.4**) muestra a un robot industrial cubriendo la superficie de una serie de defensas de automóvil.

Se trata de un robot de la compañía FANUC, empresa japonesa que además de ofrecer servicios de manufactura y robótica, producen software, controles y equipos de visión para desarrollar sistemas robóticos de última generación.



Figura 1.4: Robot Industrial para Pintura y Revestimiento FANUC

Normalmente los robots de pintura son específicos para este fin. Suelen ser robots articulares, ligeros, con seis o más grados de libertad que les permiten proyectar pintura en los lugares más complicados de la pieza. Cuentan con protecciones especiales para protegerse de las partículas en suspensión dentro de la cabina de pintura y sus posibles consecuencias, es decir, explosiones, deterioros mecánicos, incendios, etc. Son estas posibles consecuencias las que, en muchos casos, el accionamiento de los robots sea preferentemente hidráulico, o de ser eléctrico, los cables conductores vayan por el interior de conductos a sobrepresión, evitándose el riesgo de explosión.

Tal vez la característica fundamental de los robots dedicados a estas tareas sea su método de programación. Obviamente es preciso que cuenten con un control de trayectoria continua, pues no basta con especificar el punto inicial y final de sus movimientos, sino también el camino seguido.

1.2.1.4. Aplicación de Adhesivos y Sellantes

Los robots son usados frecuentemente para la aplicación de cordones de material sellante o adhesivos en la industria del automóvil. En este proceso el material a aplicar se encuentra en forma líquida o pastosa en un tanque, siendo bombeada hasta la pistola de aplicación que porta el robot, la cual regula el caudal de material que es expulsado de la misma. El robot, siguiendo la trayectoria programada, proyecta la sustancia que se solidifica al contacto con el aire.

En este proceso, tan importante como el control preciso de la trayectoria del robot, es el control sincronizado de la velocidad y del caudal del material suministrado por la pistola, puesto que la cantidad de material proyectado en un punto de la pieza depende de ambos factores.



Figura 1.5: Robot Industrial para Aplicación de Adhesivos BETAFORCE

Es habitual una disposición de robot suspendido sobre la pieza como se puede observar en la **figura 1.5**, siendo necesario, por los motivos antes expuestos, que el robot tenga capacidad de control de trayectoria continua (velocidad y posición reguladas con precisión), así como la capacidad de integrar en su propia unidad de control la regulación del caudal de material aportado en concordancia con la velocidad del movimiento. [1]

1.2.1.5. Alimentación de Máquinas

La peligrosidad y monotonía de las operaciones de carga y descarga de máquinas como prensas, estampadoras, hornos o la posibilidad de usar un mismo robot para transferir una pieza a través de diferentes máquinas de procesado, ha conseguido que gran número de empresas hayan introducido robots en sus talleres.

En la industria metalúrgica se usan prensas para conformar los metales en frío o, para mediante estampación y embutido, obtener piezas de complicadas formas a partir de planchas de metal. En ocasiones la misma pieza pasa consecutivamente por varias prensas hasta conseguir su forma definitiva.

La carga y descarga de estas máquinas se realiza tradicionalmente a mano, con el elevado riesgo que esto conlleva para el operario, al que una pequeña distracción puede costarle un serio accidente.

Estas circunstancias, junto con la superior precisión de posicionamiento que puede conseguir el robot, y la capacidad que tiene para controlar automáticamente el funcionamiento de la máquina y dispositivos auxiliares, han hecho que el robot sea una solución ventajosa para estos procesos.



Figura 1.6: Robot Industrial KAWASAKI de Carga/Descarga

Merece atención especial la aplicación de robots en las células flexibles de mecanizado, que han adquirido gran auge en los últimos años. Estas emplean centros de mecanizado o varias máquinas de control numérico para conseguir complejos y distintos mecanizados sobre las piezas. Tal como se muestra en la **figura 1.6**, en la cual se observa un robot de carga y descarga de la compañía KAWASAKI que alimenta a una rectificadora de control numérico (CNC), en los centros de mecanizado se realizan los procesos necesarios en las piezas para darles la forma programada.

La capacidad de programación de estas máquinas permite una producción flexible de piezas adaptándose perfectamente a las necesidades del mercado actual. Estas máquinas emplean diferentes herramientas que se acoplan a un cabezal común de manera automática cuando el proceso de mecanizado lo precisa. Las herramientas a usar en un proceso concreto son almacenadas en tambores automáticos que permiten un rápido intercambio de herramienta. Sus tareas pueden comenzar al recoger la pieza del sistema de transporte y su carga en la máquina de mecanizado.

Cuando esta finaliza su programa, el robot retira la pieza para dejarla en un sistema de transporte encargado de evacuarlas o para llevarla a otra máquina, o a la misma tras un cambio de orientación. Asimismo, el robot puede ocuparse de cargar el alimentador automático de herramientas de la máquina, reponiendo herramientas gastadas o seleccionando las adecuadas para la producción de una determinada pieza.

En las células de multiproceso el mismo robot alimenta a varias máquinas o centros de mecanizado. Una misma pieza, transportada por el robot, puede ir pasando de una máquina a otra, incluyendo controles metrológicos de calidad u otras tareas de calibración. La sincronización de toda la célula puede ser realizada por la propia unidad de control del robot que por lo general, cuenta con gran potencia de cálculo y capacidad de manejo de entradas y salidas.

1.2.1.6. Procesado

Dentro del procesado se incluyen aquellas operaciones en las que el robot enfrenta pieza y herramientas, ya sea transportando una u otra, para conseguir una modificación en la forma de la pieza. El desbarbado consiste en la eliminación de rebabas de las piezas de metal o plástico, procedentes de un proceso anterior como fundición o estampado. Esta operación se realiza manualmente con una esmeriladora o fresa, dependiendo de las características del material que se va a trabajar.

Un robot dedicado al desbarbado porta la herramienta o la pieza, según la aplicación, haciendo entrar en contacto ambas. La herramienta debe seguir el contorno de la pieza, que en muchas ocasiones es complejo, con elevada precisión en su posicionamiento y velocidad.

Por este motivo se requieren robots con capacidad de control de trayectoria continua y buenas características de precisión y control de velocidad. Además, puesto que las rebabas con que vienen las piezas presentan formas irregulares, conviene que el robot posea capacidad de adaptarse al contorno de la pieza mediante el empleo de sensores o el desarrollo de un elemento terminal del robot autoadaptable. Se puede observar en la **figura 1.7** a un robot de la compañía FANUC diseñado para la tarea de desbarbado de piezas automotrices. En su extremo porta la herramienta que extrae de forma segura cualquier rebaba que haya quedado en el proceso de fabricación de la pieza.

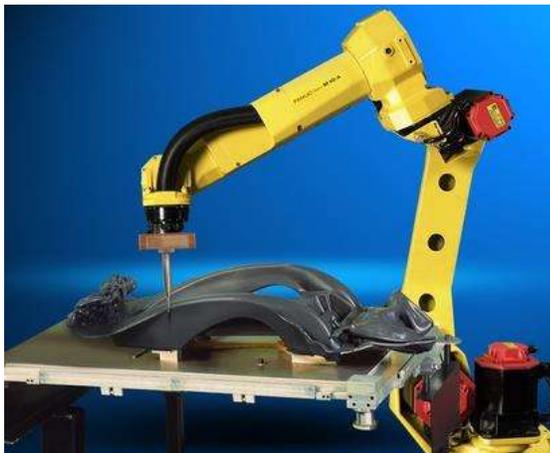


Figura 1.7: Robot Industrial para Desbarbado FANUC

Parecida al desbarbado en cuanto a necesidades, es la aplicación de pulido, cambiando básicamente la herramienta a emplear. Las necesidades de precisión y de empleo de sensores son, tal vez, menos exigentes. [1]

1.2.1.7. Corte

El corte de materiales mediante el uso de robots es una aplicación relativamente reciente que cuenta con notable interés. La capacidad de reprogramación del robot y su integración en un sistema de manufactura asistida por computadora, hacen ideal que el robot transporte la herramienta de corte sobre la pieza, realizando con precisión un programa de corte definido previamente desde un sistema de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Los métodos de corte no mecánicos más utilizados son oxicorte, plasma, láser y chorro de agua, dependiendo de la naturaleza del material que se quiere cortar. En todos ellos, el robot transporta la boquilla por la que se emite el material de corte, proyectando este sobre la pieza al tiempo que sigue una trayectoria determinada.

Las piezas a cortar pueden disponerse en varias capas, una encima de otras, realizándose el corte simultáneo de todas ellas, como lo hacen en la industria textil. Si bien el oxicorte y el corte por plasma son tecnologías extendidas y consecuentemente bien conocidas, no ocurre lo mismo con el corte por láser y por chorro de agua, que son tecnologías más recientes. Los robots de corte láser son ideales para el corte en 3D de materiales no metálicos y de la mayoría de plásticos lo que los hace una excelente alternativa para sustituir a los costosos y pesados moldes de troquelado en aplicaciones que requieren la mayor flexibilidad posible.

El rayo láser se guía con la mano del robot por lo que no tiene restricciones de movilidad en geometrías complejas. Otra ventaja importante es que, al tratarse de mecanizado sin contacto, no hay un desgaste de herramienta además de no dejar rastros de impurezas (rebabas) para que las piezas puedan ser utilizadas directamente sin necesidad de pasos intermedios. En la **figura 1.8** se muestra un robot de corte láser de la marca SUNTOP, empresa dedicada a la fabricación de máquinas de corte láser con sede en la ciudad de Suzhou en China. A un costado se puede observar el módulo que controla la potencia del láser además de recibir el diseño que marca la trayectoria que el brazo robótico seguirá.



Figura 1.8: Robot Industrial para Corte Láser SUNTOP

Pasando a los robots que emplean el corte por chorro de agua, la disposición típica de estos es la del robot suspendido trabajando sobre las piezas fundamentalmente en dirección vertical. El robot porta una boquilla de pequeño diámetro (normalmente 0.1 milímetros) por la que sale un chorro de agua, en ocasiones con alguna sustancia abrasiva, a una velocidad del orden de 900 m/s, y a una presión del orden de 4000 kg/cm². El sistema completo precisa de una bomba, intensificador, reguladores de presión y electroválvulas. El corte por chorro de agua puede aplicarse a materiales como alimentos, fibra de vidrio, PVC, mármol, madera, goma espuma, neopreno, yeso, tela, cartón e incluso metales como aluminio, acero y titanio.

Las principales ventajas del corte por chorro de agua frente a otros sistemas son:

- No provoca un aumento de temperatura en el material.
- No es contaminante.
- No provoca cambios de color.
- No altera las propiedades de los materiales.
- Coste de mantenimiento bajo.

Los robots empleados precisan control de trayectoria continua y de elevada precisión. Su campo de acción varía con el tamaño de las piezas a cortar, siendo en general de envergadura media (de 1 a 3 metros de radio). En este sentido, como se ha comentado, con mucha frecuencia se dispone al robot suspendido boca abajo apuntando directamente sobre la pieza.

1.2.1.8. Montaje

Las operaciones de montaje, por la gran precisión y habilidad que normalmente exigen, presentan grandes dificultades para su automatización flexible. Sin embargo, el hecho de que estas operaciones representen una buena parte de los costes totales del producto, ha propiciado las investigaciones y desarrollos en esta área, consiguiéndose avances importantes.

Muchos procesos de ensamblado se han automatizado empleando máquinas especiales que funcionan con gran precisión y rapidez. Sin embargo, el mercado actual precisa de sistemas muy flexibles, que permitan introducir frecuentes modificaciones en los productos reduciendo los costos. Por este motivo el robot industrial se ha convertido en muchos casos, una solución ideal para la automatización del ensamblaje.

Particularmente, el robot resuelve correctamente muchas aplicaciones de ensamblado de piezas pequeñas en conjuntos mecánicos o electrónicos. Para ello, el robot precisa toda una serie de elementos auxiliares cuyo costo es similar o superior al del propio robot.

Entre estos, cabe destacar los tambores, posicionadores y los posibles sensores que usa el robot para ayudarse en su tarea.

Estos sensores son indispensables en muchos casos debido a las estrechas tolerancias con que se trabaja en el ensamblaje y a los inevitables errores en el posicionamiento de las piezas que entran a formar parte de él. Los robots empleados en el ensamblaje requieren, en cualquier caso, una gran precisión y repetitividad, no siendo preciso que manejen grandes cargas.



Figura 1.9: Robot Industrial de Montaje de Precisión ZBV

El tipo *SCARA* (Selective Compliant Articulated Robot Arm), mostrado en la **figura 1.9**, ha alcanzado gran popularidad en este tipo de tareas por su bajo costo y buenas características. Estas se consiguen por su adaptabilidad selectiva, presentando facilidad para desviarse por una fuerza externa en el plano horizontal y una gran rigidez para hacerlo en el eje vertical. También se usan con frecuencia robots cartesianos por su elevada precisión y, en general, los robots articulares que pueden resolver muchas de estas aplicaciones con suficiente efectividad.

La dificultad inherente a este tipo de tareas obliga, en casi todos los casos, a facilitarlas con un adecuado rediseño de las partes que componen el conjunto a ensamblar. De este modo, conjuntos cuyo ensamblaje automatizado sería inabordable con su diseño inicial, pueden ser montados de una manera competitiva mediante el empleo de robots. [1]

1.2.1.9. Paletización

La paletización es un proceso básicamente de manipulación, consiste en disponer piezas sobre una plataforma o bandeja (palé). Las piezas en un palé normalmente ocupan posiciones predeterminadas, procurando asegurar la estabilidad, facilitar su manipulación y optimizar su extensión. Los palés son transportados por diferentes sistemas como cintas transportadoras o carretillas, llevando su carga de piezas ya sea a lo largo del proceso de fabricación, o bien, hasta el almacén o punto de expedición.

Existen diferentes tipos de máquinas específicas para realizar operaciones de paletizado. Estas, frente al robot, presentan ventajas en cuanto a velocidad y coste, sin embargo, son rígidas en cuanto a su funcionamiento, siendo incapaces de modificar su tarea de carga y descarga.

Así, los robots realizan con ventaja aplicaciones de paletización en las que la forma, número o características generales de los productos a manipular cambian con relativa frecuencia. En estos casos, un programa de control adecuado permite resolver las operaciones de carga o descarga, optimizando los movimientos del robot aprovechando al máximo la capacidad del palé o atendiendo a cualquier otro imperativo.



Figura 1.10: Robot Industrial Paletizador TMI

Se puede observar en la **figura 1.10** a un robot paletizador (de la compañía española TMI) en el proceso de acomodo del producto. A un costado está la línea donde las cajas se van ubicando de tal forma que el paletizador las acomoda en las tarimas donde serán empacadas. Generalmente, las tareas de paletización implican el manejo de grandes cargas de peso y dimensiones elevadas. Por este motivo, los robots empleados en este tipo de aplicaciones acostumbran a ser robots de gran tamaño, con una capacidad de carga de 10 a 100 kilogramos. No obstante, se pueden encontrar aplicaciones de paletización de pequeñas piezas, en las que un robot con una capacidad de carga de 5 kilogramos es suficiente.

Las denominadas tareas de *Pick & Place* consisten en recoger piezas de un lugar y depositarlas en otro. La complejidad de este proceso puede ser muy variable, desde el caso más sencillo en el que el robot recoge y deja las piezas en una posición prefijada, hasta aquellas aplicaciones en las que el robot precise de sensores externos, como visión artificial o tacto, para determinar la posición de recogida y colocación de las piezas.

Un ejemplo típico de aplicación del robot de paletización es la formación de palés de cajas de productos alimenticios procedentes de la línea de empaquetado. En estos casos, cajas de diferentes productos llegan aleatoriamente al campo de acción del robot donde son identificadas, o bien por una célula de carga, por alguna de sus dimensiones, o por un código de barras.

Una vez que se conoce la identidad de la caja, el robot procede a recogerla y a colocarla en uno de los diferentes palés que se están formando de manera simultánea. El mismo robot gestiona las líneas de alimentación de cajas y de palés, a la vez que toma las decisiones necesarias para situar la caja en el palé con la posición y orientación adecuadas de una manera flexible.

1.2.1.10. Control de Calidad

La tendencia a conseguir una completa automatización de la producción abarca todas las etapas de esta, incluyendo el control de calidad. El robot industrial puede participar en esta tarea utilizando su capacidad de posicionamiento y manipulación. Transportando en su extremo un palpador, puede realizar el control dimensional de piezas ya fabricadas. Para ello, el robot toca con el palpador varios puntos clave de la pieza. A partir del conocimiento que en todo momento tiene la unidad de control del robot de la posición y orientación de su extremo, se obtienen los datos relativos a la posición espacial de los puntos determinados de la pieza. Estos datos son utilizados para registrar posibles desviaciones sobre los valores deseados.

Otras posibles aplicaciones del robot en el control de calidad consisten en utilizarlo para transportar el instrumento de medida (rayos X, ultrasonido, etc.) hacia puntos concretos de la pieza a examinar. La situación de posibles defectos detectados puede registrarse y almacenarse a partir, como antes, de la propia unidad de control del robot. La **figura 1.11** muestra a un robot de medición láser de la compañía alemana LEONI. El robot en cuestión hace un barrido láser a piezas automotrices registrando los datos de las mismas para detectar imperfecciones a lo largo de toda la estructura.



Figura 1.11: Robot Industrial de Medición Láser LEONI

Para esta utilidad, no existe un tipo específico de robot manipulador que realice este tipo de tareas, pues actualmente existe una gran variedad de robots que aplican diferentes tecnologías. Se implementará el robot que se adapte mejor a las necesidades de la operación, considerando incluso algún ajuste de diseño para facilitar la tarea. [1]

1.2.1.11. Manipulación en Salas Blancas

Ciertos procesos de manipulación deben ser realizados en ambientes extremadamente limpios y controlados. En ellos, la actividad del operador se ve dificultada no por el trabajo en sí, que no tiene porqué ser especialmente complejo o delicado, sino por la necesidad de

mantener elevadas medidas de control de impurezas mediante el uso de trajes especiales y controles rigurosos. Las denominadas salas blancas de la industria de los semiconductores o las salas de fabricación de algunos productos farmacéuticos, son ejemplos típicos.

Diversos procesos de la industria farmacéutica, como la producción de vacunas y hormonas, o la preparación de injertos de piel y reproducción de células, deben ser realizadas bajo estrictas condiciones de esterilidad. La manipulación de estos productos durante su fabricación se realiza en cabinas con protección de clase 10, en las que los operadores deben pasar por un minucioso proceso de esterilización antes de entrar al interior. Las funciones típicas de manipulación a realizar en estos procesos son la recogida de una de las probetas que contienen el producto en fase de fabricación, su apertura, la adición de algún nuevo producto, giro de la probeta, etc.

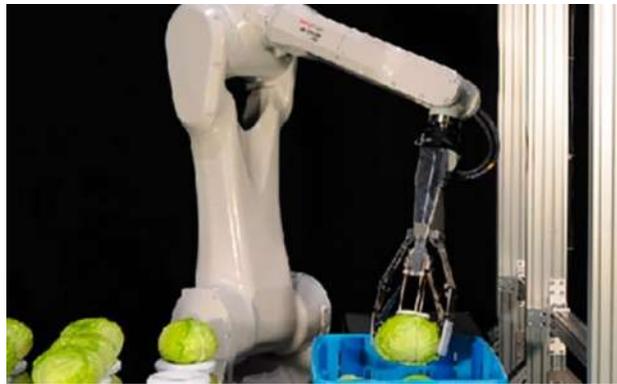


Figura 1.12: Robot Industrial para Salas Limpias FANUC

Se puede observar en la **figura 1.12** a un robot de la empresa FANUC realizando la tarea de empaquetado de alimentos, evitando todo contacto con agentes que pudieran contaminar el producto. La utilización de un robot para estas funciones se realiza introduciendo este de manera permanente en la cabina. El robot debe cumplir la normativa correspondiente al entorno de clase 10, siendo por demás válido cualquier robot comercial, normalmente de seis grados de libertad y alcance inferior a un metro. De este modo se consigue, entre otros beneficios, una reducción del riesgo de contaminación, una mayor homogeneidad en la calidad del producto, y una reducción al costo de fabricación.

1.2.2. Robots de Servicio

Las aplicaciones de la robótica exploradas anteriormente responden a un sector que, como el automotriz o de la manufactura, han sido usuarios habituales de los robots industriales desde hace 30 años. Este uso extensivo de los robots en los citados sectores se ha visto propiciado por la buena adaptación del robot industrial a las tareas repetitivas en entornos estructurados.

De este modo, la competitividad del robot frente a otras soluciones de automatización se justifica por su rápida adaptación a series cortas, sus buenas características de precisión y rapidez, y por su posible reutilización con costos inferiores a los de otros sistemas.

Sin embargo, existen otros sectores donde no es preciso conseguir elevada productividad, en las que las tareas a realizar no son repetitivas, y no existe un conocimiento detallado del entorno. Entre estos sectores podría citarse la industria nuclear, la construcción, la medicina o el uso doméstico. En ninguno de ellos existe la posibilidad de sistematizar y clasificar las posibles aplicaciones, pues responden a soluciones aisladas a problemas concretos. Este tipo de robots son conocidos como robots de servicio y pueden ser definidos como dispositivos electromecánicos, móviles o estacionarios, con uno o más brazos mecánicos capaces de acciones independientes.

Estos robots están siendo aplicados en sectores como:

- Agricultura y silvicultura.
- Ayuda a discapacitados.
- Construcción.
- Domésticos.
- Entornos peligrosos.
- Espacio.
- Medicina y salud.
- Minería.
- Submarino.
- Vigilancia y seguridad.

En general, la aplicación de la robótica a estos sectores se caracteriza por la falta de estructuración tanto del entorno como de la tarea a realizar, y la menor importancia de criterios de rentabilidad económica frente a la de realizar tareas en entornos peligrosos o en los que no es posible el acceso de las personas.

Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de inteligencia, que se traduce en el empleo de sensores y del software adecuado para la toma rápida de decisiones. Puesto que en muchas ocasiones el estado actual de la inteligencia artificial no está lo suficientemente desarrollado como para resolver las situaciones planteadas a los robots de servicio, es frecuente que estos cuenten con un mando remoto, siendo en muchas ocasiones, robots controlados a distancia.

Centros de investigación en robótica han orientado desde hace tiempo buena parte de sus esfuerzos de investigación en esta línea, desarrollando robots especializados, capacitados para trabajar en el exterior, en entornos no estructurados y peligrosos como volcanes, superficie de planetas, desastres nucleares, etc.

Para dar una idea general de las posibilidades de la robótica en estos sectores, se analizarán algunas aplicaciones concretas en las que el robot ha aportado mejoras y beneficios al proceso primitivo.

1.2.2.1. Industria Nuclear

Por sus especiales características, el sector nuclear es uno de los más susceptibles a utilizar robots de diseño específico. Entre las diversas aplicaciones, existen dos que, por su especial relevancia, son las más comunes y se trata de las operaciones de mantenimiento en zonas contaminadas y de manipulación de residuos.



Figura 1.13: Robot para Estación Nuclear TEPCO

Se puede observar en la **figura 1.13** un manipulador de la compañía japonesa TEPCO, el cual se encarga de manipular los elementos radioactivos dentro de las centrales nucleares en Japón, pues es en este país donde TEPCO se desempeña como la compañía eléctrica más grande.

Las operaciones de inspección y mantenimiento de las zonas más contaminadas de una central nuclear de producción de energía eléctrica son por naturaleza, largas y costosas. De realizarlas manualmente, el tiempo de exposición de los operadores a la radiación es un factor crítico que, junto con el elevado costo que supone una interrupción temporal del funcionamiento del sistema en cuestión, justifica sin ningún lugar a

dudas la utilización de sistemas robotizados, normalmente operados a distancia, total o parcialmente, que sustituyan al operador.

En el generador de vapor se produce el intercambio de calor entre el fluido primario y secundario. Para ello, dentro de la vasija del generador, se encuentran dispuestas en forma matricial los tubos por los que circula el fluido receptor del calor. El inevitable desgaste de estos tubos obliga a realizar periódicamente labores de inspección para que, en el caso de que alguno se encuentre dañado inutilizarlo, poniendo en funcionamiento alguno de los tubos de reserva que a tal fin se han dispuesto en el generador.

Para realizar esta operación de manera automática puede utilizarse un robot de desarrollo específico que, introducido en la vasija, posicione una sonda de inspección en la boca de cada tubo. Esta, empujada por el interior del tubo, proporcionará información sobre el estado del mismo. Es preciso considerar que el robot se introduce en la vasija mediante un sistema mecánico que, junto con los posibles errores en la disposición matricial de los

tubos, obliga a que el robot trabaje con ayuda de un operador a distancia o con sistemas sensoriales externos como visión o láser, que proporcionen la posición real relativa entre el extremo del robot y los tubos.

La industria nuclear genera una gran cantidad de residuos radioactivos de baja contaminación como vestimentas, envases de plástico, papel, etc., o de alta contaminación como restos de las células del reactor, materiales en contacto directo prolongado con las zonas radioactivas, etc. La forma, tamaño y peso de estos desechos es variable y su manipulación tiene por objetivo final su almacenamiento en contenedores especiales, que posteriormente son transportados y almacenados lo que origina una nueva problemática. Para manipular remotamente estos residuos se hace uso tanto de manipuladores a distancia con unión mecánica y seguimiento directo del proceso por parte del operador a través de un cristal para un caso de baja contaminación, como con sistemas remotos controlados por radio o de manera alámbrica en el caso de contaminación elevada. Estos manipuladores permiten la flexibilidad necesaria para manipular elementos de peso variable y forma no definida, que incluye sustancias no sólidas. Además, es preciso considerar la importancia que tiene la optimización del espacio ocupado por los residuos en su almacenamiento, por lo que antes de su envasado en los contenedores, puede ser preciso fragmentarlos. [1]

1.2.2.2. Medicina

De entre las varias aplicaciones de la robótica a la medicina destaca la cirugía. Las primeras aplicaciones de la robótica a la cirugía de cerebro datan del año 1982. En esta fecha se comenzó en Memorial Medical Center de Long Beach, California, un programa cuyo objetivo consistía en utilizar un robot comercial *PUMA 206* para realizar determinadas operaciones de neurocirugía.

Desde entonces se han puesto en marcha varios sistemas que, con la ayuda de un scanner, un ordenador registre toda la información necesaria del cerebro para que el equipo médico decida el punto exacto donde debe ser realizada la incisión, por la cual, penetrará la sonda para obtener una muestra para realizar una biopsia.

El robot, que se encuentra perfectamente situado con respecto al paciente, porta en su extremo, los instrumentos necesarios para realizar la incisión, tomar la muestra, etc. La utilización de un robot conectado al ordenador permite que tanto la incisión como la toma de la muestra se realicen con la máxima precisión y en un tiempo notablemente inferior al que se consumiría en caso de emplear el sistema habitual.

Además, se despeja al cirujano de ciertas tareas como el correcto posicionamiento de los instrumentos de la cirugía con respecto al cráneo del paciente, permitiendo una mayor concentración en el seguimiento y el control de la operación.



Figura 1.14: Robot Quirúrgico Da Vinci

El robot quirúrgico *Da Vinci* (mostrado en la **figura 1.14**), de la empresa norteamericana Intuitive Surgical, se compone de una consola ergonómica desde donde el cirujano opera sentado a un costado del paciente. Este robot permite optimizar el rango de acción de la mano humana, reduciendo el temblor y perfeccionando todos los movimientos del cirujano.

También, otro posible beneficio de la aplicación de la robótica a la cirugía se encuentra el diagnóstico a distancia y la cirugía a distancia, la cual consiste en la operación remota de un paciente mediante un robot controlado a distancia.

En julio de 1993 en Milán, un robot *SCARA* realizó una biopsia y una inclusión para introducir un laparoscopio sobre el hígado de un cerdo. El robot estaba siendo operado a distancia en tiempo real desde 14000 kilómetros de distancia en el Jet Propulsion Lab de Pasadena, California.

Las órdenes del cirujano y la información procedente de la sala de operaciones eran intercambiadas a través de dos satélites de comunicaciones y redes de fibra óptica. Esta primera experiencia en operación remota permite asegurar que este tipo de intervenciones sobre pacientes humanos podrá ser una realidad en un futuro próximo.

Su justificación puede encontrarse en el tratamiento de pacientes situados en localizaciones difícilmente alcanzables como el espacio, plataformas submarinas, escenarios bélicos, etc. No obstante hay que considerar que aún existen importantes dificultades técnicas, como es el retraso de las comunicaciones que ronda en varios segundos, y elevado costo del sistema debido a los satélites de comunicaciones que se necesitan, entre otras cosas.

1.2.2.3. Construcción

El sector de la construcción es, en la mayoría de los países industrializados, uno de los que moviliza mayor número de recursos económicos y humanos. No es de extrañar que desde hace algo más de una década se estén desarrollando gran número de sistemas robotizados, orientados a automatizar en lo posible algunas de las múltiples labores que entran a formar parte de los procesos de construcción.

La siguiente imagen (**figura 1.15**) muestra al robot de la compañía estadounidense BROKK siendo el modelo *BROKK 90* uno de los más versátiles en el mercado ya que se controla de manera remota evitando cualquier accidente al personal en el proceso de la demolición.



Figura 1.15: Robot para Demolición BROKK 90

En este tipo de aplicaciones de la robótica, como en otros muchos, es Japón el país que cuenta con un mayor número de sistemas en funcionamiento. En algunos casos se trata de robots parcialmente operados a distancia, contruidos a partir de maquinaria convencional. En otros casos, es maquinaria específicamente construida para resolver un proceso concreto.

Si se analizan las condiciones existentes para la robotización de la construcción se llega, entre otras, a las siguientes conclusiones:

- Las condiciones de trabajo son complejas.
- Los robots deben tener capacidad de locomoción y cierto grado de inteligencia.
- Los robots deben estar preparados para trabajar en exteriores, moviéndose en entornos difíciles y no protegidos.
- Deben manejar piezas pesadas y de grandes dimensiones.
- Las operaciones a realizar son complejas, variadas y poco repetitivas.
- Los robots deben ser fácilmente transportables a la obra.

Con estas condiciones, las posibles tareas que se pueden robotizar dentro de la construcción de edificios podrían agruparse como:

1. Operaciones de colocación de elementos.
 - Construcción mediante colocación repetitiva de estructuras básicas como ladrillos, bloques, etc.
 - Posicionamiento de piezas, normalmente grandes y pesadas como vigas, etc.
 - Unión de diferentes piezas que componen una estructura.
 - Sellado de uniones entre diferentes piezas.
2. Operaciones de tratamiento de superficies.
 - Acabado de superficies.
 - Recubrimiento de superficies con pintura, barniz, etc.
 - Extensión de material sobre la superficie.
3. Operaciones de rellenado.
 - Vertido de cemento u hormigón en encofrados.
 - Excavación para la preparación de terrenos y movimientos de tierras.
 - Rellenado con tierra de volúmenes vacíos.
4. Otras tareas.
 - Inspección y control.

Fuera de la construcción de edificios, cabría destacar las realizaciones de robots para la construcción de túneles, carreteras, inspección de estructuras en puentes o muros de edificios difícilmente accesibles, etc. [1]

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es diseñar y construir el modelo a escala de un robot manipulador tipo SCARA con la particularidad de poderlo reconfigurar de forma manual a un robot manipulador tipo PUMA.

1.3.2. Objetivos Particulares

1. Diseñar un modelo a escala de un robot manipulador reconfigurable de bajo costo.
2. Lograr que el modelo sea interactivo a través de elementos digitales.
3. Que a través del modelo a escala se pueda verificar la cinemática directa.

1.4. Justificación

Los modelos de robots manipuladores a escala que se ofrecen en el mercado en México aún no son tan accesibles por dos razones: no son fáciles de conseguir y los que se pueden conseguir tienen un costo que no puede ser cubierto por gran parte de la población. En general, la robótica orientada al aprendizaje o a fomentar ciertas habilidades en los niños y jóvenes está muy limitada al considerarse productos lujosos y que los adultos consiguen para tener un objeto diferente.

Otro tipo de modelos se pueden conseguir por internet a diferentes costos pero en general son modelos completamente mecánicos y analógicos, es decir, su dinámica se limita a una batería, perillas, motores de corriente directa y engranajes que al interactuar logran dar movimiento a las articulaciones. El control de estos modelos se da a partir de las perillas o interruptores y la estructura es básicamente la misma para todos los modelos que se ofrecen en línea.

El modelo de robot manipulador que se desarrolla en este trabajo es completamente interactivo desde el ensamble de todo el armazón, hasta la programación de la placa electrónica que controla cada articulación. Además, es un modelo cuyo costo es considerablemente más bajo que cualquier modelo comercial pues además de la estructura, el modelo que se propone puede ser manipulado a través de un teclado y una pantalla LCD.

Esto mejora el aprendizaje, ya que se puede corroborar la cinemática del robot con la ayuda del modelo físico que además corresponde a los modelos industriales que se utilizan en las fábricas.

1.5. Metodología

A partir de un recuento breve de la historia de la robótica, de cómo ha afectado la economía en su implementación industrial y el estudio actual de la robótica como disciplina, se plantea el objetivo de diseñar y construir un modelo de robot manipulador para fomentar el aprendizaje en ciertos niveles educativos.

Lo primero que se debe considerar son los tipos (o tipo) de robots que pueden fomentar la comprobación de un análisis matemático como la cinemática directa. Después de determinar los modelos (o modelo) específicos, se hace un análisis de los elementos que conformarán el prototipo, desde los elementos electrónicos, hasta los elementos mecánicos y estructurales.

Una vez realizado el análisis de los elementos anteriormente mencionados, se realiza el diseño que dará pie a la elaboración de la estructura física, escogiendo el material adecuado

para dicha elaboración. Finalmente, se realiza el montaje para someter el modelo a las pruebas correspondientes.

1.6. Contenido de la Tesis

La tesis se divide en cinco capítulos donde en cada uno de ellos se abordan los apartados que dan forma a este trabajo. A continuación se describe cada capítulo en base al contenido de los mismos.

CAPÍTULO 1: Introducción

El primer capítulo presenta una breve introducción a la robótica, los robots manipuladores que existen en la actualidad y para qué son implementados en la industria dando una explicación sencilla de sus funciones, además de los nuevos campos en que se están implementando dichos robots manipuladores. El capítulo uno también contiene los objetivos de este trabajo así como la justificación y metodología con que se abordará el mismo.

CAPÍTULO 2: Antecedentes de Robots Manipuladores

Este capítulo aborda el avance de la robótica desde los primeros modelos para uso recreativo o estético, hasta su implementación en la industria y como se han modificado los elementos que los componen al paso del tiempo. También se exploran los antecedentes del estudio matemático que definen la cinemática y la dinámica de los robots manipuladores, así como las mejoras a dichos estudios para facilitar el desarrollo y la programación de estos dispositivos.

CAPÍTULO 3: Diseño de Robots Manipuladores Reconfigurables

En el capítulo tres se describe el diseño asistido por computadora de cada pieza que conforma el prototipo propuesto, necesario para la elaboración de la estructura del módulo de control, así como de cada articulación para ambos tipos de brazo robótico. También se analiza brevemente los elementos electrónicos que dan movimiento al prototipo que este trabajo presenta.

CAPÍTULO 4: Implementación y Pruebas de Robots Manipuladores

Este capítulo contiene la descripción del ensamble de las piezas que componen el prototipo de robot manipulador reconfigurable así como las conexiones electrónicas que se realizaron. Además de lo anterior, se tiene una breve descripción de la metodología de Denavit-Hartenberg para determinar la cinemática directa de los robots manipuladores, con la intención de hacer pruebas con el modelo a escala y comparar el resultado matemático con lo obtenido en las pruebas del robot manipulador a escala.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y Recomendaciones

En el capítulo final se expresan las conclusiones acerca del prototipo de robot manipulador reconfigurable a escala. También algunas recomendaciones para la fabricación y la implementación del prototipo, además de algunas posibles mejoras desde el punto de vista del autor.

CAPÍTULO 2

Antecedentes de Robots Manipuladores

2.1. Introducción

A lo largo de toda la historia, el hombre se ha sentido fascinado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres vivos. Los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: «automatos». De esta palabra deriva la actual autómatas que puede definirse como una máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado. Los mecanismos animados de Herón de Alejandría [85 d.C.] se movían a través de dispositivos hidráulicos, poleas y palancas que tenían fines eminentemente lúdicos.



Figura 2.1: Gallo de Estrasburgo

La cultura árabe heredó y difundió los conocimientos griegos, utilizándolos no sólo para realizar mecanismos destinados a la diversión sino que les dio una aplicación práctica introduciéndolos en la vida cotidiana de la realeza. Ejemplo de estos, son diversos sistemas dispensadores automáticos de agua para beber o para el aseo personal. También de ese periodo son otros autómatas como el *Hombre de hierro* de Alberto Magno [1204-1282] o la *Cabeza parlante* de Roger Bacon [1214-1294]. Otro ejemplo relevante de aquella época fue el *Gallo de Estrasburgo* [1352] (**figura 2.1**), el autómatas más antiguo que se conserva en la actualidad y formaba parte del reloj de la torre de la catedral de Estrasburgo y al dar las

horas movía las alas y el pico.

Durante los siglos XV y XVI algunos de los más relevantes representantes del renacimiento se interesan por los ingenios descritos y desarrollados por los griegos. Es conocido el *León mecánico* construido por Leonardo Da Vinci [1452-1519] para el rey Francisco I de Francia, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del rey.

El robot como máquina lleva un desarrollo independiente del término robot. Tras los primeros autómatas, casi todos de aspecto humano, los progenitores más directos de los robots fueron los telemanipuladores. [1]

Los primeros trabajos que condujeron a los robots industriales de hoy día se remontan al periodo que siguió inmediatamente a la segunda guerra mundial. Durante los años finales de la década de los cuarenta, comenzaron programas de investigación en Oak Ridge y Argonne National Laboratories para desarrollar manipuladores mecánicos controlados de forma remota para manejar materiales radiactivos. Estos sistemas eran del tipo maestro-esclavo, diseñados para reproducir, fielmente los movimientos de manos y brazos realizados por un operario humano. El manipulador maestro era guiado por el usuario a través de una secuencia de movimientos, mientras que el manipulador esclavo duplicaba a la unidad maestra tan fidedignamente tal como le era posible. Posteriormente se añadió la retroalimentación de la fuerza acoplando mecánicamente el movimiento de las unidades maestro y esclavo de forma que el operador podía sentir las fuerzas que se desarrollaban entre el manipulador esclavo y su entorno. A mediados de los años cincuenta, el acoplo mecánico se sustituyó por sistemas eléctricos e hidráulicos en manipuladores tales como el *Handyman* de General Electric y el *Minotaur I* construido por General Mills.

El trabajo sobre manipuladores maestro-esclavo fue seguido rápidamente por sistemas más sofisticados capaces de operaciones repetitivas autónomas. A mediados de los años cincuenta, George C. Devol desarrolló un dispositivo al que llamó «dispositivo de transferencia programada articulada», un manipulador cuya operación podía ser programada (y, por tanto, cambiada) y que podía seguir una secuencia de movimientos determinados por las instrucciones en el programa. Posteriores desarrollos de este concepto por Devol y Joseph F. Engelberger condujo al primer robot industrial, introducido por Unimation Inc., en 1959. La clave de este dispositivo era el uso de una computadora en conjunción con un manipulador para producir una máquina que podía ser programada para realizar una variedad de tareas de forma automática. Al contrario que las máquinas de automatización de uso dedicado, estos robots se podían reprogramar y cambiar de herramienta a un costo relativamente bajo para efectuar otros trabajos en caso de cambiar el sistema de producción.

Aunque los robots programados ofrecían una herramienta de fabricación nueva y potente, se hizo patente en los años sesenta que la flexibilidad de estas máquinas se podía mejorar significativamente mediante el uso de una retroalimentación sensorial.

Al comienzo de esa década, H. A. Ernest [1962] publicó el desarrollo de una mano mecánica controlada por computadora con sensores táctiles. Este dispositivo, llamado MH-1, podía “sentir” bloques y usar esta información para controlar la mano de manera que apilaba los bloques sin la ayuda de un operario. Este trabajo es uno de los primeros ejemplos de un robot capaz de tener una conducta adaptativa en un entorno no estructurado. El sistema de manipulación consistía en un manipulador ANL, modelo 8, con 6 grados de libertad, controlado por una computadora TX-O mediante un dispositivo de interfaz. Este programa de investigación posteriormente evolucionó como parte del proyecto MAC, y se le añadió una cámara de televisión para comenzar la investigación sobre la percepción en la máquina.

Durante el mismo período, Tomovic y Boni [1962] desarrollaron una mano prototipo provista con un sensor de presión que detectaba un objeto y proporcionaba una señal de retroalimentación de entrada a un motor para iniciar uno de dos modelos de sujeción. Una vez que la mano estaba en contacto con el objeto, se enviaba a una computadora la información proporcional a su tamaño y peso mediante estos elementos sensibles a la presión. En 1963, la American Machine & Foundry Company introdujo el robot comercial *VERSATRAN*, mostrado en la **figura 2.2**. Comenzando en ese mismo año, se desarrollaron diversos diseños de brazos para manipuladores, tales como el brazo *Roehampton* y el *Edinburgh*.

A finales de los años sesenta, McCarthy [1968] y sus colegas en el Stanford Artificial Intelligence Laboratory publicaron el desarrollo de una computadora con manos, ojos y oídos, es decir, manipuladores, cámaras y micrófonos. Demostraron un sistema que reconocía mensajes hablados, “veía” bloques distribuidos sobre una mesa, y los manipulaba de acuerdo a las instrucciones. Durante este período, Pieper [1968] estudió el problema cinemático de un manipulador controlado por computadora, mientras que Kahn y Roth [1971] analizaban la dinámica y el control de un brazo restringido utilizando un control On-Off, casi de tiempo mínimo.



Figura 2.2: Robot Comercial VERSATRAN

Mientras tanto, otros países comenzaron a ver el potencial de los robots industriales. Ya en 1968, la compañía japonesa Kawasaki Heavy Industries negoció una licencia con Unimation Inc. para sus robots. Uno de los desarrollos más poco usuales en robots sucedió en 1969, cuando se desarrolló un camión experimental por General Electric para la Armada Americana. En el mismo año se desarrolló el brazo *Boston* y al año siguiente el brazo *Stanford*, que estaba equipado con una cámara y controlado por una computadora. Algunos de los trabajos más serios en robótica, comenzaron cuando estos brazos se utilizaron como robots manipuladores.

Un experimento en el brazo *Stanford* consistía en apilar bloques automáticamente de acuerdo con diversas estrategias. Esto era un trabajo muy sofisticado para un robot automatizado de esa época. En 1974, Cincinnati Milacron introdujo su primer robot industrial controlado por computadora. Lo llamó *The Tomorrow Tool* o *T³*, que podía levantar más de 100 libras así como seguir a objetos móviles en una línea de montaje.

Durante los años setenta se centró un gran esfuerzo de investigación sobre el uso de sensores externos para facilitar las operaciones de manipulación. En Stanford, Bolles y Paul [1973], utilizando retroalimentación tanto visual como de fuerza, demostraron que un brazo *Stanford* controlado por computadora, conectado a una PDP-10, efectuaba el montaje de bombas de agua de automóvil. Hacia la misma época, Will y Grossman [1975] en IBM desarrollaron un manipulador controlado por computadora con sensores de contacto y fuerza para realizar montajes mecánicos en una máquina de escribir de veinte piezas. [3]

La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica, de uso especialmente válido para la manipulación. En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla en concepto de robot *SCARA* (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) que busca un robot con un número reducido de grados de libertad, un costo limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas. En la **figura 2.3** se puede observar uno de los primeros diseños del robot manipulador SCARA construido en Japón.



Figura 2.3: Robot Manipulador SCARA

La evolución de los robots industriales desde sus primeros balbuceos ha sido vertiginosa. En poco más de 30 años las investigaciones y desarrollos sobre robótica industrial han permitido que los robots tomen posiciones en casi todas las áreas productivas y tipos de industria. En pequeñas o grandes fábricas los robots pueden sustituir al hombre en aquellas tareas repetitivas y hostiles, adaptándose inmediatamente a los cambios de producción solicitados por la demanda variable.

Los futuros desarrollos de la robótica apuntan a aumentar su movilidad, destreza y autonomía de sus acciones. La mayor parte de los robots actuales son con base estática, y se utilizan en aplicaciones industriales como ensamblado, soldadura, alimentación de máquinas, entre muchas otras. Sin embargo, existen otro tipo de aplicaciones que han hecho evolucionar en gran medida tanto la concepción de los robots como su propia morfología.

Entre estos robots dedicados a aplicaciones no industriales destacan los robots espaciales como los brazos para lanzamientos y recuperación de satélites, vehículos de exploración lunar, robots para construcción y mantenimiento de hardware en el espacio; robots para aplicaciones submarinas y subterráneas como la exploración, instalación y mantenimiento de cables telefónicos submarinos, limpieza e inspección de tuberías y drenajes subterráneos e inspección de sistemas de refrigeración de centrales nucleares; aplicaciones agrícolas, entre muchas otras. [1]

En la **tabla 2.1** se muestran los acontecimientos más importantes que propiciaron a la formación del campo de la robótica como estudio concreto.

Tabla 2.1: Acontecimientos Importantes en la Robótica

FECHA	ACONTECIMIENTO
1947	El primer teleoperado es desarrollado.
1948	Un teleoperador es desarrollado incorporando retroalimentación de fuerza.
1949	Inicia investigación en máquinas de fresado de control numérico.
1954	George Devol diseña el primer robot programable.
1956	Joseph Engelberger compra los derechos del Robot Devol y funda la empresa Unimation Inc.
1961	El primer robot incorporando información de retroalimentación de fuerza es desarrollado.
1963	El primer sistema de visión en un robot es desarrollado.
1971	El brazo Stanford es desarrollado en la Universidad de Stanford.
1973	El primer lenguaje de programación de robots (WAVE) es desarrollado en Stanford.
1974	Milacron Cincinnati introduce el robot T ³ con control computarizado.
1978	Unimation introduce el robot PUMA, basado en diseños de la General Motors.
1979	El diseño del robot PUMA es introducido a Japón.
1981	Comienza la comercialización del robot tipo SCARA en Japón.
1987	Se constituye la Federación Internacional de Robótica con sede en Estocolmo.

Hoy día vemos la robótica como un campo de trabajo mucho más amplio que el que teníamos hace unos pocos años, tratando con investigación y desarrollo en una serie de áreas interdisciplinarias, que incluyen cinemática, dinámica, planificación de sistemas, control, sensores, lenguajes de programación e inteligencia de máquina. [3]

2.2. Estructura Mecánica de un Robot

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía del brazo humano, por lo que en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca.

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o de una combinación de ambos. De este modo, son posibles los seis diferentes tipos de articulaciones que se muestran en la **figura 2.4**, aunque en la práctica, sólo se emplean la de rotación y la prismática.

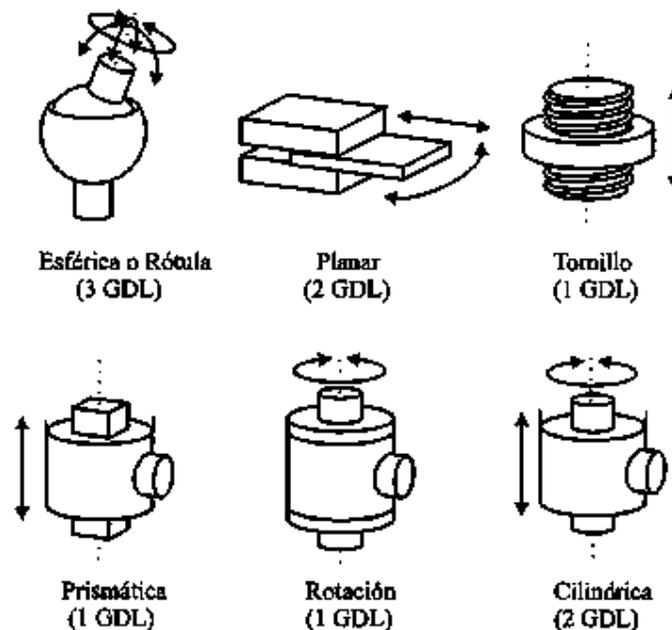


Figura 2.4: Tipos de Articulaciones

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad (GDL). También en la **figura 2.4** se indica el número de grados de libertad de cada tipo de articulación.

El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de todas las articulaciones que lo componen. Puesto que, como se ha indicado, las articulaciones empleadas son únicamente las de rotación y prismática con un solo grado de libertad cada una, el número de estos en el robot, suele coincidir con el número de articulaciones del que está compuesto.

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot, como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son las presentadas en la **figura 2.5** donde se atiende únicamente a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio.

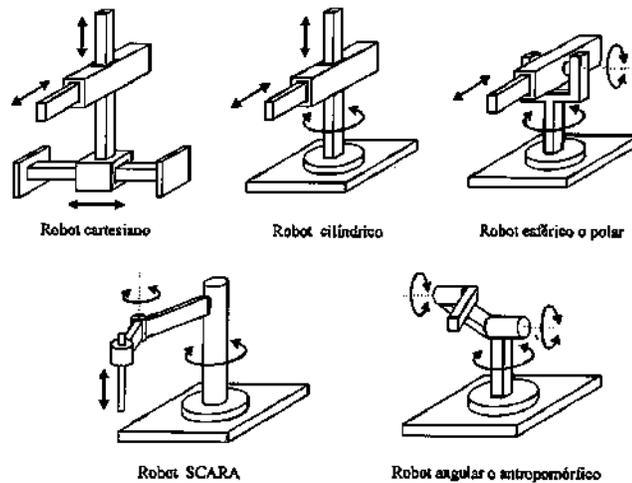


Figura 2.5: Configuraciones Más Utilizadas en la Industria

Para poder posicionar y orientar un cuerpo en cualquier lugar en el espacio, son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, por lo que, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo en cualquier punto en el espacio, se precisarán al menos seis grados de libertad. Lo anterior se puede ver reflejado en la siguiente imagen (**figura 2.6**) la cual muestra los seis grados de libertad con que está dotado el robot *ARC Mate 120/S-12* de Fanuc, así como sus articulaciones y eslabones.

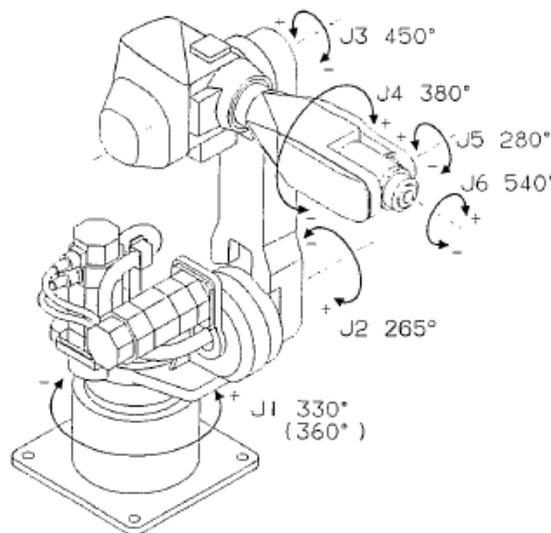


Figura 2.6: Manipulador ARC Mate 120/S-12 de FANUC

A pesar de ser necesarios los seis grados de libertad para tener total libertad en el posicionamiento y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con sólo cuatro o cinco grados de libertad ya que estos son suficientes para llevar a cabo las tareas que les son asignadas.

Existen también casos opuestos en los que se precisan más de seis grados de libertad para que el robot pueda tener acceso a todos los puntos de su entorno. Así, si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot de más grados de libertad le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubiera llegado con seis grados de libertad. Otra situación frecuente es la de dotar al robot de un grado de libertad adicional que le permita desplazarse a lo largo de un carril, aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder. Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para desempeñar eficientemente una determinada tarea, se dice que el robot es redundante. [1]

2.3. Transmisiones y Reductores

Las transmisiones son elementos encargados de transferir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Se incluirán junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

2.3.1. Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por este motivo se procura que los actuadores, por lo general pesado, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario.

Existen actualmente en el mercado robots industriales con acoplamiento directo entre accionamiento y articulación los cuales tienen algunas ventajas. Se trata, sin embargo, de casos particulares dentro de la generalidad que en los robots industriales actuales supone la existencia de sistemas de transmisión junto con reductores para el acoplamiento entre actuadores y articulaciones.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un tamaño y peso reducido, se ha de evitar que presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones con gran rendimiento. Aunque no existe un sistema de transmisión específico para robots, si existen algunos usados con mayor frecuencia y que se clasifican en la siguiente tabla.

Tabla 2.2: Descripción de las Transmisiones Comunes

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras *****
	Correa dentada	Distancia grande	
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	*****	Giro limitado
	Cable	*****	Deformabilidad
Circular-Prismática	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Prismática-Circular	Paral articulado	*****	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

La clasificación se ha realizado en base al tipo de movimiento posible en la entrada y la salida: lineal o circular. En la **tabla 2.2**, también quedan reflejadas algunas ventajas y desventajas propias de algunos sistemas de transmisión. Entre ellas cabe mencionar la holgura, ya que es necesario que no afecte al movimiento que transmite, ya sea por rozamiento inherente a su funcionamiento o por el desgaste que pueda introducir la propia holgura. También se debe considerar que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado y de ser posible, entre grandes distancias.

Las transmisiones más habituales son aquellas que cuentan con movimiento circular tanto a la entrada como a la salida. Incluidas en éstas se hallan los engranajes, las correas dentadas y las cadenas.

2.3.2. Reductores

En cuanto a los reductores, al contrario con las transmisiones, sí que existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a que a los reductores utilizados en robótica se les exige unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento.

En la **tabla 2.3** se muestran los valores típicos de los reductores empleados para robótica.

Tabla 2.3: Valores Aceptados en Reductores para Robótica

Características	Valores Típicos
Relación de reducción	50 ÷ 300
Peso y tamaño	0.1 ÷ 30Kg
Momento de inercia	10 ⁻⁴ Kgm ²
Velocidades de entrada máxima	6000 ÷ 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 ÷ 2''
Rigidez torsional	100 ÷ 2000Nm/rad
Rendimiento	85% ÷ 98%

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende también a minimizar su momento de inercia, que influye negativamente en el motor, especialmente crítico para el caso de motores de baja inercia.

Los reductores, por motivos de diseño, tienen una velocidad máxima de entrada admisible, que como regla general aumenta a medida que disminuye el tamaño del motor. También existe una limitación en cuanto al par de salida nominal permisible que depende del par de entrada y de la relación de transmisión.

2.4. Actuadores

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente.

Las características que se deben considerar son:

- Potencia.
- Controlabilidad.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Coste.

2.4.1. Actuadores Neumáticos

En los actuadores neumáticos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

- Cilíndricos neumáticos.
- Motores neumáticos.

En los primeros se consigue el desplazamiento de un émbolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados del mismo. Los cilindros neumáticos pueden ser de simple o doble efecto. En los primeros, el émbolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como consecuencia del efecto de un muelle (que recupera al émbolo a su posición de reposo). En los cilindros del doble efecto, el aire a presión es el encargado de empujar al émbolo en las dos direcciones, al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámaras.

Normalmente, con los cilindros neumáticos sólo se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo. Esto último se puede conseguir con una válvula de distribución que canaliza el aire a presión hacia una de las dos caras del émbolo alternativamente. Existen no obstante, sistemas de posicionamiento continuo de accionamiento neumático, aunque debido a su costo y calidad todavía no resultan competitivos. En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más usados son los motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales.

En los primeros, sobre el rotor excéntrico están dispuestas las aletas de longitud variable. Al entrar aire a presión en uno de los compartimentos formados por dos aletas y la carcasa, estas tienen a girar hacia una situación en la que el compartimento tenga mayor volumen.

En la **figura 2.7** se puede observar el interior de un motor neumático de aletas rotativas mostrando como se acopla el eje del rotor a las aletas rotativas. También se observa debajo del motor, una vista frontal del mecanismo que produce el movimiento, donde se ilustra el compartimento por donde entra el aire y por donde sale.

Los motores de pistones axiales tienen un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar por las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado.

Siempre se debe tener en cuenta que el empleo de un robot con algún tipo de accionamiento neumático deberá disponer de una instalación de aire comprimido, incluyendo un compresor, sistema de distribución, filtros, secadores, etc. No obstante, estas instalaciones neumáticas son frecuentes y existen en muchas de las fábricas donde se da cierto grado de automatización.

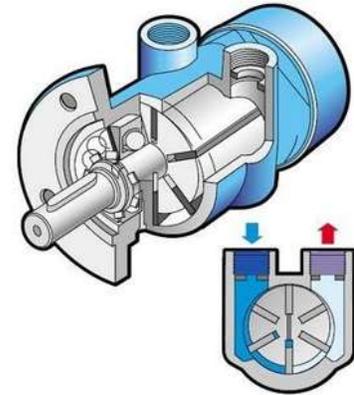


Figura 2.7: Motor Neumático de Aletas Rotativas

2.4.2. Actuadores Hidráulicos

Este tipo de actuadores no se diferencian funcionalmente en mucho de los neumáticos. En ellos, en vez de aire se utilizan aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegándose incluso a superar los 300 bar. Existen, como en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro (**figura 2.8**) y del tipo motores de aletas y pistones.

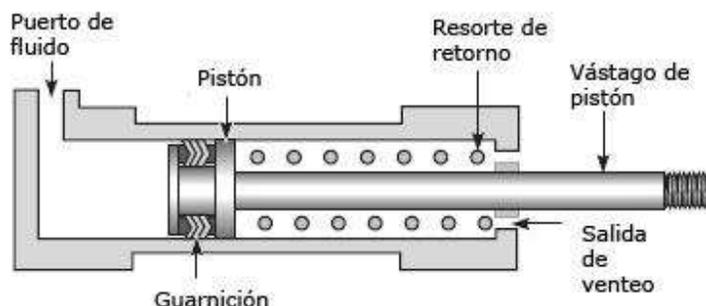


Figura 2.8: Actuador Hidráulico Tipo Cilindro

Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente inferior al del aire, por lo que la precisión obtenida es mayor.

Por motivos similares, es más fácil realizar en ellos un control continuo, pudiendo posicionar su eje en todo un rango de valores con notable precisión. Además, las elevadas presiones de trabajo, diez veces superior a las de los actuadores neumáticos, permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares. [1]

2.5. Servomotores Industriales

Los servomotores son sistemas electromecánicos que pertenecen a una clase particular de actuadores eléctricos encargados de transmitir energía para producir movimiento del robot, y son los que forman las uniones o articulaciones del robot mediante las cuales se mueve, motivo por el cual al movimiento del robot se le denomina desplazamiento articular. La tecnología asociada a los servomotores es complicada, ya que su electrónica está basada en microprocesadores avanzados de procesamiento como los *DSP (Digital Signal Processors)* para llevar a cabo el análisis y control de las diversas variables que determinan su modo de operación.

Un servomotor está compuesto principalmente por tres elementos:

1. Motor eléctrico.
2. Sensor de posición para medir el desplazamiento articular el cual está fabricado por un disco codificado y un ensamble de dispositivos emisores de luz y fotodetectores para generar una señal de salida proporcional al movimiento del motor.
3. Amplificador electrónico (driver) constituido por un conjunto de microprocesadores y electrónica de potencia que se encarga de acoplar y acondicionar al motor la impedancia y señal de voltaje de baja potencia que proviene de la computadora o de un sistema digital.

Los servomotores tienen tres modos de operación: posición, velocidad y par. El modo posición permite mover el motor a una posición preestablecida, también conocida como set point. Sin embargo, no puede desplazar cargas o aplicar una fuerza determinada. En este modo se emplean reguladores simples como el proporcional derivativo (PD) y el proporcional integral derivativo (PID). El modo velocidad controla el movimiento del motor sobre una velocidad deseada. Tampoco puede ejercer fuerza como en el caso del modo de posición. Estos modos tienen la característica de ser arquitectura cerrada, es decir, no permiten programar otro tipo de controladores, por lo que sus aplicaciones en robótica se encuentran limitadas.

El modo par es el que se emplea en robótica y su principal característica es la arquitectura abierta, lo que hace posible evaluar experimentalmente el desempeño y robustez de cualquier estrategia de control. De esta forma, las aplicaciones en robótica incrementan.

Asimismo, permite la interacción dinámica con el sistema mecánico del robot, por lo que es posible compensar los efectos dinámicos del robot y en consecuencia controlar la posición o desplazamiento articular. El modo par también permite el control de la trayectoria y aplicaciones más complicadas como el control de impedancia, teleoperación y control de fuerza.

Las ecuaciones de Maxwell permiten deducir una ley fundamental para servomotores que determina la relación entre el campo electromagnético y el par aplicado. En general, el movimiento rotacional con respecto a su eje de giro es producido por el par aplicado, esta simple ley es la base del desarrollo de la robótica y está planteada en la siguiente ecuación:

$$\tau = kv$$

En donde « τ » representa el par aplicado al servomotor y sus unidades son Nm (Newton-metro), « k » es una constante que representa la ganancia del amplificador electrónico y tiene unidades Nm/v (Newton-metro/volt) y la variable « v » es el voltaje que proviene de la computadora y representa el comando o ley de control que programa el usuario para que el robot lleve a cabo una aplicación específica. No todos los motores eléctricos cumplen con la ecuación anterior como algunos motores de corriente alterna y motores a pasos y, por esta razón, no forman parte de la estructura del sistema mecánico del robot pero pueden ser empleados en la construcción de garras mecánicas o de herramientas específicas que se colocan en el robot para diversas aplicaciones. Se puede observar en la **figura 2.9** los elementos que componen a un servomotor utilizado en robótica además de su distribución dentro del mismo.

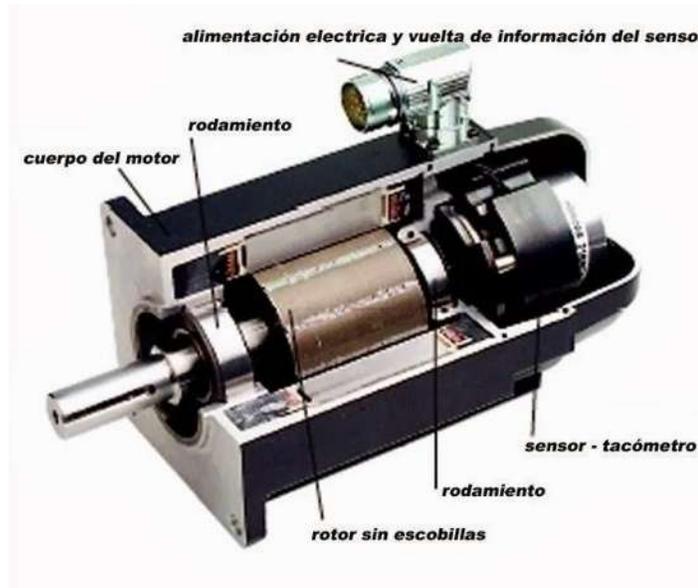
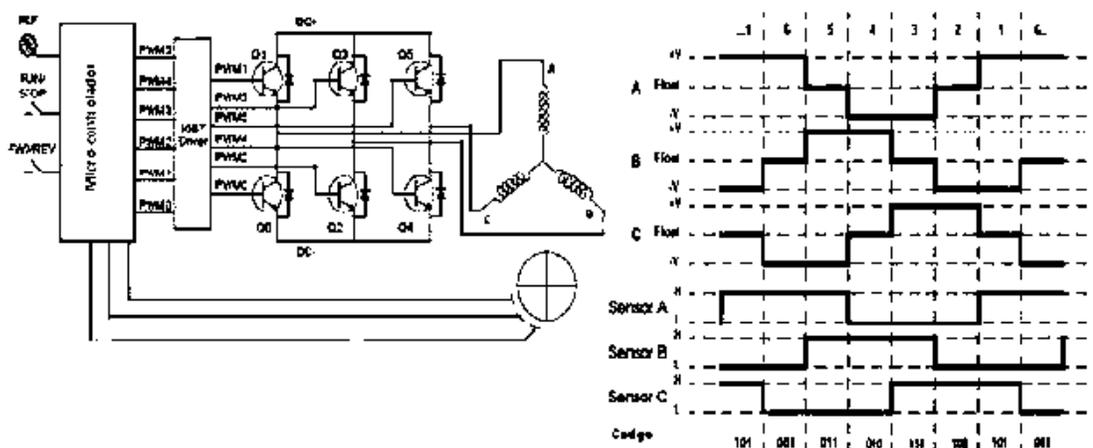


Figura 2.9: Servomotor Actual para Uso Robótico

El amplificador del servomotor es un sofisticado sistema electrónico cuyo objetivo principal es llevar a cabo la función de la ecuación antes mencionada. Posee un complejo sistema electrónico para controlar los campos electromagnéticos y procesar comandos secuenciales para la etapa de potencia que se encarga de proporcionar la señal trifásica de alimentación directamente de la fuente de alimentación de corriente directa, con el suministro correspondiente requerido por el motor. En este punto es importante aclarar que los motores son especiales, emplean voltaje trifásico pero esto no significa que se alimentan de la línea trifásica de 220 v o 440 v de corriente alterna. Más bien, en este caso, la señal senoidal trifásica es generada de forma discreta, emulando a la señal trifásica continua, por el amplificador electrónico y en cada periodo de muestreo alimenta al motor con voltaje directo.

De esta forma se envían las correspondientes fases a las bobinas del motor produciendo un par aplicado que permita movimiento rotacional. La siguiente figura (**figura 2.10**) muestra el sistema mínimo, la etapa de potencia y la generación de las señales trifásicas de voltaje directo.



Fase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	Nivel alto C	Nivel Bajo C	Nivel alto B	Nivel Bajo B	Nivel alto A	Nivel Bajo A
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	1	0	0	0	0	1
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0

Figura 2.10: Generación de Señales Trifásicas

Cuando a un servomotor se le acondiciona mecánicamente una barra de metal para formar un péndulo o eslabón, al sistema resultante se le conoce como servomecanismo.

2.5.1. Principios Básicos de Motores Eléctricos

Los motores representan una tecnología bien establecida que combina eficiencia y alto desempeño para facilitar los procesos de automatización. El primer motor fue construido en 1821 por el científico e inventor británico Michael Faraday, quien colocó un imán sobre un plato cóncavo con mercurio y conectó un polo del imán y del plato con una batería, resultando un campo magnético que produjo movimiento circular en este sencillo motor de un polo. Posteriormente, Faraday perfeccionó este experimento. En 1832 William Sturgeon, científico británico e inventor del electromagneto, construyó un motor de cuatro polos para un asador, con lo que creó la primera cocina moderna. Los detalles de los motores eléctricos han cambiado desde Faraday y Sturgeon. Sin embargo, los elementos fundamentales han permanecido hasta nuestros días. El movimiento creado por un motor eléctrico obedece a la fuerza de Lorentz la cual establece que cuando se coloca un conductor por el cual circula corriente en un campo magnético, se genera una fuerza ortogonal al flujo de corriente.

Los componentes principales de los motores eléctricos son:

- **Estator:**

Es el casco del motor o carcasa; es un imán permanente que rodea a la flecha y la armadura. El estator se encuentra fabricado con componentes ferromagnéticos que proveen el flujo del campo magnético. Este componente no se mueve, es decir, permanece estático.

- **Armadura:**

Consta de una o más bobinas montadas sobre una flecha central (rotor); la corriente es conmutada a través de esas bobinas por medio de un conmutador. Como la fuerza de Lorentz impulsa a las bobinas, la fuerza de rotación (par o torque) es transmitida a la flecha para que gire (fuerza contra-electromotriz).

- **Conmutador:**

Consta de dos platos divididos en la flecha o rotor, lo que proporciona potencia a la armadura de las bobinas, además de que están conectados a la fuente de alimentación por medio de escobillas.

Los motores eléctricos pertenecen a una clase especial de transductores, debido a que convierten un tipo de energía (eléctrica) a otro tipo de energía (mecánica). Este concepto está relacionado con la forma de medir el rendimiento y eficiencia del motor la cual se define como la relación entre la energía mecánica y la energía eléctrica.

Idealmente, esta relación debería ser del 100%, sin embargo, en la práctica la eficiencia de un motor está muy lejos de lo ideal y su valor depende del tipo y calidad de los componentes del motor.

2.5.2. Servomotores de Transmisión Directa

La transmisión directa representa la nueva tecnología de la robótica, debido a las ventajas que tiene sobre los robots convencionales con sistema de engranaje. El concepto de transmisión directa fue establecido por Haruhiko Asada en 1980, y consiste en que el rotor del motor funciona como una fuente de par; aquí el sistema de engranes tradicionales está completamente eliminado, por lo que desaparece el cascabeleo o falta de movimiento y reduce significativamente el fenómeno de fricción, comparado con los robots convencionales; la construcción mecánica es más simple y la exactitud en el posicionamiento de robots manipuladores es mejorada.

El diseño de robots a través de servomotores de transmisión directa representa enormes ventajas, no sólo en sus prestaciones sino también porque resulta clave para propósitos de realizar investigación científica de la robótica. Las principales características de los servomotores de transmisión directa son las siguientes:

- Arquitectura abierta para la evaluación experimental de cualquier algoritmo de control.
- Funcionan como fuente de par.
- No hay pérdidas en la transmisión de energía.
- Reducción del fenómeno de fricción y juego mecánico.
- No es necesario acoplamiento de engranes.
- Proporciona alto par, sin sistema de engranaje.
- No requieren calibración.
- Modelado y programación sencilla.
- Maquinado y construcción simple.
- Transmisión directa de energía, sin pérdidas.
- Alta resolución del sensor de posición.

Actualmente, los robots de transmisión directa constituyen la nueva generación de manipuladores cuya tecnología irá desplazando paulatinamente a los robots convencionales destinados a ensamble de alta velocidad que incluyen sistema de engranes.

La **figura 2.11** muestra un robot de transmisión directa de tres grados de libertad con movimiento tridimensional desarrollado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). El brazo robótico denominado ÉpsilonRobot fue realizado por la facultad de ciencias de la electrónica y actualmente se encuentra en trámite para obtener la patente. Se tiene pensando que el dispositivo pueda realizar una amplia gama de aplicaciones entre las que destacan el traslado, pintado de objetos, estibado de cajas, rehabilitación en rutinas de fisioterapia, teleoperación y asistencia robotizada a personas con discapacidad.



Figura 2.11: Robot de Transmisión Directa Desarrollado en la BUAP

Esta tecnología facilita el diseño, construcción y maquinado de los eslabones, así como la caracterización de los parámetros del modelo dinámico del robot tales como centros de masa, momentos inerciales, coeficientes de fricción, etc. [2]

2.6. Cinemática y Dinámica del Brazo Robótico

La cinemática del brazo del robot trata con el estudio analítico de la geometría del movimiento de un brazo robótico con respecto a un sistema de coordenadas de referencia que es fijo, sin considerar las fuerzas o momentos que originan el movimiento. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular de las relaciones entre la posición de las variables de articulación y la posición y orientación del deflector final del brazo robótico.

Hay dos problemas fundamentales en la cinemática del robot. El primero se suele conocer como el problema cinemático directo, mientras que el segundo es el problema cinemático inverso. Como las variables independientes en un robot son las variables de articulación, y una tarea se suele dar en términos del sistema de coordenadas de referencia, se utiliza de manera más frecuente el problema cinemático inverso.

Denavit y Hartenberg [1955] propusieron un enfoque sistemático y generalizado de utilizar álgebra matricial para describir y representar la geometría espacial de los elementos del brazo robótico con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea 4×4 para describir la relación espacial entre dos elementos mecánicos rígidos adyacentes y reduce el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4×4 que relaciona el desplazamiento espacial del sistema de coordenadas de la mano al sistema de coordenadas de referencia. Estas matrices de transformación homogéneas son también útiles en derivar las ecuaciones dinámicas de movimiento del brazo del robot.

En general, el problema cinemático inverso se puede resolver mediante algunas técnicas. Los métodos utilizados comúnmente son el algebraico matricial, iterativo o geométrico.

La dinámica del robot, por otra parte, trata con la formulación matemática de las ecuaciones del movimiento del brazo. Las ecuaciones dinámicas de movimiento de un manipulador son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen la conducta dinámica del manipulador. Tales ecuaciones de movimiento son útiles para simulación en computadora del movimiento del brazo, el diseño de ecuaciones de control apropiadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura cinemática del robot. El modelo dinámico real de un brazo se puede obtener de leyes físicas conocidas tales como las leyes de Newton y la mecánica Lagrangiana. Esto conduce al desarrollo de las ecuaciones dinámicas de movimiento para las distintas articulaciones del manipulador en términos de los parámetros geométricos e inerciales especificados para los distintos elementos. Se pueden aplicar sistemáticamente enfoques convencionales como las formulaciones de Lagrange-Euler y de Newton-Euler para desarrollar las ecuaciones de movimientos del robot. [3]

2.6.1. El Problema Cinemático Directo

Se utiliza álgebra vectorial y matricial para desarrollar un método generalizado y sistemático para describir y representar la localización de los elementos de un brazo robótico con respecto a un sistema de referencia fijo. Como los elementos de un brazo pueden girar y/o trasladarse con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, se establecerá un sistema de coordenadas ligado al cuerpo a lo largo del eje de la articulación para cada elemento.

Se utiliza una matriz de rotación 3×3 para describir las operaciones rotacionales del sistema ligado al cuerpo con respecto al sistema de referencia. Se utilizan entonces las coordenadas homogéneas para representar vectores de posición en un espacio tridimensional, y las matrices de rotación se ampliarán a matrices de transformación homogénea 4×4 para incluir las operaciones de traslación del sistema de coordenadas ligado al cuerpo. La ventaja de utilizar la representación Denavit-Hartenberg, cuyos autores fueron los primeros en utilizar dicha representación matricial de un elemento mecánico rígido para describir la geometría espacial de un brazo, es su universalidad algorítmica para derivar las ecuaciones cinemáticas de un brazo.

2.6.2. El Problema Cinemático Inverso

Los robots basados en computadora se suelen controlar en el espacio de las variables de articulación, mientras que los objetos que se manipulan suelen manipularse en el sistema de coordenadas de mundo.

Con el fin de controlar la posición y orientación del efector final de un robot para alcanzar su objeto, es más importante la solución de la cinemática inversa. En otras palabras, dada la posición y orientación del efector final de un brazo de robot de seis ejes y sus parámetros de articulación y elementos, interesa encontrar los ángulos de articulación correspondientes a cada eslabón del robot de manera que pueda posicionar como se desee al efector final.

En general, el problema cinemático inverso se puede resolver por diversos métodos, tales como la transformación inversa (Paul [1981]), el álgebra de tornillo (Kholi y Soni [1975]), matrices duales (Denavit [1956]), cuaterniones duales (Yang y Freudenstein [1964]), iterativo (Uicker [1964]), y métodos geométricos (Lee y Ziegler [1984]). Pieper [1968] presentó la solución cinemática para cualquier manipulador de seis grados de libertad que tiene pares de revolución o prismáticos para las primeras tres articulaciones y los ejes de las tres articulaciones restantes se intersectan en un punto. La solución se puede expresar como un polinomio de cuarto grado con una incógnita y una solución en forma cerrada para las incógnitas restantes. Paul y algunos colaboradores, en 1981, presentaron una técnica de transformada inversa utilizando las matrices de transformaciones homogéneas 4×4 para resolver la cinemática utilizada en la misma clase de manipuladores simples que analizaba Pieper. Aunque la solución resultante es correcta, tiene el problema de que no da una indicación clara sobre cómo seleccionar una solución apropiada de las diversas soluciones posibles para una configuración de brazo en particular. El usuario a menudo necesita recurrir a su intuición para tomar la respuesta correcta.

Milenkovic y Huang, en 1983, presentaron soluciones iterativas para la mayoría de los robots industriales. La solución iterativa a menudo requiere más cálculos y no garantiza la convergencia a la solución correcta especialmente en los casos singular y degenerado. Más aún como con la técnica transformada inversa, no existe indicación sobre cómo escoger la solución correcta para una configuración de brazo particular.

Es deseable encontrar una solución del brazo en forma cerrada para los manipuladores. Afortunadamente, la mayoría de los robots comerciales tienen una u otra de las siguientes condiciones que hacen posible la solución del brazo en forma cerrada:

1. Tres ejes de articulación adyacentes se interseccionan en un punto.
2. Tres ejes de articulación adyacentes son paralelos entre sí.

2.6.3. Dinámica Del Brazo Robótico

La dinámica del robot trata con las formulaciones matemáticas de las ecuaciones del movimiento del brazo. Las ecuaciones de movimiento de un manipulador son un conjunto de ecuaciones que describen su conducta dinámica. Tales ecuaciones son útiles para la simulación en computadora del movimiento del robot, el diseño de ecuaciones de control apropiadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura del brazo.

El objetivo del control de un manipulador basado en computadora es mantener la respuesta dinámica del mismo, de acuerdo con algún rendimiento del sistema preespecificado y objetivos deseados. En general, el rendimiento dinámico de un manipulador depende directamente de la eficacia de los algoritmos de control y de su modelo dinámico. El problema de control radica en obtener modelos dinámicos del brazo robótico físico y a continuación especificar leyes o estrategias de control correspondientes para conseguir la respuesta y rendimiento del sistema deseado.

El modelo dinámico de un robot se puede obtener a partir de las leyes de la mecánica Newtoniana y Lagrangiana. Esto conduce al desarrollo de las ecuaciones de movimiento dinámico para las diversas articulaciones del manipulador en términos de los parámetros geométricos e inerciales de los elementos. Métodos convencionales como las formulaciones de Lagrange-Euler y Newton-Euler se pueden aplicar sistemáticamente para desarrollar las ecuaciones de movimiento del robot. De estas dos formulaciones se obtienen diferentes formas de describir la dinámica del brazo, tales como las ecuaciones de Lagrange-Euler de Uicker [1965], de Bejczy [1974], las ecuaciones recursivas de Lagrange de Hollerbach [1980], las ecuaciones de Newton-Euler de Luh [1980] y las ecuaciones generalizadas d'Alembert y Lee [1983]. Estas ecuaciones son equivalentes unas a otras en el sentido de que describen la conducta dinámica del mismo robot físico. Sin embargo, sus estructuras pueden diferir porque se obtienen por diversas razones y objetivos. Algunas se obtienen para lograr tiempos de cálculo rápido en la evaluación de los pares de las articulaciones nominales para controlar el manipulador, otras se obtienen para facilitar el análisis y la síntesis de control, y otras más se obtienen para mejorar la simulación en una computadora del movimiento del robot.

La obtención del modelo dinámico de un manipulador basado en la formulación de Lagrange-Euler es simple y sistemática. Suponiendo el movimiento del cuerpo rígido, las ecuaciones de movimiento resultantes, excluyendo la dinámica de los dispositivos de control electrónico, el espacio entre las uniones y el rozamiento de los engranajes, son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas de segundo orden. Bejczy, en 1974, utilizando la representación de la matriz de transformación homogénea 4×4 de la cadena cinemática y la formulación Lagrangiana, ha demostrado que las ecuaciones de movimiento dinámico para un robot tipo Stanford de seis articulaciones son fuertemente no lineales y constan de carga inercial, fuerzas de reacción de acoplo entre las articulaciones como la fuerza centrífuga y el efecto Coriolis, así como los efectos de la carga de la gravedad. Más aún, estos pares/fuerzas dependen de los parámetros físicos del manipulador, de la configuración instantánea de las articulaciones, de la velocidad y aceleración de las articulaciones y de la carga que está soportando el robot.

La eficacia computacional se consigue a partir de una formulación compacta utilizando matrices de transformación de Euler (matrices de rotación) y vectores de posición relativos entre las articulaciones.

2.7. Planificación de la Trayectoria y Control del Movimiento

Con el conocimiento de la cinemática y la dinámica de un manipulador con elementos series, es de interés mover los actuadores de sus articulaciones para cumplir una tarea deseada controlando al manipulador para que siga un camino previsto. Antes de mover el brazo, es de interés saber si hay algún obstáculo presente en la trayectoria que el robot tiene que atravesar y si la mano del manipulador necesita viajar a lo largo de una trayectoria especificada. El problema de control de un manipulador se puede dividir convenientemente en dos subproblemas coherentes: la planificación de movimiento o trayectoria, y el subproblema de control del movimiento.

La curva espacial que la mano del manipulador sigue desde una localización inicial hasta una final se llama trayectoria o camino. La planificación de la trayectoria interpola y/o aproxima la trayectoria deseada por una clase de funciones polinomiales y genera una secuencia de puntos de consignas de control en función del tiempo para el control del manipulador desde la posición inicial hasta el destino.

En general, el problema de control de movimiento consiste en:

1. Obtener los modelos dinámicos del manipulador.
2. Utilizar estos modelos para determinar leyes o estrategias de control para conseguir la respuesta y el funcionamiento del sistema deseado.

Antes de mover un robot, es importante conocer si existe algún obstáculo presente en el camino, conocidos como ligaduras de obstáculo, y si la mano del manipulador debe recorrer un camino especificado, conocido como ligaduras de camino. Estas dos ligaduras combinadas dan lugar a cuatro modos de control como lo muestra la **tabla 2.4**.

Tabla 2.4: Modos de Control de un Manipulador

		Ligaduras de Obstáculo	
		Si	No
Ligaduras de Camino	Si	Fuera de línea libre de colisión, planificación de camino en línea más seguimiento de camino	Fuera de línea, planificación de camino en línea más seguimiento del camino
	No	Control posicional más obstáculo en línea, detección y evitación	Control posicional

De la **tabla 2.4** se observa que el problema de control de un manipulador se puede dividir en los dos subproblemas mencionados anteriormente, planificación de movimiento (trayectoria) y control del movimiento.

El diseño de una trayectoria de un manipulador constituida de segmentos de línea recta en el espacio cartesiano se estudió por Paul en 1979, utilizando la matriz de transformación homogénea para representar las posiciones finales por las que debería pasar la mano del manipulador. El movimiento entre dos posiciones finales consecutivas se consigue mediante dos operaciones secuenciales: una traslación y una rotación para alinear el vector de aproximación de la mano del manipulador y una rotación final respecto del eje de la herramienta para alinear la orientación de la pinza. Se utiliza entonces una rutina de interpolación polinomial cuadrática en el espacio de las variables de articulación para garantizar transiciones suaves entre dos segmentos de trayectoria conectados. Taylor, en 1979, utilizando la representación en cuaterniones, extendió el método de Paul para un movimiento más uniforme. Para lograr el objetivo de planificación de trayectoria en tiempo real, ambos métodos desprecian ligaduras de par del manipulador físico.

Otros esquemas de planificación cartesianos existentes se diseñan para verificar simultáneamente las ligaduras de continuidad y de par. Para incluir las ligaduras de par en la etapa de planificación de trayectoria, normalmente se supone que el par máximo permitido es constante en cada posición y velocidad. Por ejemplo, en lugar de utilizar ligaduras de velocidad y par, Luh y Lin en 1984 utilizaron acotaciones sobre la velocidad, aceleración y derivada de la aceleración que se suponen constantes para cada articulación. Seleccionaron algunos puntos sobre el camino cartesiano deseado, resolvieron el problema cinemático inverso y encontraron funciones polinomiales de bajo grado suaves que garantizan las condiciones de continuidad para ajustar a través de estos puntos nudos en el espacio de las variables de articulación. Relajando el tiempo normalizado al tiempo del servo, la ligadura dinámica con la hipótesis de acotación del par constante se incluyó a lo largo de la trayectoria.

Debido a las funciones de articulación interpolada, la localización de la mano del manipulador en cada instante del servo no puede estar exactamente sobre la trayectoria deseada, sino sobre las funciones polinomiales de la articulación a interpolar.

Lee, en 1985 desarrolló un esquema de planificación de trayectoria en tiempo discreto para determinar los puntos de consigna de la trayectoria en tiempo discreto para determinar los puntos de consigna de la trayectoria exactamente sobre un camino en línea recta dado que satisface ambas ligaduras de par y de suavidad. El problema de planificación de trayectoria se formuló como una maximización de la distancia entre dos conjuntos de puntos cartesianos consecutivos sobre un camino en línea rectada dado, sujeto a las ligaduras de suavidad y par.

Debido a las aproximaciones en tiempo discreto de la velocidad, aceleración y derivada de la aceleración de la articulación, la solución de optimización necesita cálculos intensivos que le impiden su utilidad práctica. Así para reducir el coste computacional, la optimización se realizaba mediante algoritmos de búsqueda iterativos.

2.7.1. Consideraciones Generales Sobre la Planificación de la Trayectoria

La planificación de la trayectoria se puede realizar o bien en el espacio de las variables de articulación o bien en el espacio cartesiano. Para la planificación de las variables de articulación primero se planifica la historia temporal de todas las variables de articulación y de sus dos primeras derivadas respecto al tiempo para descubrir el movimiento deseado del manipulador. Para la planificación en el espacio cartesiano se define la historia temporal de la posición de la mano del manipulador, su velocidad y aceleraciones de la articulación a partir de la información de la mano. La planificación en el espacio de las variables de articulación tiene tres ventajas:

1. La trayectoria se planifica directamente en términos de las variables controladas durante el movimiento.
2. La planificación de trayectoria se puede hacer casi en tiempo real.
3. Las trayectorias de la articulación son más fáciles de planificar.

La desventaja asociada es la dificultad en determinar las posiciones de los diversos elementos y de la mano durante el movimiento, una tarea que se suele necesitar para garantizar la evitación de obstáculos a lo largo de una trayectoria. Generalmente, la planificación del camino cartesiano se puede conseguir en dos pasos coherentes:

1. Generación o selección de un conjunto de puntos nudos o puntos de interpolación en coordenadas cartesianas de acuerdo con algunas reglas a lo largo del camino cartesiano.
2. Especificación de una clase de funciones para enlazar estos puntos nudos de acuerdo con algún criterio.

Para el último paso, los criterios escogidos están muy a menudo dictados por los siguientes algoritmos de control para asegurar el seguimiento de la trayectoria deseada. Hay dos métodos principales para conseguirlo:

1. El método orientado al espacio cartesiano en el cual la mayoría de los cálculos y optimización se efectúa en coordenadas cartesianas y el control subsiguiente se realiza en el nivel de la mano, es decir, la señal actuante de error a los actuadores de la articulación se calculan basándose en el error entre la posición cartesiana deseada y la posición cartesiana real de la mano del manipulador. Los puntos a controlar sobre el camino en línea recta deseado se seleccionan en un intervalo fijo y se convierten en sus correspondientes soluciones de articulación en tiempo real mientras se controla el manipulador. La trayectoria resultante es una línea recta a tramos. Paul [1979], Taylor [1979] y Luh y Lin [1981] dieron métodos para utilizar una línea recta para enlazar puntos nudos cartesianos adyacentes.

2. El método orientado al espacio de la articulación en el cual se utiliza una función polinomial de bajo orden en el espacio de las variables de la articulación para aproximar el segmento de camino acotado por dos puntos nudos adyacentes sobre el camino en línea recta y el control resultante se efectúa a nivel de la articulación. El camino cartesiano resultante es una línea recta sin tramos. El camino de articulación con desviación acotada de Taylor [1979] y el método de la trayectoria polinomial cúbica de Lin [1983] utilizan polinomios de bajo orden en el espacio de la variable de articulación para aproximar el camino en línea recta.

El método orientado al espacio cartesiano tiene la ventaja de ser un concepto directo y se asegura un cierto grado de precisión deseado a lo largo del camino en línea recta. Sin embargo, como todos los algoritmos de control disponibles en este momento se basan invariablemente en coordenadas de articulación, no hay sensores capaces de medir la mano del manipulador en coordenadas cartesianas, la planificación del camino en el espacio cartesiano requiere transformaciones entre las coordenadas cartesianas y de articulación en tiempo real, tarea que computacionalmente es intensiva y con regularidad conduce a intervalos de control más grandes.

Debido a las diversas ventajas mencionadas anteriormente, se utiliza ampliamente el método orientado al espacio de la articulación, que convierte los puntos nudos cartesianos en sus correspondientes coordenadas de articulación y utiliza polinomios de bajo grado para interpolar estos puntos. Este método tiene la ventaja de ser computacionalmente más rápido y más fácil de tratar con las ligaduras dinámicas del manipulador. Sin embargo, pierde precisión a lo largo del camino cartesiano cuando los puntos de muestreo caen sobre los polinomios ajustados. [3]

CAPÍTULO 3

Diseño de Robots Manipuladores Reconfigurables

3.1. Introducción

Según los datos de la Organización Mundial del Comercio [4] México es el cuarto lugar a nivel mundial en importaciones de robots industriales, sólo debajo de China, Alemania y Estados Unidos. Así mismo, está considerado el primer lugar de los países latinoamericanos. A pesar de que se ha venido dando un esfuerzo por incluir a la robótica dentro de las escuelas públicas y privadas, y pese que a nivel internacional se han logrado excelentes resultados en concursos relativos a la robótica, no se observa un avance significativo en el área industrial.

Dicha problemática se debe a diversos factores entre los que destacan la falta de apoyo para la apertura de esta disciplina en el sistema educativo, así como el nulo desarrollo de los sistemas robóticos para uso industrial, ya que las empresas establecidas en México requieren equipos de manera inmediata y no esperar al desarrollo de algún sistema hecho en el país. En el caso de la educación, un factor importante que frena la implementación de la robótica en el plan de estudios es el alto costo de los modelos a escala que facilitarían el estudio de los mismos.

Sin embargo, con la tecnología actual y con las herramientas adecuadas se pueden desarrollar modelos a diferentes escalas y con diferentes materiales a costos menores comparados con los robots a escala comerciales.

Dos de las herramientas a las cuales se tiene acceso en la actualidad es el corte láser y la impresión 3D, además que, gracias a la apertura de productos en el mundo, se facilita conseguir los componentes electrónicos necesarios para el desarrollo de estos modelos.

3.2. Propuesta de Brazos Robóticos

El modelo de robot manipulador reconfigurable que este trabajo propone se basa en dos tipos de manipuladores, el robot manipulador tipo SCARA y el robot manipulador PUMA. El objetivo de esto es que se pueda armar uno de ambos y tener la posibilidad de reconfigurarlo de forma manual al otro tipo de manipulador ensamblando y conectando sólo las articulaciones del brazo en cuestión.

3.2.1. Robot Manipulador PUMA

El robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) fue desarrollado en 1978 por la compañía Unimation y comenzó a trabajar para la General Motors en tareas de montaje. Fue utilizado también para investigación debido a las posibilidades que brindaba su lenguaje de programación.

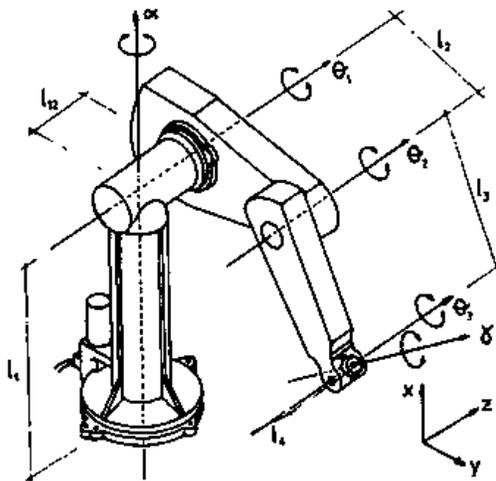


Figura 3.1: Esquema Rotacional del Robot Manipulador PUMA

El robot PUMA de la serie 500 es un brazo articulado con seis grados de libertad que le permiten posicionar y orientar su herramienta final. De manera más específica, las primeras tres articulaciones posicionan en el espacio al grupo formado por las tres últimas, que son las que orientan el efector final. Estas primeras tres articulaciones conforman el grupo Hombro-Codo-Muñeca [5]. Este robot pertenece a la clase de robots angulares o antropomorfos cuyas articulaciones se pueden ver en la **figura 3.1** acompañadas de sus respectivos ejes de rotación.

Para el modelo propuesto en este trabajo, sólo se utilizarán las primeras tres articulaciones que son las encargadas de posicionar el efector final en el área de trabajo.

3.2.2. Robot Manipulador SCARA

Una geometría especial de robots industriales es el tipo SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). SCARA es un brazo planar antropomórfico de dos articulaciones rotacionales para la base y el hombro, que se mueven en un plano horizontal; la tercera articulación es prismática, es decir, de movimiento lineal. Para este tipo de configuración todos los ejes de movimiento son paralelos entre sí.

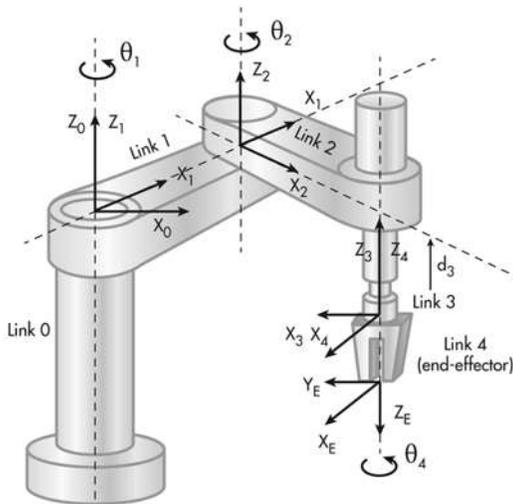


Figura 3.2: Esquema Rotacional del Manipulador SCARA

La estructura mecánica es de alta rigidez para soportar cargas en forma vertical y para control de fuerza en el plano horizontal, por lo que esta configuración es adecuada para tareas de ensamble con pequeños objetos [3]. La **figura 3.2** muestra la distribución de las articulaciones del robot SCARA, así como los ejes de rotación y la ruta de desplazamiento de la tercera articulación (Link 3).

De la misma manera que el manipulador PUMA, en este prototipo se descartará el efector final y sólo se considerarán las primeras tres articulaciones que son las encargadas de posicionar al efector en el área de trabajo.

3.3. Descripción General

Los modelos a escala que existen en el mercado tienen la peculiaridad de ser poco flexibles, es decir, no aceptan casi ninguna modificación, por lo que estudiar el posicionamiento se vuelve, básicamente, exclusivo a un tipo de brazo robótico por lo que cualquier modificación en la estructura del modelo implicaría la manipulación del dispositivo con el riesgo de provocar un daño irreversible. Es por eso que para el modelo robótico que se propone en este trabajo, se ha considerado la posibilidad de reconfigurarlo de forma manual para el análisis de diferentes tipos de brazos robóticos.

En términos generales, el modelo que se propone, se describe como un dispositivo diseñado para manipular la posición de dos tipos de robot, el tipo SCARA y, con la reconfiguración manual, el tipo PUMA o viceversa. Su construcción se basa principalmente en dos secciones, una sección encargada del control de posición y otra sección donde se dispone de las articulaciones que conforman el brazo robótico.

Se puede observar de las **figuras 3.1 y 3.2** que la primera articulación para ambos tipos de brazo robótico es de movimiento rotatorio y además en ambas coincide que el movimiento es horizontal. Esto último es importante puesto que para el diseño de ambos brazos robóticos, al coincidir con la articulación ya mencionada, se optó por dejar tal articulación fija a una base incorporada al módulo de control.

3.3.1. Eslabones Del Brazo Robótico

Cada tipo de brazo robótico consta de tres articulaciones, lo que finalmente se traduce como un robot manipulador de tres grados de libertad. Todos los eslabones son estructuras sólidas con características diferentes dependiendo de su función, ya sea que sólo tenga la cualidad de acoplarse a un servomotor o que además tenga la capacidad de mover un eslabón contiguo.

A continuación se describe cada eslabón para ambos tipos de manipuladores:

➤ **ROBOT MANIPULADOR PUMA**

1. El primer eslabón está compuesto por la estructura sólida que contiene un servomotor (encargado de dar movimiento a la segunda articulación) y un acoplador para poderlo incorporar al servomotor que proporcionará el movimiento a este primer eslabón.
2. La segunda estructura gira sobre un costado de la primera y está compuesta por una un servomotor para dar movimiento a la última articulación, así como un acoplador para lograr la conexión de este eslabón con la articulación anterior.
3. Finalmente, el tercer eslabón sólo cuenta con un acoplador en un extremo de su estructura para poderlo incorporar al servomotor de la articulación anterior.

Las siguientes imágenes (**figura 3.3**) muestran un modelo preliminar de las estructuras físicas (eslabones) que conforman al robot manipulador PUMA. El boceto fue realizado para tener un vistazo de cómo pudiera comportarse el manipulador en la práctica.

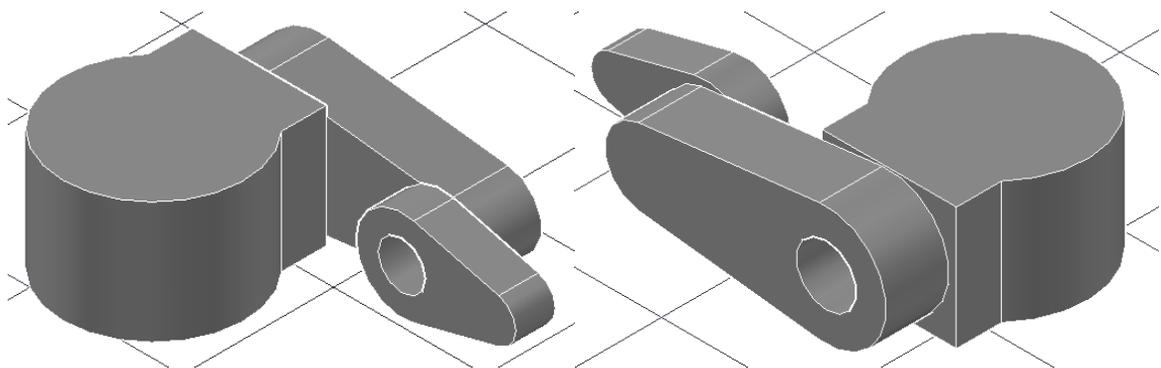


Figura 3.3: Esquema del Brazo Robótico PUMA (Proyección Isométrica)

El boceto que se observa en la **figura 3.3** se realizó con una distribución de articulaciones y eslabones similar al manipulador industrial real.

➤ **ROBOT MANIPULADOR SCARA**

1. En el primer eslabón, distribuido sobre la estructura sólida se encuentra un servomotor (encargado de transmitir el movimiento a la segunda articulación) así como un acoplador para insertarlo en el servomotor que moverá a este eslabón.
2. La segunda estructura estará constituida por un acoplador para que pueda ser insertada en la segunda articulación, además, sobre la estructura se ubicarán ranuras que facilitarán el movimiento prismático de la tercera articulación.
3. Como la tercera articulación no es un movimiento de revolución sino prismático, esta consta de un servomotor (adherido a la articulación anterior) que dará movimiento rotativo a un engrane el cual mueve de manera prismática una regleta dentada (cremallera) que se mueve hacia arriba o hacia abajo.

Las siguientes figuras (**figura 3.4**) muestran un modelo tridimensional básico de lo que se pretende para el modelo del manipulador SCARA.

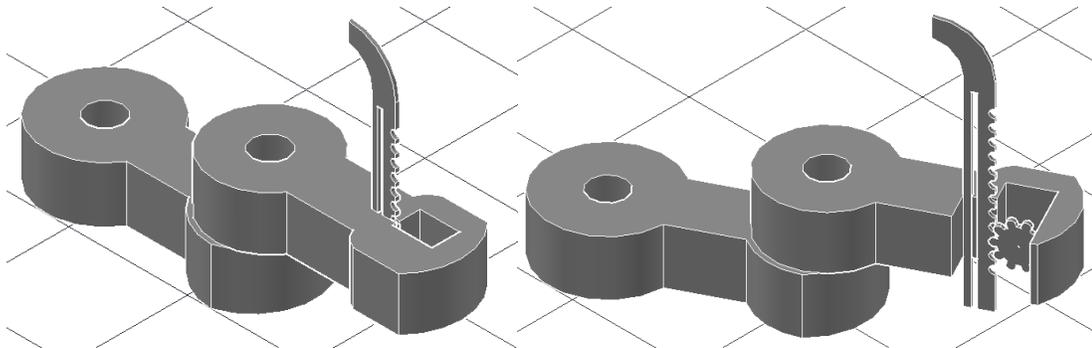


Figura 3.4: Esquema del Brazo SCARA (Proyección Isométrica)

En la imagen de la derecha de la **figura 3.4** se observa el engrane y el acoplamiento a la regleta dentada (cremallera), elementos que se encargarán de dar el movimiento prismático a la tercera articulación.

3.3.2. Módulo de Control

El módulo de control se puede describir como un gabinete que contiene los elementos que controlan a cada servomotor. La cantidad de grados que se desea mover en cada articulación se ingresará a través de un teclado matricial con el cual también se podrá elegir la articulación que se desea mover. Toda esa información estará reflejada en una pantalla de cristal líquido (LCD) donde se observará la información referente a cada articulación y la cantidad de grados que se moverá o, en su defecto, se ha movido dicha articulación.

Además de lo mencionado anteriormente, en su interior se encontrará la fuente que alimentará a cada servomotor. Un modelo preliminar de lo que se pretende para el módulo de control se puede observar en las imágenes correspondientes a la **figura 3.5**, las cuales brindan un vistazo del módulo de control en dos vistas diferentes.

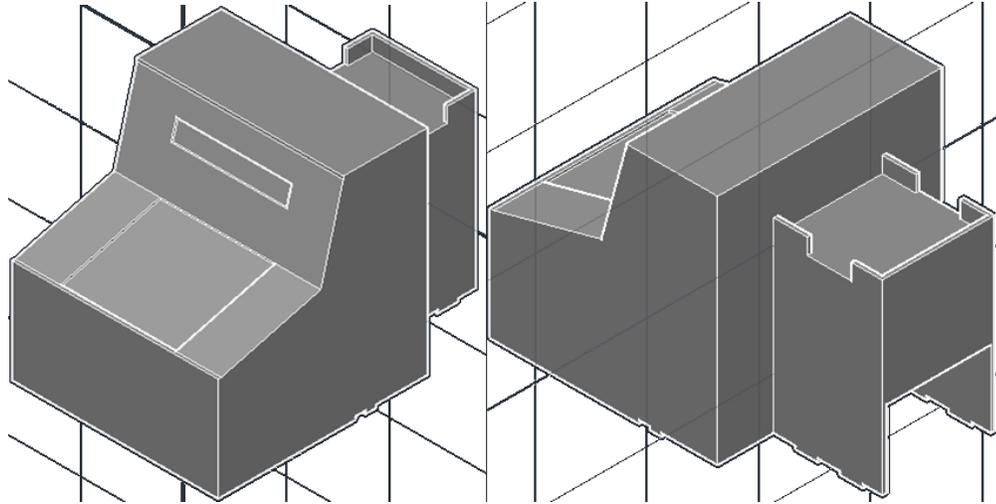


Figura 3.5: Esquema del Módulo de Control (Proyección Isométrica)

En el boceto se incorporó la estructura que servirá como base a la primera articulación y que se encuentra fija a la parte trasera del módulo de control. Dicha estructura es visible en ambas imágenes de la **figura 3.5**.

3.4. Estructura y Armazón

Un armazón se define como una pieza o un conjunto de piezas que se unen para formar una estructura que servirá como soporte de algo [6]. Para crear el armazón tanto del módulo de control como de cada articulación, se propone utilizar la técnica del corte láser para crear cada pieza que conformará la estructura. Dicha técnica puede ser utilizada en diversos materiales, como acrílico, madera, aluminio, entre otros, siempre y cuando el material cumpla con ciertas características como el grosor y la limitante del espacio de trabajo de la misma máquina de corte láser. El corte láser, por no tener una herramienta en contacto con el material, sus tiempos de corte son más rápidos y de bordes rectos comparado con otros métodos de corte con herramienta como el router, sin embargo, ambas tecnologías pueden ser utilizadas.

Al tratarse de máquinas CNC (Control Numérico Computarizado), ambas tecnologías funcionan siguiendo un patrón de coordenadas que la máquina traduce a partir del diseño asistido por computadora el cual se puede realizar en diversos programas como Illustrator, Corel Draw, AutoCAD, entre otros programas orientados al diseño en 2D y 3D.

3.4.1. Diseño Asistido por Computadora del Módulo de Control

Como se mencionó antes, para que la máquina de corte pueda realizar su trabajo es necesario indicarle la trayectoria que debe recorrer al mismo tiempo que va cortando el material. El módulo de control del robot manipulador a escala que este trabajo propone consta de dieciséis piezas que se ensamblan para formar toda la estructura. Las siguientes imágenes muestran las piezas mencionadas, además de las medidas más importantes de cada pieza.

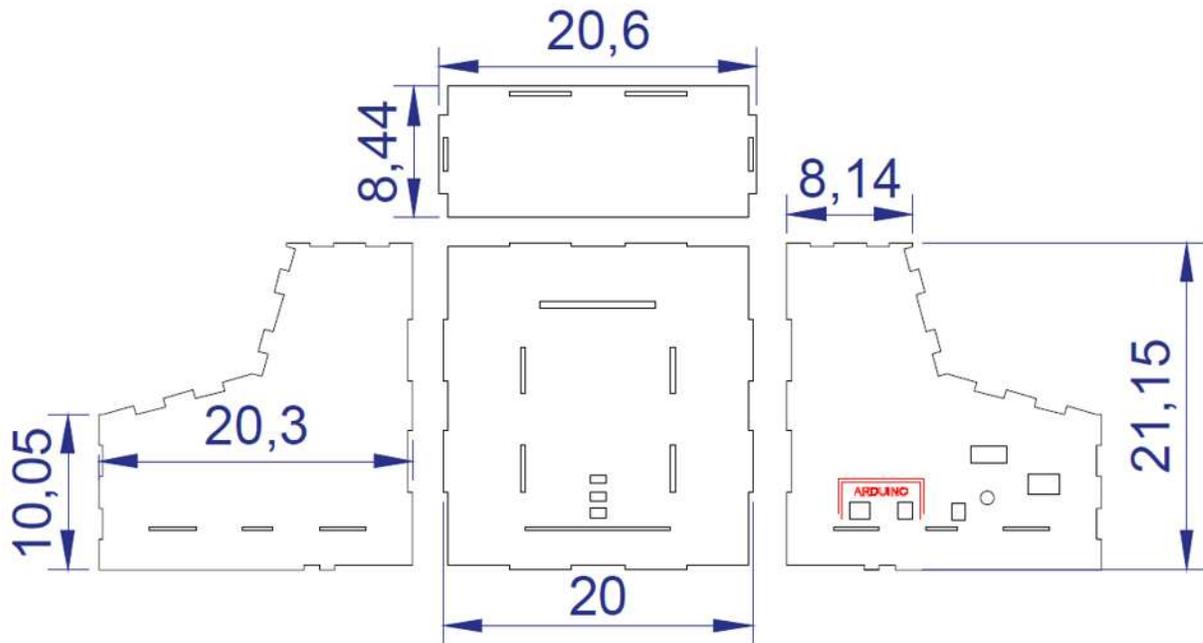


Figura 3.6: Diseño de los Elementos Correspondientes a los Laterales, Parte Trasera y Superior del Módulo de Control

En la **figura 3.6** se puede observar una captura de pantalla del diseño asistido por computadora. En esta captura se muestran las piezas que corresponden a los laterales, la parte trasera y la parte superior que conformaran el módulo de control. También se aprecia en uno de los laterales (parte derecha de la imagen) una inscripción en color rojo con la leyenda “ARDUINO”, que la máquina de corte láser traduce como grabado, es decir, será una marca en el material que tiene la función visual de separar los elementos del Arduino de los elementos de la fuente de voltaje.

La siguiente imagen (**figura 3.7**) al igual que la anterior, es una captura de pantalla donde se muestran las piezas que sostendrán el teclado matricial (izquierda), la base que sostendrá tanto a la placa Arduino como a la fuente de voltaje (al medio) y la pantalla LCD (derecha). En las piezas que sostendrán el teclado matricial se pueden notar unas inscripciones en

color rojo las cuales serán interpretadas por la máquina de corte laser como grabado y tienen la función de orientar al operador del prototipo sobre qué teclas debe presionar.

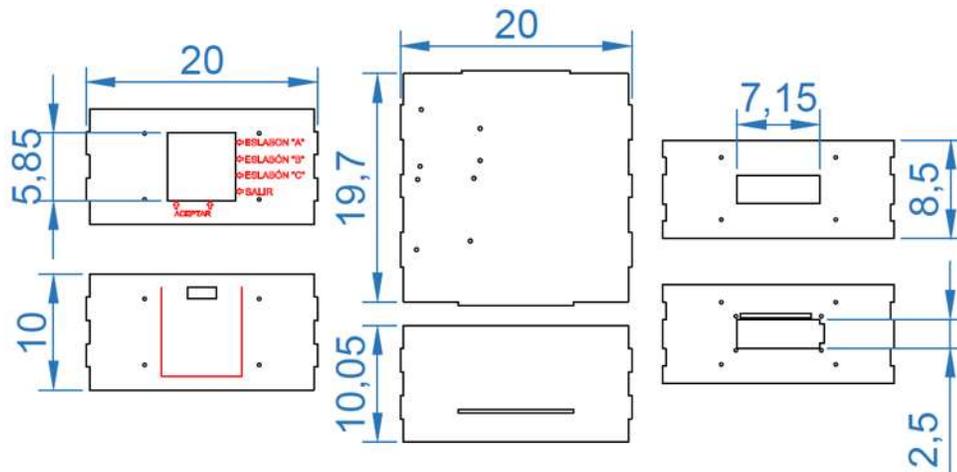


Figura 3.7: Diseño de los Elementos Correspondientes al Soporte del Teclado, Soporte de la Pantalla LCD, la Base y Parte Frontal del Módulo de Control

La tercera imagen es la correspondiente a la **figura 3.8** y muestra las piezas que formarán la estructura de la primera articulación, ubicada en la parte trasera del módulo de control.

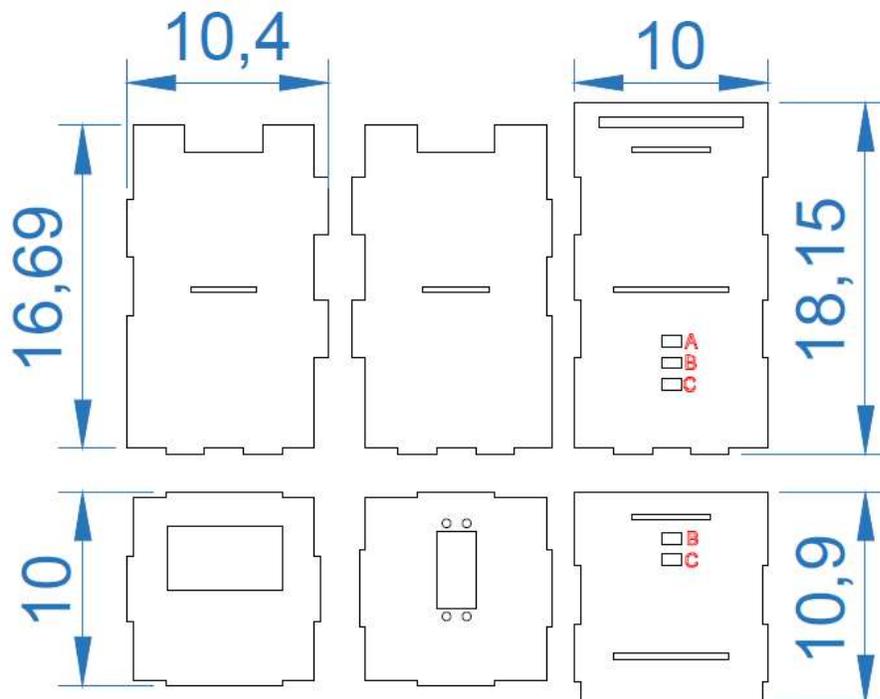


Figura 3.8: Elementos Correspondientes a la Base que Sostiene la Primera Articulación

Es en esta última imagen (**figura 3.8**) se pueden observar en las dos piezas del lado derecho, unas ranuras en cuyo costado tienen la marca (en rojo) A, B y C. Estas ranuras tienen la función de separar el cableado de cada servomotor, saliendo por la ranura «A» los cables correspondientes a la primera articulación y así sucesivamente. Tales ranuras tienen por objetivo la identificación de cada articulación y no cometer un error al momento de conectar y desconectar cada servomotor. La estructura que se formará al ensamblar los elementos de esta última imagen es donde se soportará la primera articulación para ambos tipos de robot manipulador.

3.4.2. Diseño Asistido por Computadora de los Eslabones

En este apartado se describe brevemente el diseño computarizado de cada articulación tanto del brazo SCARA como del brazo PUMA.

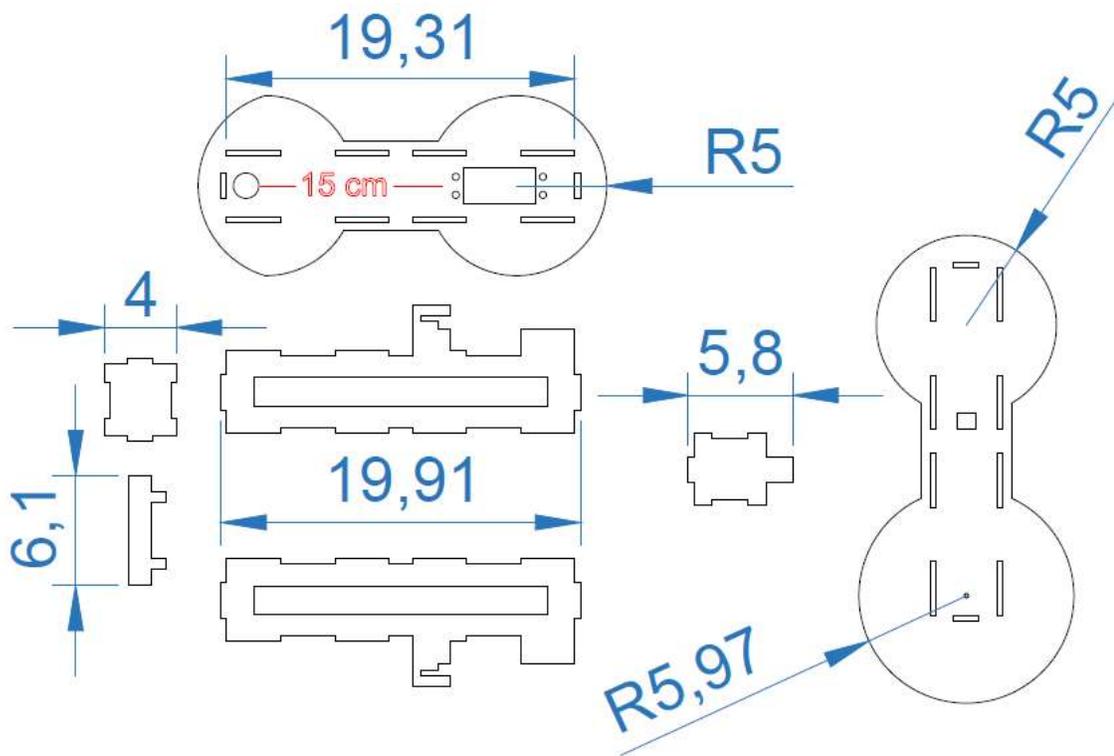


Figura 3.9: Diseño de las piezas correspondientes al primer eslabón del brazo SCARA

La primera imagen (**figura 3.9**) muestra las siete piezas que conforman el primer eslabón del brazo SCARA así como las dimensiones principales y la señalización (en rojo) de la distancia entre el centro del primer servomotor y el segundo servomotor.

También se pueden observar algunas ranuras cuya función es ensamblar cada pieza, así como la ranura donde se soportará el segundo servomotor.

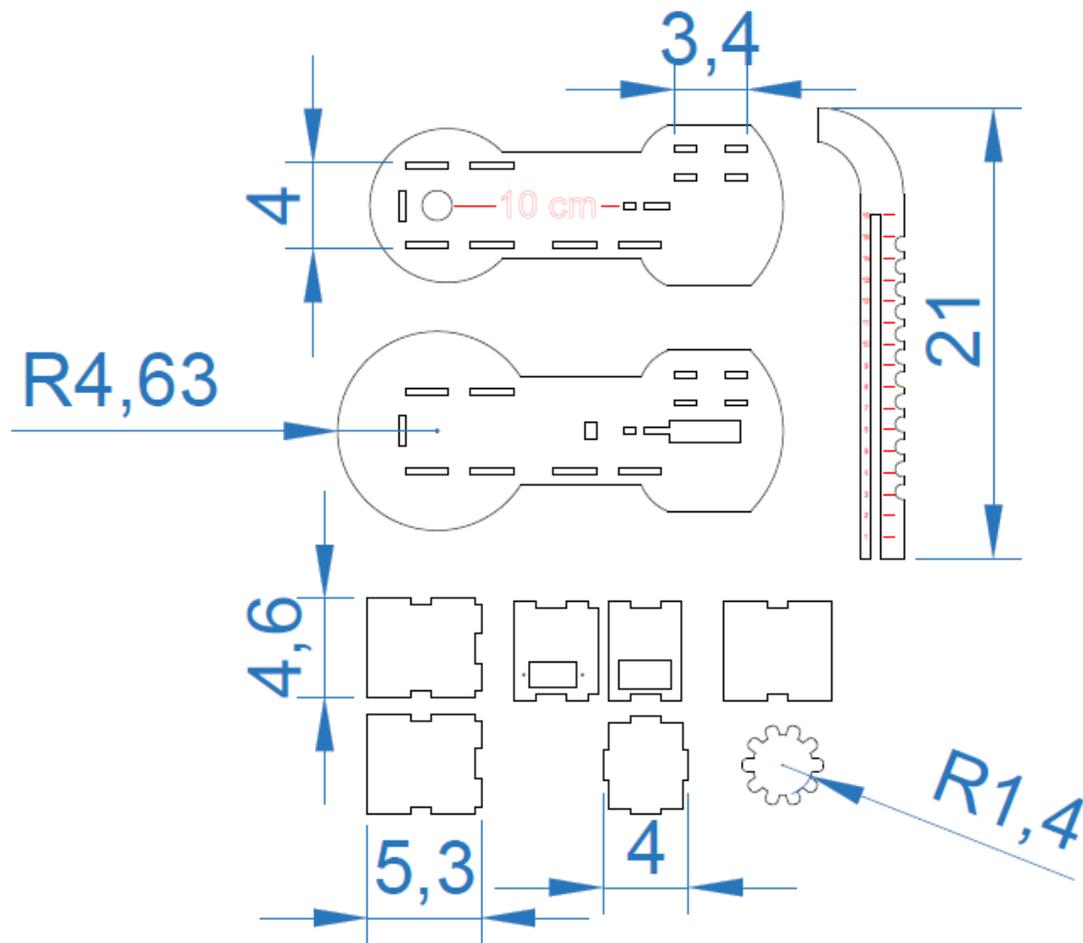


Figura 3.10: Diseño del Segundo y Tercer Eslabón del Brazo SCARA

La segunda imagen (**figura 3.10**) muestra las piezas que constituyen a la segunda y tercera articulación del robot SCARA, esta última siendo únicamente una regleta numerada en centímetros y un engrane que generará el movimiento de la misma. Así como en el primer eslabón, se observan las ranuras y perforaciones que servirán para la unión de la estructura y la sujeción del tercer servomotor, mismo que proporcionará el movimiento al engrane mencionado anteriormente. También se muestran las dimensiones más representativas, la graduación de la regleta marcada en rojo y la longitud existente entre el centro del segundo servomotor hasta el centro de la tercera articulación.

Pasando a las articulaciones del brazo PUMA, la primera imagen correspondiente a la **figura 3.11**, muestra las cinco piezas de las que está construido el primer eslabón del robot PUMA. Se puede notar la abertura que sostendrá al servomotor, así como las ranuras que permiten el ensamble de la articulación.

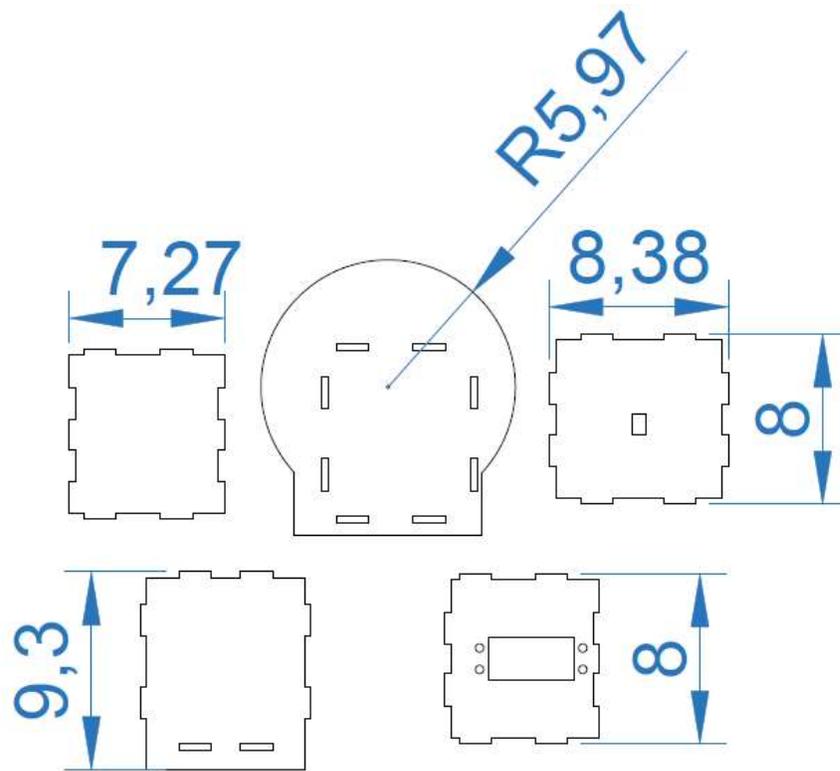


Figura 3.11: Diseño del Primer Eslabón del Brazo PUMA

La imagen que a continuación se presenta (**figura 3.12**) muestra las piezas que forman el segundo eslabón del brazo PUMA donde se observa que cada elemento tiene sus ranuras para poder ensamblarlas y formar la estructura del mismo, así como el espacio donde se sostiene el tercer servomotor que dará movimiento a la tercera articulación. También se puede notar la marca (en color rojo) de la longitud entre los centros de los servomotores.

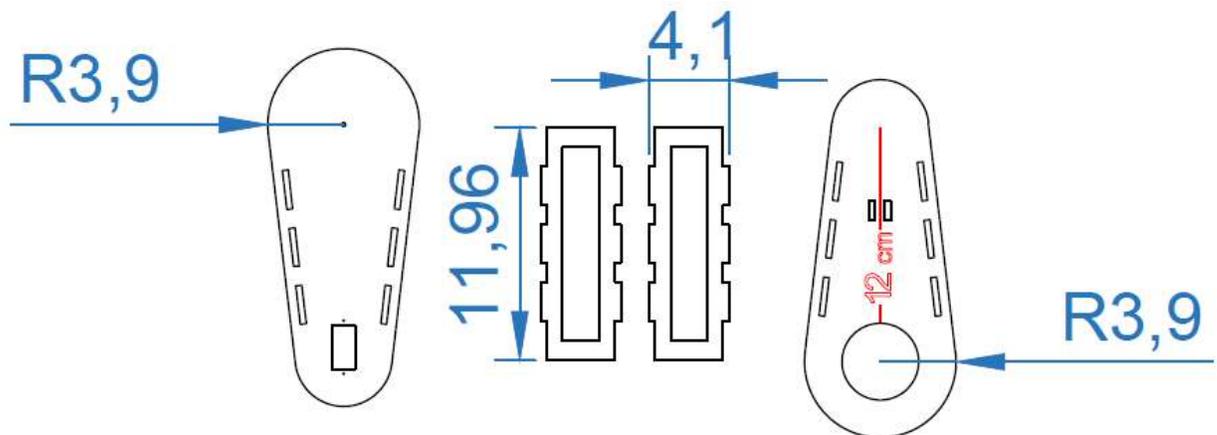


Figura 3.12: Diseño del Segundo Eslabón del Brazo PUMA

Finalmente, la última imagen (**figura 3.13**) muestra la tercera articulación, siendo ésta la más simple de todas, pues sólo consta de cuatro piezas con sus respectivas perforaciones de ensamble así como la longitud entre el centro del tercer servomotor y el lugar que ocuparía el efector final.

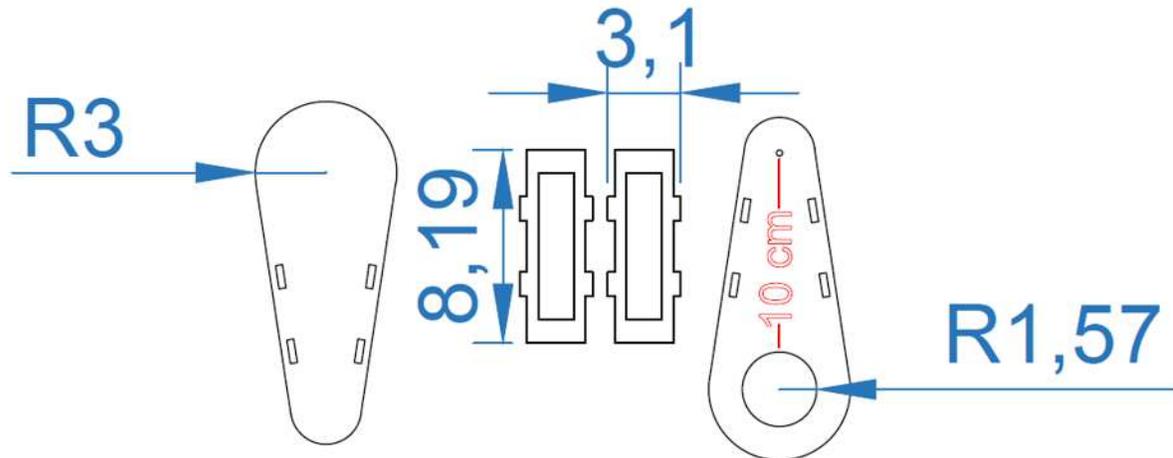


Figura 3.13: Diseño del Tercer Eslabón del Brazo PUMA

Es importante indicar que el grabado que indica las longitudes entre los servomotores es importante, ya que la longitud de cada eslabón será útil para el desarrollo matemático que determina la posición del brazo robótico.

3.4.3. Corte Láser y Material de la Estructura

Como ya se mencionó antes, la máquina de corte láser es una herramienta a la que se puede tener acceso de una manera relativamente fácil, si bien no cualquier persona puede comprar una máquina, ya existen en el mercado diversos establecimientos que facilitan el acceso a ellas. Independientemente de cómo se tenga acceso a la máquina de corte láser, ya sea adquiriéndola para uso personal o a través de estos establecimientos dedicados al corte, se debe considerar que para poder utilizarlas se necesita tener conocimiento en diseño asistido por computadora.

Para entender el funcionamiento de una máquina de corte láser es necesario definir qué es un láser. Un láser es un dispositivo diseñado para concentrar un haz de luz en un punto específico; se compone de un par de espejos, de un medio activo que permita amplificar la luz y de un haz de luz o corriente eléctrica que dará la energía al medio activo.

El nombre de este dispositivo es Amplificación de Luz por Emisión Estimulada y hoy en día tiene muchas aplicaciones industriales, médicas y en telecomunicaciones.

El láser se encuentra por lo regular en la parte posterior de las máquinas de corte y emite un haz de luz hacia una serie de espejos que se encargan de reflejar el haz hasta la cabeza del láser donde se direccionará la luz hacia abajo. Antes de que la luz salga de la máquina, pasa por un medio activo que se encarga de amplificar el haz. En máquinas de CO₂ el dióxido de carbono es el medio que desempeña esta tarea.

Una máquina de este tipo permite hacer diseños complejos alcanzando una alta precisión, esto se debe a que el láser tiene la capacidad de moverse siguiendo cualquier trayectoria a una velocidad alta. Además, según la potencia de corte del equipo, se pueden cortar materiales diversos de mediana densidad.

Los equipos actuales tienen un funcionamiento automatizado gracias al CNC (Control Numérico Computarizado) que permite, además de mantener una distancia constante entre la superficie del material y el emisor de luz, programar comandos que controla la velocidad y el diseño a seguir según las necesidades de cada corte y material. [7]

Previamente se mencionó que dependiendo de la máquina láser, esta puede cortar madera, acrílico, MDF, papel, cartón, algunos tipos de plástico e incluso algunas máquinas pueden cortar metales como el aluminio.

Para la realización del armazón del prototipo de robot manipulador reconfigurable se utilizó MDF que es un material bastante fácil de adquirir, tiene la suficiente firmeza para soportar los elementos electrónicos y además es económico comparado con el acrílico o el aluminio.

Las siglas MDF significa Tablero de Fibras de Densidad Media, del inglés Medium Density Fibreboard. Este material es fabricado a partir de fibras de madera (en polvo) y resinas sintéticas comprimidas. Tiene la ventaja de ser un material económico, comparado con materiales plásticos, metálicos e incluso que la madera maciza. Durante el proceso de fabricación se pueden agregar diversos productos químicos que le dan otras características como repeler el agua o evitar hongos y moho.

Resulta un material bastante cómodo de utilizar pues además de las ventajas ya mencionadas, su acabado es liso y similar al de la madera maciza, incluso de puede lijar, pintar y manipular con las mismas herramientas con que se trabaja la madera.

A continuación, se presentan dos imágenes (**figura 3.14** y **figura 3.15**) en las que se muestra el diseño computarizado (izquierda) y la pieza cortada con la máquina de corte láser (derecha). Las imágenes en cuestión, muestran el comparativo entre la pieza diseñada en computadora y la pieza cortada con láser.

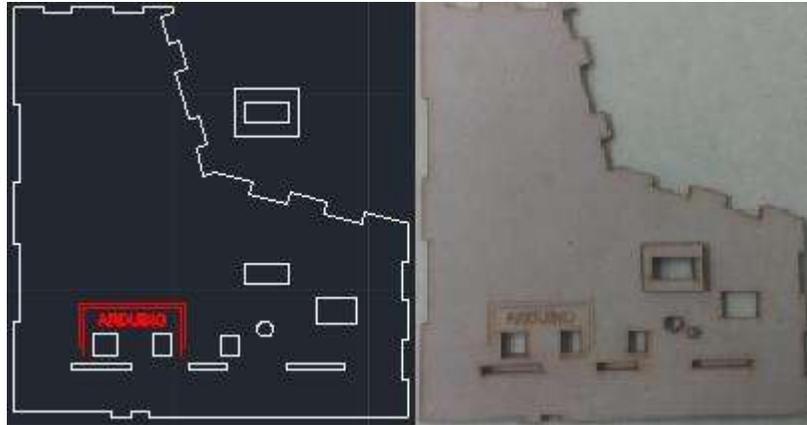


Figura 3.14: Pieza Lateral Realizada con Corte Láser

La **figura 3.14** corresponde a la pieza lateral del módulo de control. Es en esta pieza donde se deja expuesto, mediante ranuras, los puertos de la placa Arduino y los puertos de la fuente de voltaje. Concretamente, las ranuras para la placa Arduino dejan al descubierto el puerto USB y el jack de alimentación, para conectar la placa Arduino a una computadora y programarla sin tener que desmontarlo del prototipo. Las ranuras que se realizaron para la fuente de voltaje corresponden al jack de alimentación, el interruptor de on-off, el poste del potenciómetro para variar el voltaje y la ranura que soporta el voltímetro que muestra el voltaje que se está suministrando a los servomotores.

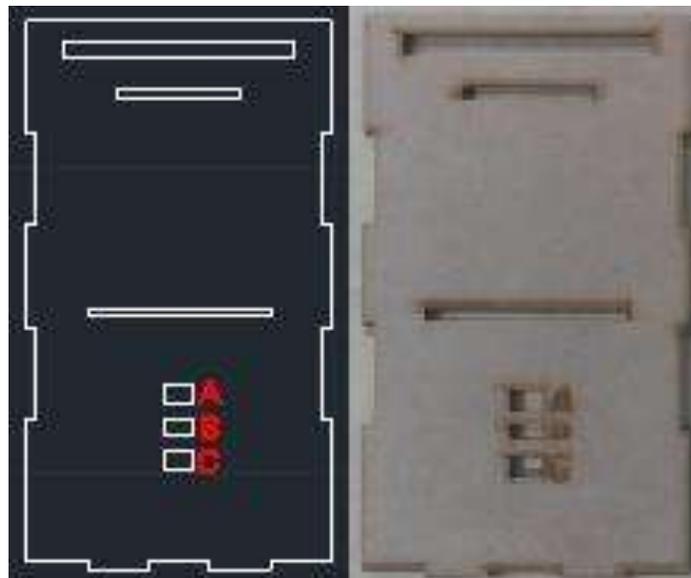


Figura 3.15: Pieza Trasera Realizada con Corte Láser

La **figura 3.15** muestra una pieza trasera del módulo de control. Se puede observar que tiene las tres ranuras que separan el cableado de los servomotores además de las ranuras que sirven para el ensamble de la estructura.

3.5. Servomotores Electrónicos

Un servomotor electrónico (o simplemente servo) es un motor de corriente directa que tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación que generalmente es de 0° a 180° , y mantenerse estable en dicho posicionamiento. Estos servomotores se suelen utilizar en robótica, automática y modelos de vehículos por radio-control, entre algunas otras, debido a su gran precisión en el posicionamiento.

En general, los servomotores electrónicos suelen estar compuestos por cuatro elementos fundamentales:

1. **Motor de corriente directa (DC):** Es el elemento que le brinda movilidad al servomotor. Cuando se aplica voltaje en sus terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje se aplica con las terminales invertidas, el sentido de giro también se invierte.
2. **Tren de engranajes:** Son engranes que se encuentran dispuestos de tal manera que se encargan de reducir la alta velocidad del giro del motor para incrementar la capacidad de torque o par.
3. **Sensor de desplazamiento:** Suele ser un potenciómetro colocado en el eje de salida del servomotor que se utiliza para conocer la posición angular del motor.
4. **Circuito de control:** Es una placa electrónica que implementa una estrategia de control de la posición por retroalimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada) con la posición actual medida por el potenciómetro. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la dirección necesaria para reducir el error.

La **figura 3.16** muestra las partes que componen a un servomotor de uso general:

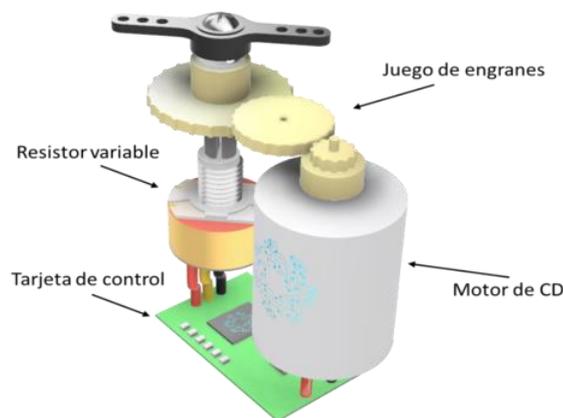


Figura 3.16: Componentes de un Servomotor Electrónico

3.5.1. Funcionamiento del Servomotor Electrónico

Los servomotores disponen de tres cables, dos de alimentación (positivo y negativo) que suministran un voltaje de entre 4.8v y 6v, y un cable de control que indica la posición deseada al circuito de control mediante señales PWM (Pulse Width Modulation). El color de los cables dependerá del fabricante.

La imagen que se encuentra a continuación (**figura 3.17**) muestra los colores más comunes de los servomotores que se encuentran comercialmente, así como la función de cada cable.

Voltaje positivo	Tierra (ground)	Señal de control
		

Figura 3.17: Colores Típicos de los Cables de Alimentación de un Servomotor

Las señales PWM utilizadas para controlar los servomotores están formadas por pulsos positivos cuya duración es proporcional a la posición deseada del servo y que se repiten cada 20ms (milisegundos). Todos los servomotores pueden funcionar correctamente en un rango de movimiento de 90°, que se corresponde con pulsos PWM comprendidos entre 0.9ms y 2.1ms. Sin embargo, también existen servos que se pueden mover en un rango extendido de 180° y sus pulsos de control varían entre 0.5ms y 2.5ms. [8] En la **figura 3.18** se puede notar el giro que un servomotor tiene cuando se introduce un ancho de pulso específico en su línea de control y que va desde 0° hasta 180°.

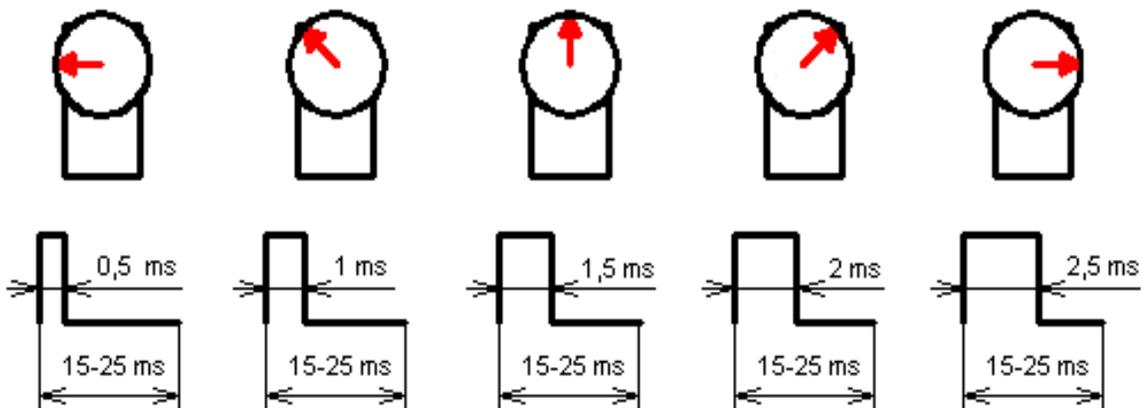


Figura 3.18: Anchos de Pulso y sus Correspondientes Posiciones

El diagrama de bloques del servomotor (**figura 3.19**) representa de forma visual al servomotor como un sistema. El circuito electrónico es el encargado de recibir la señal PWM y traducirla en movimiento del motor de corriente directa. El eje del motor está acoplado a un potenciómetro, el cual permite formar un divisor de voltaje. El voltaje en la salida del divisor varía en función de la posición del eje del motor.

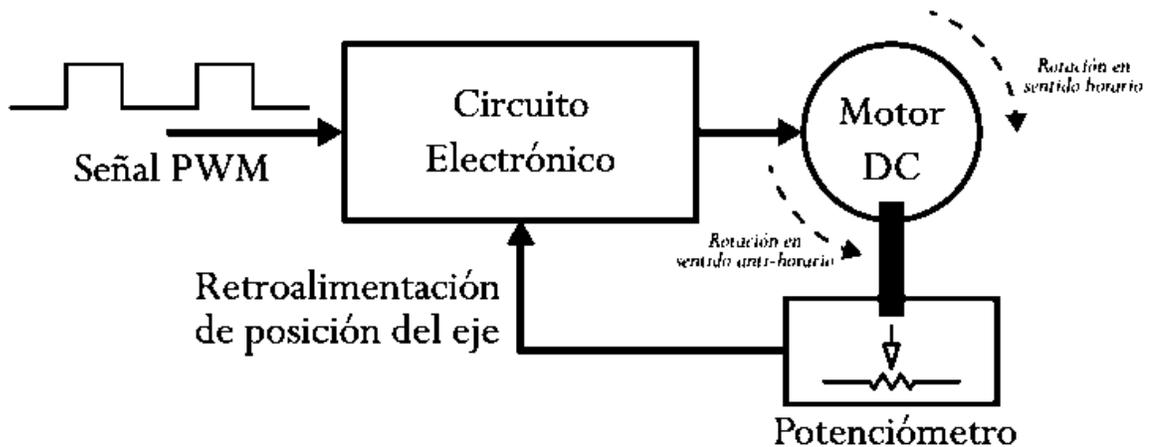


Figura 3.19: Diagrama de Bloques de un Servomotor

Cuando el eje del motor modifica la posición del potenciómetro, el voltaje en la terminal central varía. El potenciómetro permite que el circuito de control electrónico pueda retroalimentarse con la posición del motor en un momento dado. En teoría de control se le conoce como un sistema de lazo cerrado.

3.5.2. Consumo de Energía

La energía consumida por una carga eléctrica será igual a la potencia multiplicada por el tiempo de uso del motor. Debido a que los servomotores son alimentados entre 4 y 6 volts, es posible asumir que el voltaje de alimentación es casi constante para la mayoría de modelos. Lo que no es igual para uno u otro modelo de servomotor es el consumo de corriente. La corriente demandada por un servomotor depende de diferentes parámetros:

- Modelo del servomotor según su fabricante.
- La inercia acoplada al eje del motor. Esto incluye la inercia del sistema de engranajes y la de la carga que esté acoplada al motor.
- La velocidad de rotación aplicada al eje del servomotor.

A mayor consumo de corriente, mayor demanda de potencia y por extensión, mayor consumo de energía. Esto es especialmente importante a la hora de controlar este tipo de motores con un microcontrolador.

El consumo de corriente de un servomotor casi siempre es superior a la capacidad máxima del microcontrolador, por lo que se recomienda utilizar fuentes externas.

Los microcontroladores no han sido diseñados para entregar corriente a una carga sino para entregar señales de control. Estas señales de control se utilizan para activar o desactivar transistores BJT o MOSFET, los cuales han sido especialmente diseñados para manejar grandes corrientes o voltajes. [9]

3.5.3. Servomotor Futaba S3003 y MicroServo Sg90

Para la realización de este modelo a escala de un robot manipulador reconfigurable se utilizaron dos tipos de servomotores por varias características. Principalmente por el torque de estos, además del costo y el tamaño.

El primer modelo de servomotor que se utilizó es el llamado Futaba S3003 el cual es un servomotor multipropósito de buenas características para el bajo costo del mismo. Las características principales se describen en la **tabla 3.1**.

Tabla 3.1: Especificaciones del Servomotor Futaba S3003

ESPECIFICACIONES

Modulación	Análogo
Torque	4.8v: 3.17kg-cm 6.0v: 4.10kg-cm
Velocidad	4.8v: 0.23s/60° 6.0v: 0.19s/60°
Peso	37g
Dimensiones	Largo: 39.9mm Ancho: 20.1mm Altura: 36.1mm
Tipo de Engranaje	Plástico
Ángulo de Rotación	180°

Este servomotor se utiliza una en la base que dará el movimiento a la primera articulación tanto para el brazo SCARA como del brazo PUMA, además de estar en la segunda articulación de ambos casos también.

Es necesario que los servomotores de la primera y segunda articulación tengan buen torque pues son los servomotores que deben mover las estructuras de más peso, es decir, el primer servomotor debe soportar el peso de la segunda estructura con un servomotor, y de la tercera con el servomotor restante. La **figura 3.20** muestra el servomotor Futaba S3003.



Figura 3.20 Servomotor Futaba S3003

Estos servomotores tienen un buen rendimiento, un costo accesible y son bastante resistentes. Es por esto que son una buena opción para el desarrollo del prototipo que se propone en este trabajo.

El segundo modelo de servomotor que se incluyó es el MicroServo Tower Pro SG90, el cual es ideal para proyectos sencillos donde no se le exija demasiado al MicroServo, motivo por el cual se decidió poner este modelo en la última articulación, pues sólo moverá un engrane y una regleta dentada para el caso del robot SCARA, y un eslabón que ya no contiene ningún elemento electrónico para el caso del robot PUMA. Las características de este dispositivo se estipulan en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2: Especificaciones del MicroServo Tower Pro SG90

ESPECIFICACIONES	
Modulación	Análogo
Torque	4.8v: 1.8kg-cm
Velocidad	4.8v: 0.1s/60°
Peso	9g
Dimensiones	Largo: 22.2mm Ancho: 11.8mm Altura: 31mm
Tipo de Engranaje	Plástico
Ángulo de Rotación	180°

A pesar de que este último modelo no es recomendable para trabajos que requieran un torque muy alto y que al exigirlo se daña con mucha facilidad, la función que este cumple en este prototipo de robot manipulador es muy simple al cargar una estructura de un peso muy bajo. Así pues, este modelo cumple y se desempeña de buena manera, además de ser más económico y consumir menos corriente que el Futaba S3003. La siguiente imagen (figura 3.21) muestra al MicroServo SG90 de Tower Pro.



Figura 3.21: MicroServo Tower Pro SG90

3.6. Plataforma de Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de prototipos de código abierto (open source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Fue inventado en el año 2005 por el entonces estudiante del instituto IVRAE, Massimo Banzi, quien en un principio pensaba en hacer Arduino por una necesidad de aprendizaje para los estudiantes de computación y electrónica del mismo instituto, ya que en ese entonces, adquirir una placa de microcontroladores era bastante caro y no ofrecían el soporte adecuado; no obstante, nunca se imaginó que esta herramienta se convertiría en el líder mundial de tecnologías DIY (Do It Yourself).

Arduino consta de una placa principal de componentes eléctricos, donde se encuentran conectados los controladores principales que gestionan los demás complementos y circuitos ensamblados en la misma. Además, requiere de un lenguaje de programación para poderlo configurar y programar a nuestra necesidad, por lo que se puede decir que Arduino es una herramienta “completa” en cuanto a las herramientas principales.

3.6.1. Hardware

Arduino está constituido por un microcontrolador principal llamado Atmel AVR de 8 bits (que es programable con un lenguaje de alto nivel), presente en la mayoría de los modelos de Arduino, encargado de realizar los procesos lógicos y matemáticos dentro de la placa, además de controlar y gestionar los recursos de cada uno de los componentes externos

conectados a la misma. Consta además de una amplia variedad de sensores eléctricos como cámaras VGA, sensores de sonido, seguidores de línea e incluso otras placas de microcontroladores (mejor conocidas como Shields), que pueden adaptarse fácilmente gracias a que Arduino cuenta con entradas de pines analógicos y digitales para integrar estos componentes sin necesidad de alterar el diseño original de esta placa. Estos a su vez son controlados junto con el procesador primario por otros componentes de menor jerarquía, pero de igual importancia y prioridad, como el Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y el Atmega8 que son los más utilizados debido a sus bajos costos y gran flexibilidad para construir diversidad de diseño.

Además, Arduino cuenta con la ventaja de tener entre sus elementos principales puertos seriales de entrada/salida, lo que le permite conectarse por medio de un cable USB a una computadora para poder trabajar con ella desde el nivel software, ya que es dónde se le darán las “órdenes” que ejecutarán cada uno de los componentes conectados a la placa, e incluso para operar como un dispositivos más. Para su operación, Arduino necesita de una fuente de alimentación externa por lo que también se encuentra incorporada una entrada para dicha fuente externa.

Las características generales de todas las placas Arduino son las siguientes:

- Microprocesador Atmega328.
- 32kbytes de memoria Flash.
- 1kbyte de memoria RAM.
- 16 MHz.
- 13 pines para entradas/salidas digitales (programables).
- 6 pines para entradas analógicas.
- 6 pines para salidas analógicas (salidas PWM).
- 14 pines digitales de entrada/salida.
- Corriente de salida de los pines de 40mA.

3.6.2. Software

Arduino no sólo son componentes electrónicos ni una placa de circuitos, sino que además, también es una plataforma que combina esto con un lenguaje de programación que sirve para controlar los distintos sensores que se encuentran conectados a la placa por medio de instrucciones y parámetros que nosotros establecemos al conectar la placa a un ordenador. Este lenguaje que opera dentro de Arduino se llama Wiring, basado en la plataforma Processing y primordialmente en el lenguaje de programación C/C++, que se ha vuelto el preferido para enseñar programación a alumnos de nivel superior que estudian computación y robótica.

Al ser una herramienta que incorpora hardware y software, se requiere un nivel de conocimientos básicos en estas dos ramas para poder operarla, lo que limita a algunas personas a no poder operarla inicialmente pero que por su popularidad, se encuentran disponibles libros, páginas de internet, foros y demás repertorio para aprender a utilizar estas placas.

Por otra parte, existen simuladores virtuales de Arduino que ayudan al aprendizaje antes de comenzar a utilizarla de manera física. [10]

3.6.3. Ventajas

Arduino ofrece algunas ventajas puntuales sobre otros sistemas similares:

- **Económico:** Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas con microcontroladores.
- **Multiplataforma:** El software de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas con microcontroladores están limitados a Windows.
- **Entorno de Programación Simple:** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también.
- **Código Abierto y Software Extensible:** El software de Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR-C, en el cual está basado. De forma similar, se puede añadir código AVR-C directamente en los programas Arduino si se requiere.
- **Hardware Extensible:** Arduino está basado en microcontroladores Atmega8 y Atmega168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que los diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndolo y mejorándolo. [11]

Además de todo lo anterior, por ser una herramienta muy popular entre las personas que son principiantes y aquellos que tienen un conocimiento avanzado, Arduino cuenta con una extensa variedad de foros en internet donde se resuelven muchas dudas, errores de programación o dificultades para vincular hardware externo, logrando una retroalimentación de conocimiento entre la amplia comunidad.

3.7. Pantalla LCD

Una pantalla de LCD (Liquid-Crystal Display) es aquella pantalla delgada, formada por un determinado número de píxeles que se colocan delante de una fuente de luz. La primera pantalla de LCD fue producida en Estados Unidos en el año 1972 a cargo de Peter T. Brody.

En una pantalla de este tipo, cada pixel está formado por una capa de moléculas ubicadas entre dos electrodos y dos filtros de polarización. El cristal líquido permite que la luz pase de un polarizador al otro. A pesar de la amplitud del uso de pantallas de LCD, existen ciertos inconvenientes o limitaciones ante otras como las pantallas de plasma. Entre estos pueden contarse, problemas de resolución con determinados tipos de imágenes, retrasos en el tiempo de respuesta que crea imágenes fantasma en la pantalla, ángulo de visión limitado que reduce el número de personas que pueden ver cómodamente la misma imagen, fragilidad y vulnerabilidad del artefacto, aparición de píxeles muertos y de bandas horizontales o verticales.

Uno de los problemas más frecuentes en las pantallas de LCD es la imposibilidad de utilizarlas adecuadamente en un ambiente externo dado que la presencia de luz del sol reduce la visibilidad de la pantalla. Sin embargo, nuevas tecnologías de LCD superaron esta dificultad permitiendo el uso de dichas pantallas de forma óptima en todo tipo de condiciones. [12]

Ya que el prototipo no requiere de una interfaz visual muy compleja, no se ocupa una resolución de caracteres muy grande, por ello se optó por una pantalla básica de 16x2, es decir, 16 caracteres por dos líneas (**figura 3.22**).

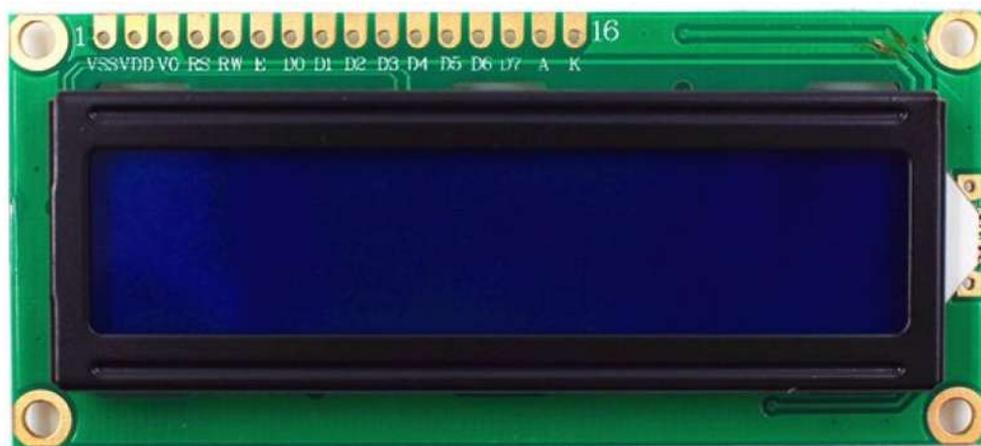


Figura 3.22: Pantalla LCD de 16x2 Caracteres

El uso de esta pantalla resulta suficiente para las necesidades que se desean cubrir. Estas son, indicar la articulación que se desea mover y mostrar el ángulo que se moverá. Las características de este tipo de pantallas se describen a continuación:

- Resolución de 16x2 caracteres.
- Iluminación de fondo azul con caracteres blancos.
- Tamaño de 80mm x 36mm x 10mm.

Además de su bajo costo y que cumple con sus características, la compatibilidad con Arduino es muy buena pues es el tipo de pantalla que generalmente se usan para los prototipos de esta índole.

3.8. Teclado

Un teclado es un dispositivo que presenta el conjunto de teclas de diversos aparatos, máquinas e instrumentos. Por lo general, el teclado permite el control o mando del dispositivo en cuestión.

En la actualidad, el término se encuentra muy asociado al periférico que permite introducir datos a una computadora o a otra máquina digital. Cuando el usuario presiona una tecla, se envía la información cifrada a la computadora y esta muestra el carácter correspondiente a la tecla en la pantalla. Los teclados suelen presentar teclas alfanuméricas, signos de puntuación y teclas especiales.

La distribución de teclado más común recibe el nombre de QWERTY por las primeras seis letras que muestran las teclas de la fila superior. Dicho diseño se atribuye al estadounidense Christopher Sholer en 1868. [13]

3.8.1. Teclado Matricial

El uso del teclado en electrónica es muy importante ya que a través de estos se puede introducir datos numéricos o hacer que los circuitos hagan algo de acuerdo al número que se presione en el teclado.

Dos de los teclados más comunes que se encuentran a la venta para el desarrollo de prototipos electrónicos son los teclados de punto común y los teclados matriciales. Básicamente los teclados de punto común tienen un elevado número de pines ya que a cada tecla le corresponde un pin más otros dos que son comunes para todas las teclas. Este tipo de teclados regularmente requiere de un codificador para conectarlo al microcontrolador ya que sin él ocuparía un número de pines más amplio. Sin embargo, al utilizar un codificador, solamente se utilizarían cuatro pines del microcontrolador.

Un teclado matricial es un simple arreglo de botones conectados en filas y columnas, de modo que se pueden leer varios botones con el mínimo número de pines requeridos. El teclado utilizado para este prototipo es un teclado matricial 4 x 4 (**figura 3.23**), el cual sólo ocupa cuatro líneas de un puerto para las filas y otras cuatro líneas para las columnas, de este modo se pueden leer las 16 teclas utilizando la mitad de líneas en un microcontrolador.

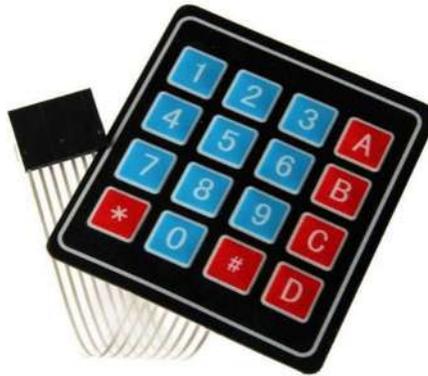


Figura 3.23: Teclado Matricial de 16 Botones

Si se asume que todas las columnas y filas inicialmente están en alto (1 lógico), la pulsación de un botón se puede detectar al poner cada fila en bajo (0 lógico) y revisar cada columna en busca de un cero, si ninguna columna está en bajo, entonces el cero de las filas se recorre hacia la siguiente y así sucesivamente. Si al final no se presionó ninguna tecla, la variable se pone a cero y la cuenta vuelve a empezar.

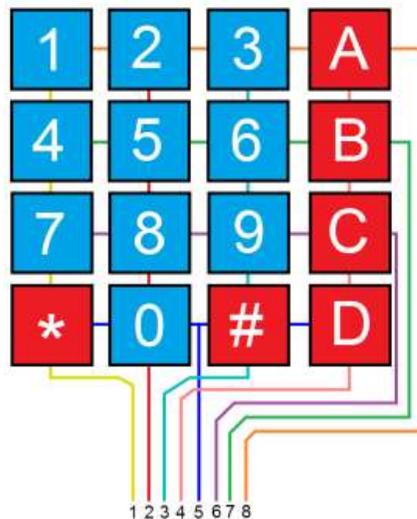


Figura 3.24: Distribución de Pines del Teclado Matricial

En la imagen anterior (**figura 3.24**) se observa la distribución matricial del teclado y cómo se interconectan en cada terminal.

3.9. Fuente Externa

Como la pantalla LCD, el teclado matricial y los servomotores están conectados a la placa Arduino, el suministro de energía que la placa ofrece no es suficiente para alimentar a todos estos elementos a la vez, es por eso que se decidió alimentar a los servomotores de manera independiente y solamente mandar la señal de control a través del Arduino ya que el servomotor no precisa de mucha corriente al recibir el pulso de control.

Si se tiene en cuenta que los servomotores se alimentan de 4.8 a 6 volts, y que cada servomotor consume aproximadamente de entre 0.4 y 0.5 amperios, se requiere de una fuente variable que comprenda el voltaje solicitado y que además tenga la capacidad de brindar de entre 1.2 a 1.5 amperios. Cabe mencionar que el consumo de amperaje más alto se da en el arranque del servomotor, por lo que no se requerirá que la fuente brinde los 1.5 amperios en todo momento. Otro punto a tener en cuenta para el diseño de la fuente es que el tercer servomotor (MicroServo SG90) tiene un consumo menor al de los servos Futaba S3003, por lo que el consumo total de los dos servomotores Futaba y el MicroServo SG90 no superará los 1.5 amperios. A pesar de esto, se consideró la misma corriente para los tres servomotores del brazo robótico para evitar complicaciones en su funcionamiento y garantizar que la fuente brindará la suficiente corriente sin problemas.

3.9.1. Regulador de Voltaje LM317T

El LM317T (**figura 3.25**) es un regulador de voltaje positivo cuyo rango de voltaje de salida oscila de 1.25 a 37 volts. Consta de tres terminales que son la entrada (Vin), salida (Vout) y una terminal de ajuste (Adj). Para lograr esta variación de voltaje sólo requiere de dos resistencias externas, una que tiene un valor fijo, y la segunda que debe ser variable como un potenciómetro o un Trim-Pot.

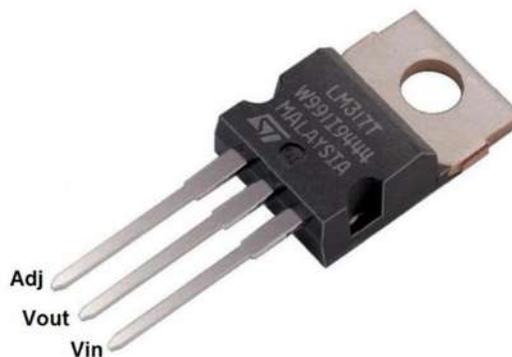


Figura 3.25: Regulador de Voltaje LM317T

Entre sus principales características se encuentra la limitación de corriente y protección térmica contra sobrecargas. El voltaje entre la terminal de ajuste y la terminal de salida es siempre de 1.25 debido a la resistencia interna del regulador. El esquema de conexión se muestra en la **figura 3.26**.

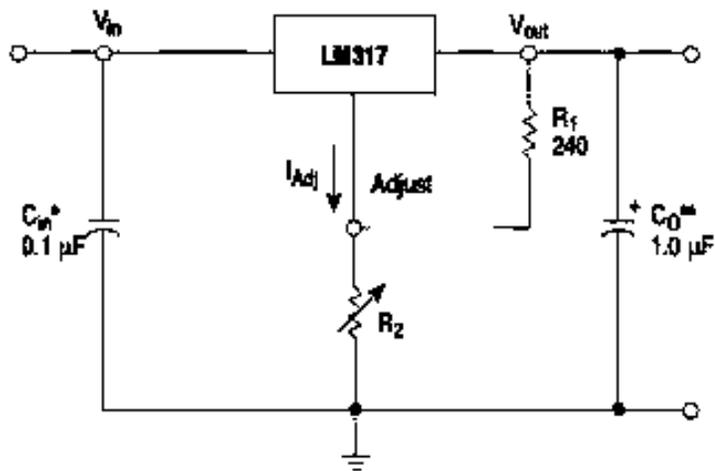


Figura 3.26: Esquema de Conexión del Regulador LM317T

Como consecuencia del voltaje fijo entre la terminal de ajuste y de salida (que es de 1.25v), la corriente que circula por la resistencia R1 es:

$$IR1 = \frac{V}{R1} = \frac{1.25v}{R1}$$

Esta misma corriente es la que circula por la resistencia R2. Entonces el voltaje en R2 será:

$$VR2 = IR1(R2) = \frac{1.25v(R2)}{R1}$$

Como la tensión de salida es:

$$Vout = VR1 + VR2$$

Entonces:

$$Vout = 1.25v + \frac{1.25v(R2)}{R1}$$

Simplificando por factor común se obtiene:

$$Vout = 1.25v \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

En la formulación se desprecia la corriente I_{adj} que circula entre la terminal de ajuste y la conexión de ambas resistencias, ya que tiene un valor máximo de $100\mu A$ y permanece constante con la variación de la carga o el voltaje de entrada. También se puede notar por la ecuación final que variando la resistencia R_2 , el voltaje también variará. [14]

Algunas características a tomar en cuenta son:

- Aunque el LM317T limita internamente la disipación de potencia, es mejor no exceder los 20W.
- El capacitor de C_{in} es útil en caso de que la fuente con la que se alimenta el regulador de voltaje varíe.
- El capacitor C_o sirve para estabilizar la señal de salida, a pesar de que la salida del regulador es suficientemente estable y su valor puede variar según la carga que se conecte.

3.9.2. Diseño de la Fuente para los Servomotores

Para la realización de la placa se utilizó el software Eagle de Autodesk, aplicando el esquema del LM317T mencionado anteriormente. Las dimensiones de la placa encajan bastante bien para el tamaño final del robot manipulador reconfigurable, ya que no contiene demasiados elementos. Estos elementos se enlistan a continuación en la **tabla 3.3**.

Tabla 3.3: Componentes de la Fuente de Voltaje

CANTIDAD	ELEMENTO	VALOR
1	LM317T	1.25v – 37v
1	Resistencia	220 Ω
1	Potenciómetro	1k Ω
1	Resistencia	100 Ω
1	Capacitor	4.7 μF
1	Capacitor	100nF
1	Trim-Pot	10k Ω
1	Tira de terminales	-----
1	Disipador de calor	-----
1	Interruptor	-----
1	Voltímetro	3.5v – 35v

Una vez realizado el diseño de la fuente con el software, se procede a realizar la placa de circuito impreso, utilizando una impresión del diseño (**figura 3.28**) para transferirlo a la placa fenólica. A continuación se muestra el diseño listo para la impresión.

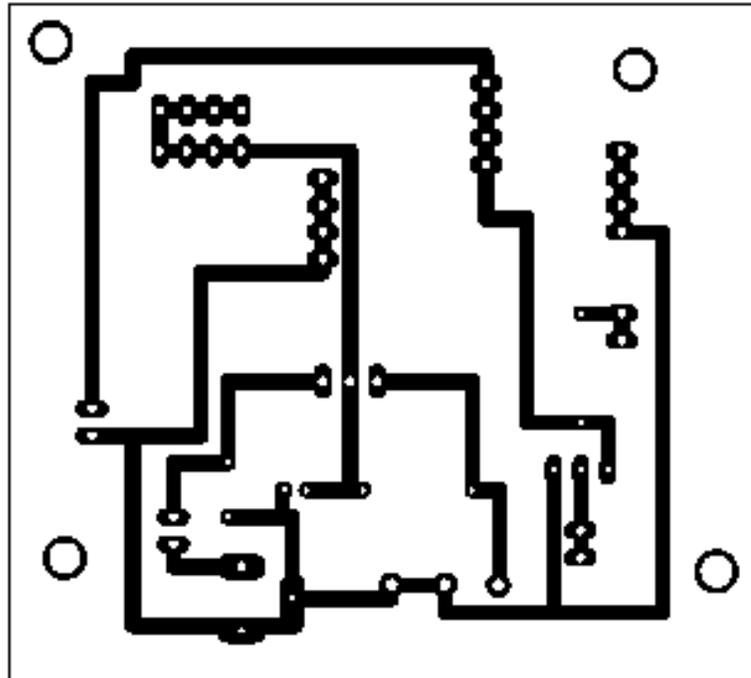


Figura 3.28: Impresión del Diseño de la Fuente de Voltaje

CAPÍTULO 4

Implementación y Pruebas

4.1. Introducción

El capítulo anterior describe los elementos que conforman el prototipo del robot manipulador reconfigurable así como los diseños en software tanto de la estructura que contendrá los elementos electrónicos, como la fuente que alimentará a los servomotores. Se explica también el motivo por el cual se decidió alimentar los servomotores de manera externa, el por qué se utilizan dos modelos de servomotores y por qué se optó por la fuente mencionada en dicho capítulo. Es en este capítulo en el que se muestra el ensamble de todos los elementos que conforman el prototipo de robot manipulador reconfigurable.

Antes de realizar el corte del material del que está hecha la estructura es conveniente analizar muy bien las características de todos los elementos electrónicos como las dimensiones, los diámetros de los orificio, las distancias de los conectores y las medidas de los conectores como el puerto USB de la placa Arduino, el jack de alimentación de la misma placa, el jack de alimentación de la fuente, el orificio para poder controlar el potenciómetro, así como aberturas adicionales para colocar un interruptor, y en este caso, una apertura para colocar un voltímetro que indica el voltaje suministrado por la fuente externa hacia los servomotores.

La siguiente tabla (**tabla 4.1**) enlista todos los elementos que se necesitaron para la construcción del modelo robótico propuesto. Esta lista ya incluye elementos de sujeción como tornillos y pijas, además de los cables que conectan todos los elementos electrónicos a la placa Arduino y a la fuente externa.

Tabla 4.1: Materiales para la Construcción del Prototipo

CANTIDAD	ELEMENTO
1	Arduino UNO
1	Fuente de voltaje variable (1.25v – 6.45v)
1	Pantalla LCD (16x2 caracteres)
1	Teclado matricial (16 botones)
3	Servomotores Futaba S3003
2	Micro servos Tower Pro SG90
32	Tornillos M3 con tuerca
12	Pijas
26	Cables tipo Dupont
1	Pegamento blanco
1	Lamina de MDF (120cm x 60cm)

4.2. Ensamble de la Estructura

Recordando que la estructura del modelo robótico se realizó en MDF, al ensamblar cada pieza de las estructuras que conforman al prototipo, dichas estructuras no son tan rígidas, lo que le hacen perder estabilidad al momento de poner a funcionar el conjunto. La ventaja de utilizar MDF es que brinda la posibilidad de reforzar las uniones con pegamento blanco pues al ser un derivado de la madera, el pegamento blanco fija cada pieza brindándole fuerza y estabilidad a cada estructura que compone el prototipo.

4.2.1. Acoplamiento de los Elementos Electrónicos

Los elementos electrónicos como la pantalla LCD, la placa Arduino UNO, la fuente de voltaje que alimenta los servomotores y los propios servomotores, tienen perforaciones en sus circunferencias. Estas perforaciones generalmente son de una medida estandarizada de 3mm de diámetro. Por otra parte, la fuente externa se diseñó para que tuviera el mismo diámetro estándar en sus perforaciones para poderla sujetar a la base del armazón. Debido a que todos estos elementos tienen perforaciones de dicha medida, se utilizaron tornillos M3 para el acoplamiento de los elementos electrónicos al armazón de MDF. En el caso del teclado matricial, el cual no posee perforaciones para poder sujetarlo al armazón, este tiene una película adhesiva para adherirse a la superficie donde sea colocado.



Figura 4.1: Tornillo M3 con Tuerca

Los tornillos M3 (**figura 4.1**) son tornillos estandarizados a 3mm y cuyo largo dependerá de la aplicación para lo que se les requiera. Estos tornillos son importantes ya que, en general, todos los elementos compatibles con Arduino poseen esa medida en las perforaciones para sujeción. Finalmente mencionar que los tornillos permiten el ensamble de los elementos electrónicos a la estructura de MDF gracias a que las tuercas correspondientes a los tornillos M3 no son muy robustas, lo que encaja perfecto en las placas del Arduino, de la fuente de voltaje y de la pantalla LCD evitando estorbar a los componentes electrónicos.

4.2.2. Acoplamiento de los Servomotores

Al adquirir un servomotor, generalmente viene acompañado de accesorios que facilitarán la colocación del mismo en diferentes tipos de estructura. Entre estos accesorios se encuentran tornillos, pequeños empaques de goma y los acopladores. Los acopladores son piezas que están diseñadas para poder encajar en el eje del servomotor y en cuya estructura se encuentran pequeñas perforaciones para poderlos adherir (por medio de tornillos o pijas) a distintos materiales.



Figura 4.2: Servomotor Futaba S3003 con Acoplador

La imagen anterior (**figura 4.2**) muestra un servomotor con un acoplador insertado al eje del mismo. El eje del servomotor tiene la características de ser dentado, muy parecido a un engrane, mientras que el acoplador está diseñado para encajar en las cavidades de esos dientes, es por ello que la unión entre acoplador y eje se hace de manera justa aunque dependiendo de la aplicación puede ser débil. Por este motivo, poseen la característica de fortalecer el enlace entre ambos insertando un tonillo para presionar ambas piezas. Se tienen diferentes formas de acopladores, pues algunas están diseñadas para adaptarse a piezas comerciales, como kits de Arduino. En la **figura 4.3** se muestran las formas más comunes de acopladores.



Figura 4.3: Acopladores para el Servomotor

La unión entre los acopladores y las estructuras que forman cada brazo robótico se fijaron por medio de pijas milimétricas que se incluyen en los accesorios de cada servomotor. La **figura 4.4** muestra la sujeción entre el acoplador y una pieza que conforma la estructura de un eslabón.



Figura 4.4: Sujeción del Acoplador a la Estructura

Este tipo de acoplamiento entre la estructura y el eje del servomotor es benéfico para el propósito del prototipo que se propone, ya que facilita el intercambio de eslabones al solo tener que insertarla o desacoplarla del eje del servomotor logrando la reconfiguración deseada.

4.3. Implementación del Arduino UNO

Arduino UNO es la placa más utilizada de la familia de Arduino la cual brinda un soporte muy bueno en cuanto a información se refiere. Es una placa robusta y brinda una experiencia cómoda tanto para las personas que recién tienen acercamiento a los microcontroladores, como aquellos que ya han trabajado con ellos. El Arduino UNO consta de 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 pueden ser utilizadas como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz y sus respectivos puertos de alimentación por medio de USB o a través de un convertidor de corriente alterna a directa (eliminador).

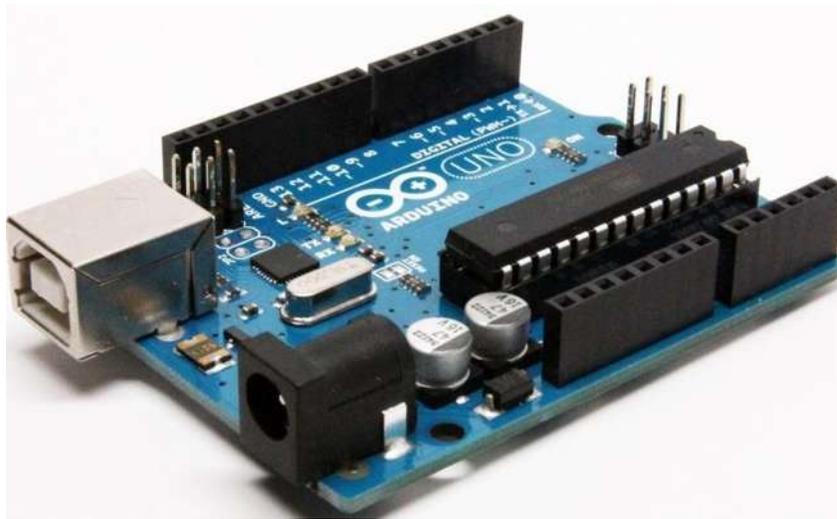


Figura 4.5: Placa Arduino UNO

La imagen de la **figura 4.5** muestra la placa Arduino UNO. Se puede observar como están distribuidos los elementos que la componen, siendo las ranuras de las entradas y salidas, el jack de alimentación y el puerto USB las que serán manipuladas para la programación de la misma.

4.3.1. Conexión de la Pantalla

La pantalla que se utilizó para este prototipo consta de 16 pines de los cuales sólo se utilizarán doce. De los doce pines que se ocupan, seis se conectan directamente a la placa Arduino UNO, tres terminales se conectan a tierra, una directamente a 5volts, una terminal

a la resistencia de 100Ω (mencionada en el diseño de la fuente, capítulo tres) y la última terminal se conecta a la patilla media del Trim-Pot (mencionado en el diseño de la fuente, capítulo tres). El esquema de conexión queda como se muestra en la siguiente imagen (**figura 4.6**).

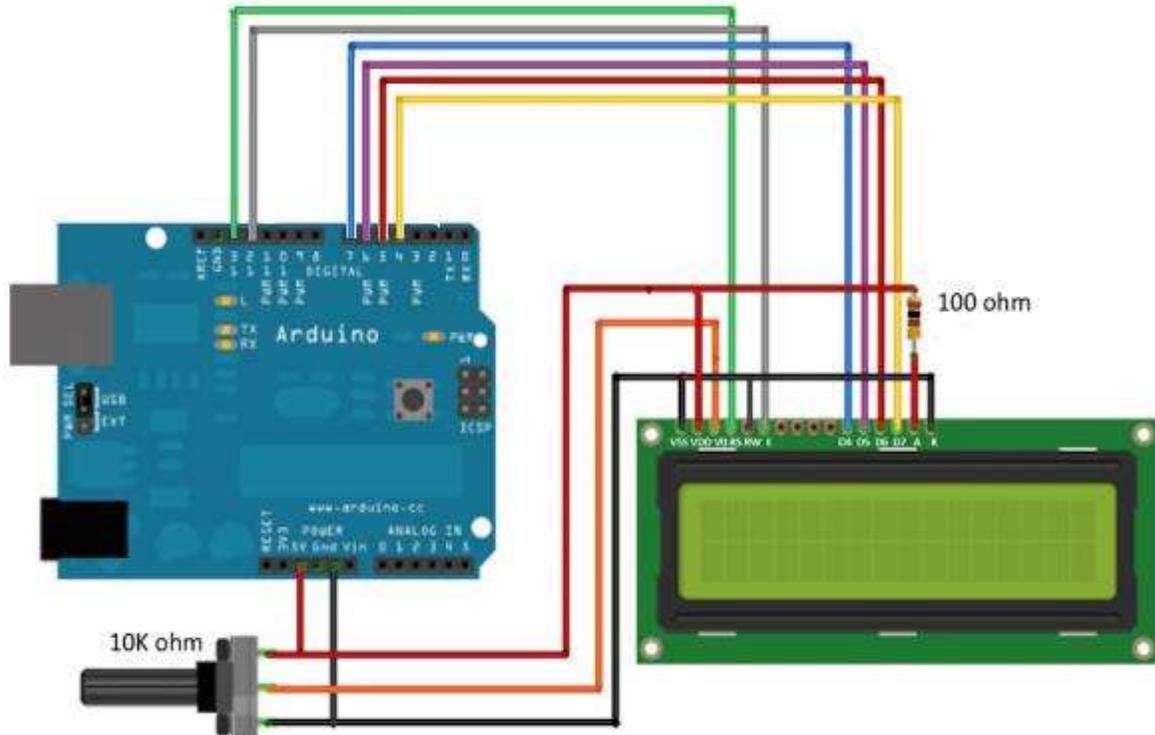


Figura 4.6: Conexión del LCD al Arduino UNO

La distribución de las conexiones en la placa Arduino, son elegidas al momento de programar, indicando en el propio programa las terminales que serán conectadas. La resistencia de 100Ω que se observa en la **figura 4.6** se utiliza como protección para el LED que brinda la luz a la pantalla LCD, mientras que el potenciómetro tiene la función de modificar el contraste de la misma.

Cabe mencionar que se utilizó un Trim-Pot en lugar del potenciómetro, lo que mejora la precisión al momento del ajuste y no tener variaciones de contraste cada que el prototipo sea utilizado.

4.3.2. Conexión del Teclado

Se incorporó un teclado matricial de 16 teclas (4x4) donde 10 teclas son numéricas (de cero a nueve), cuatro teclas son alfabéticas (de A hasta D) y dos teclas de caracteres que son el asterisco (*) y el numeral (#).

La disposición de las teclas fue de la siguiente manera:

- Las teclas «A», «B» y «C» son las encargadas de seleccionar la articulación que se desea mover, siendo «A» para la primera articulación, «B» para la segunda y «C» para la tercera articulación.
- La tecla «D» será la opción “Salir”, para poder ingresar a otra articulación, o salir del programa.
- Las teclas numéricas son utilizadas para ingresar los ángulos que se desean mover en cada articulación.
- Finalmente, las dos teclas de caracteres son las que se encargan de aceptar el ángulo que se quiere introducir.

El diagrama de conexión es el siguiente:

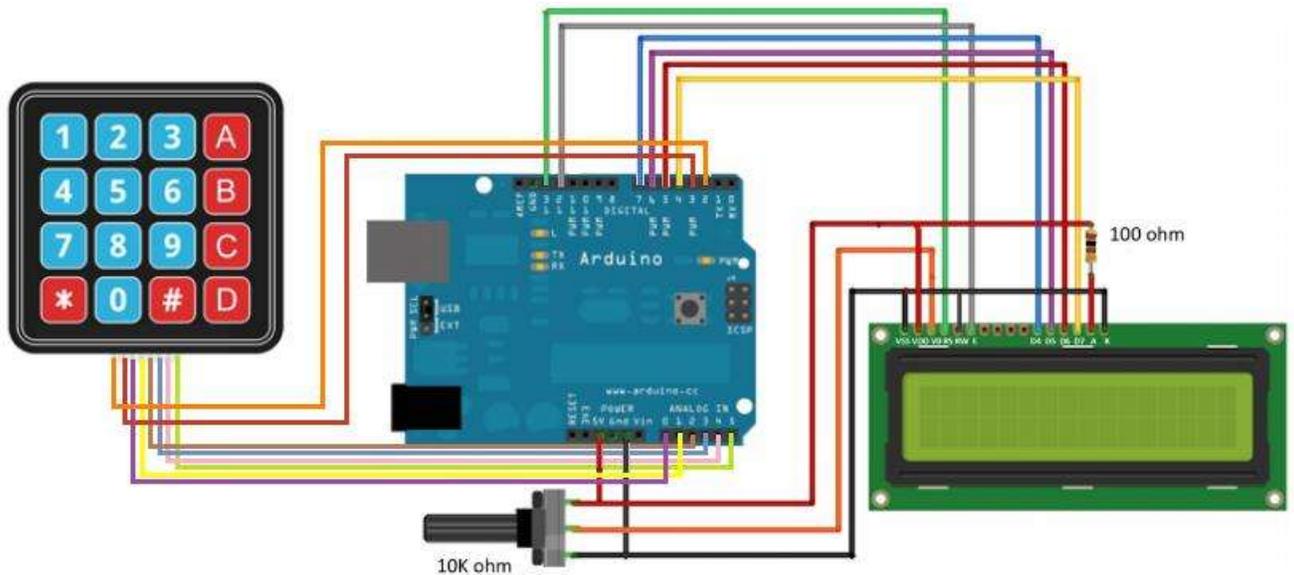


Figura 4.7: Conexión de la Pantalla LCD y Teclado Matricial a la Placa Arduino UNO

En la **figura 4.7** se muestra la conexión del teclado matricial considerando las terminales que no fueron utilizadas por la pantalla LCD. De igual manera que con la pantalla, las terminales que se utilizarán para el teclado matricial se determinan en el programa de Arduino.

4.3.3. Conexión de los Servomotores

Como ya se había planteado antes, los servomotores son alimentados a través de una fuente externa ya que las placas de Arduino no entregan la energía suficiente para alimentar a la pantalla, a los servomotores y además mandar la señal de control para estos.

Al alimentarlos de manera externa a la placa Arduino, sólo se proporciona la señal de control proveniente de la misma, lo que evita problemas en el sistema. La siguiente imagen (figura 4.8) muestra la conexión entre los tres elementos que la placa Arduino UNO controla, es decir, la pantalla, el teclado y los servomotores.

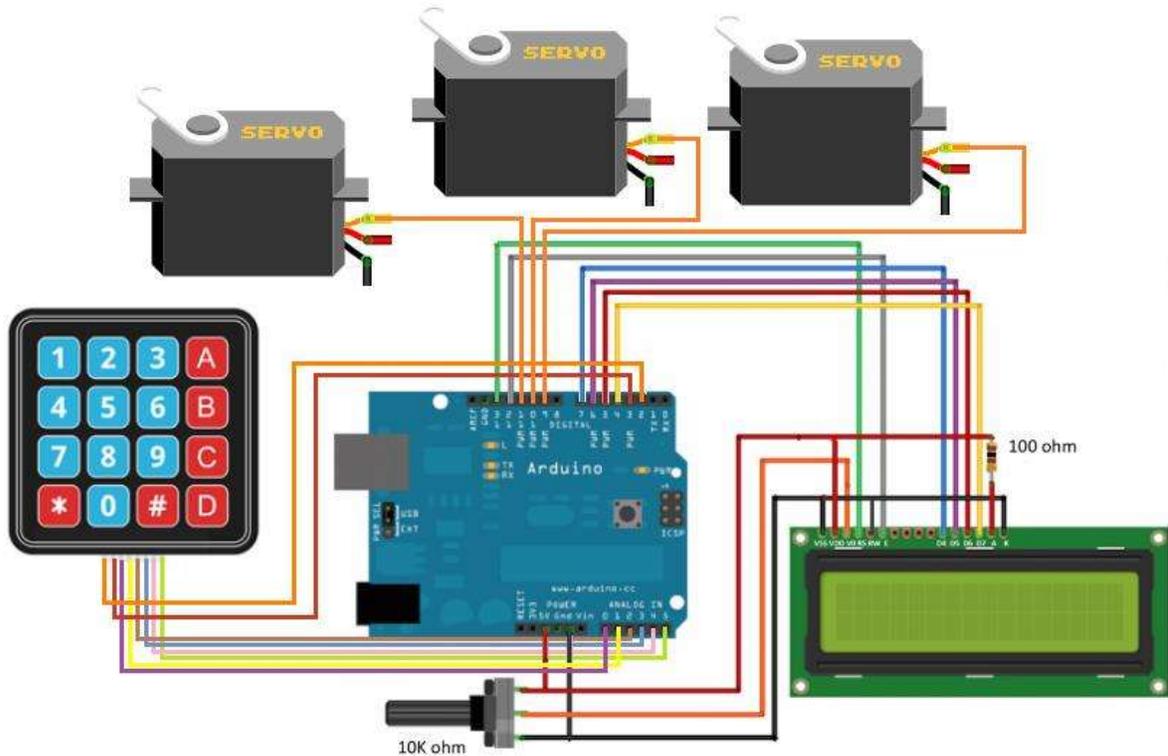


Figura 4.8: Conexión de la Pantalla LCD, Teclado Matricial y Control de los Servomotores a la Placa Arduino UNO

Los cables rojos de los servomotores se conectan a la salida de la fuente externa, mientras que los cables negros se conectan a tierra que debe ser común entre la placa Arduino y la fuente externa. Se debe tener especial cuidado con el tipo de puerto al que se conectan las terminales de control de los servomotores, pues es importante que dichos puertos puedan emitir las señales PWM que los servomotores necesitan.

4.4. Programación del Arduino UNO

La programación se realizó en el software que Arduino proporciona de forma gratuita a través de su página de internet. El software, a grandes rasgos, se puede dividir en tres bloques, un encabezado, una función SETUP y una función LOOP. En el encabezado se coloca lo referente a las librerías que se utilizarán, el entorno de conexiones a la placa por medio de los pines, variables o constantes, algunos comandos especiales, etc.

La función SETUP contiene todas las sentencias que se ejecutarán una vez antes de pasar al siguiente bloque. Aquí se ubicaron sentencias para inicializar la pantalla y el posicionamiento inicial de los servomotores.

En la función LOOP, que es un ciclo infinito, se encuentra toda la programación necesaria para el control de todos los elementos que están conectados a la placa, es decir, la pantalla, el teclado matricial y el control de los servomotores. A continuación se muestra cada etapa de la programación.

4.4.1. Encabezado

El encabezado del programa contiene en primera instancia las librerías utilizadas que fueron tres, la librería **LiquidCrystal** para el manejo de la pantalla LCD, la librería **Keypad** para la manipulación del teclado matricial, y la librería **Servo** encargada de la señal de control para los servomotores.

```
//*****INICIO DEL PROGRAMA*****  
//LIBRERIAS:  
#include <LiquidCrystal.h>  
#include <Keypad.h>  
#include <Servo.h>
```

Después se encuentran las indicaciones correspondientes a la conexión en los pines de la placa Arduino de la pantalla LCD como del teclado matricial y su configuración indicando el número de filas y de columnas. En caso de utilizar un teclado matricial de menos columnas se deberá realizar el cambio pertinente.

```
//PANTALLA LCD:  
LiquidCrystal lcd(13, 12, 7, 6, 5, 4); //PIN LCD(RS,E,D4,D5,D6,D7)  
/*CONEXIÓN LCD POR PINES:  
1---GND  
2---5V  
3---POTENCIOMETRO  
5---GND  
15--5V  
16--GND */  
byte bola[8] = {B01110, B01010, B01110, B00000, B00000, B00000, B00000, B00000}; //Caracter de grados  
//TECLADO MATRICIAL:  
const byte FILAS = 4;  
const byte COLUMNAS = 4;  
char teclado[FILAS][COLUMNAS] =  
  {'1','2','3','A'},  
  {'4','5','6','B'},  
  {'7','8','9','C'},  
  {'*','0','#','D'}  
};  
byte rowPins[FILAS] = {3, 2, A0, A1};  
byte colPins[COLUMNAS] = {A2, A3, A4, A5};  
Keypad customKeypad = Keypad( makeKeymap(teclado), rowPins, colPins, FILAS, COLUMNAS );
```

Finalmente se declaran las variables de los servomotores asignándole un nombre a cada uno.

```
//SERVOMOTORES
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
//*****
```

4.4.2. Función Setup

La siguiente etapa del programa es la función **setup**, la cual contiene las líneas de programa que sólo se ejecutarán una vez.

```
//*****
void setup() {
servo1.attach(11); servo1.write(90);
servo2.attach(10); servo2.write(90);
servo3.attach(9); servo3.write(0);
lcd.begin(16,2);
lcd.createChar(1,bola);
}
//*****
```

Es en este bloque que se inicializan los servomotores en sus respectivas terminales de la placa Arduino además de un valor de arranque inicial que para este caso la primera articulación inicia en 90°, la segunda articulación también inicia en 90° y la tercera inicia en 0°.

Es muy importante que la conexión del control de los servomotores en la placa Arduino sea en pines PWM, pues es con este tipo de señales que el servomotor funciona correctamente.

También en este bloque se inicializa la pantalla LCD además de inicializar un signo especial que es el símbolo de grados (°).

4.4.3. Función Loop

Finalmente se tiene la función del ciclo infinito donde se encuentra toda la estructura del programa que se encarga de controlar los elementos electrónicos. Dentro de esta función infinita se encuentran dos funciones más que en esencia son la misma pero se realizaron por separado para crear un menú donde se escogerá el tipo de brazo que se quiere controlar.

```

//*****
void loop() {
char tecla = customKeypad.getKey();
lcd.setCursor(3,0); lcd.print("Bienvenido");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print("SCARA: 1 PUMA: 2");

if (tecla=='1'){
    menuscara();}
    else if (tecla=='2'){
        menupuma();}
}

```

Primero, el programa pide que se teclee una opción acompañado de un mensaje en la pantalla LCD preguntando el tipo de brazo que se quiere controlar. Si se presiona una de las dos opciones, entrará a una función que corresponde a un tipo de brazo robótico en particular. Dentro de esta función, independientemente de la opción que se haya tomado, se encuentra un menú con varios estados.

```

//*****FUNCIÓN MENÚ SCARA*****
void menuscara() {
int cont = -1;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0); lcd.print("BRAZO A MOVER:");
lcd.setCursor(2,1); lcd.print("A   B   C");
do{
    char llave = customKeypad.getKey();
    if (llave == 'A')    {
        cont = 0;
        }
    else if (llave == 'B'){
        cont = 1;
        }
    else if (llave == 'C'){
        cont = 2;
        }
    else if (llave == 'D'){
        cont = 3;
        }
}

```

La primera parte de esta función muestra el menú en la pantalla LCD indicando cuál articulación se quiere mover. Una vez tomada una decisión, el programa cambia ese dato del teclado a un valor entero que se encuentra en una variable “**cont**”.

Tomada la decisión y ya con un valor entero, ese dato es ingresado a una sentencia **SWITCH** que dependiendo del valor del entero ingresará a un caso específico.

```

switch (cont){
  case 0:
    motor1scara();
    cont = -1;
    break;

  case 1:
    motor2scara();
    cont = -1;
    break;

  case 2:
    motor3scara();
    cont = -1;
    break;

  case 3:
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(5,0); lcd.print("SALIR");
    lcd.setCursor(4,1); lcd.print("GRACIAS");
    delay(1000);
    cont = -2;
    break;
};
}
while(cont != -2);
}

```

Dentro de la sentencia **SWITCH** están cuatro casos, el primero que lleva a una función para manipular el ángulo del servomotor de la primera articulación, el segundo que dirige hacia una función para controlar el servomotor de la segunda articulación, en el tercer caso se dirige hacia una función para controlar el ángulo de la tercera articulación y finalmente un cuarto caso para salir de ese menú con un mensaje de agradecimiento. Tener en cuenta que este bloque se realizó con una sentencia **DO-WHILE**, la cual permite ejecutar todo el bloque distribuido en la estructura **DO**, y no salir de ese bloque hasta que se cumpla la condición de la sentencia **WHILE** la cual sólo se cumple cuando se presiona la tecla designada para “salir” y que el entero tome el valor necesario para salir del ciclo.

4.4.4. Función del Control de los Servomotores

La última parte de la programación se da en una función para controlar el servomotor de cada articulación. La idea es que al ingresar un ángulo con un valor determinado, la placa Arduino cause el posicionamiento del servomotor en el ángulo introducido. Al tratarse del control de los servomotores, la función que controlará cada uno de ellos es la misma en cada articulación, sólo con un cambio de nombre para determinar en qué articulación se está trabajando. Como ejemplo se tomará la primera articulación para describir el funcionamiento del programa.

```

//ARTICULACIÓN A:
void motor1scara() {
    int opc = -1;
    int ang;
    int n = 0;
    int aux = 0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4,0); lcd.print("ESLABON A:");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Angulo:");

    do{
        char key = customKeypad.getKey();
        if (key == 'A' || key == 'B' || key == 'C'){
            opc = 0; }
        else if (key == '*' || key == '#'){
            opc = 1; }
        else if (key == '0' || key == '1' || key == '2' || key == '3' || key == '4' ||
            key == '5' || key == '6' || key == '7' || key == '8' || key == '9') {
            opc = 2; }
        else if (key == 'D'){
            opc = 3 ; }
    }
}

```

En la primera parte se colocan las variables que se utilizarán durante el proceso de recolección de datos del teclado matricial, así como un texto en la pantalla LCD para indicar en qué articulación está el programa y el ángulo que se moverá o que se ha movido previamente. Después está una estructura **DO** para garantizar que el contenido del bloque se ejecutará por lo menos una vez, o hasta que se cumpla la condición del **WHILE** que más adelante se analizará.

Dentro de la estructura **DO** se pide el dato de una tecla, si la tecla presionada corresponde a la tecla A, B o C, la variable “**opc**” tome el valor de cero; si la tecla que se presionó fue la correspondiente al numeral (#) o al asterisco (*) el valor de la variable “**opc**” tomará el valor de uno; si la tecla que se presionó es alguna correspondiente a las teclas de numeración (del 0 al 9) la variable “**opc**” tomará el valor de dos; y finalmente si la tecla presionada es la D, dicha variable tomará el valor de tres.

Una vez que ya se tomó la decisión, y la variable mencionada anteriormente ya tiene un valor entero, se pasa al siguiente bloque de programación por medio de la sentencia **SWITCH**. El primer caso al que puede ingresar el programa es cuando se presiona la tecla «A», «B» o «C», las cuales no corresponden a un número entero, provocando que en la pantalla LCD se observe la palabra **ERROR**.

```

switch (opc) {
  case 0:
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4,0); lcd.print("ESLABON A:");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Angulo:");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print("ERROR");
    delay(500);
    n = 0;
    opc = -1;
    break;

```

El segundo caso posible se da cuando se ha presionado la tecla asterisco o el numeral, los cuales se programaron para ser la tecla que permite la entrada del valor del ángulo. Funge como la tecla de aceptación (ACEPTAR). Se colocó un límite para la introducción de los ángulos, por lo que, si el valor introducido supera o no alcanza los límites determinados, se mostrará en pantalla el mensaje INVALIDO, por el contrario, si el ángulo ingresado se encuentra en el rango permitido, el servomotor tomará la posición correspondiente a ese ángulo dado (con la sentencia `servo.write(ang)`) y mostrando en la pantalla el ángulo introducido.

```

  case 1:
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4,0); lcd.print("ESLABON A:");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Angulo:");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print(ang);
    lcd.write(1);
    if (ang<30 || ang> 150){
      lcd.setCursor(7,1);
      lcd.print("INVALIDO");
      delay(500);
      opc = -1;
      n=0;
    }
    else {
      servol.write(ang);
      delay(500);
      opc = -1;
      n = 0;
    }
    break;

```

El siguiente caso, correspondiente a cuando la variable “**opc**” toma el valor entero de dos, es quizá el bloque más complejo pues es donde se ingresa el valor del ángulo que se requiere mover. El bloque se compone de una variable “**n**” la cual determina el número de dígitos tecleados, además de una variable “**aux**” la cual se estará sumando por cada tecla presionada. Como los servomotores sólo se mueven de 0 a 180 grados, al programa sólo se le pueden ingresar 3 dígitos, por lo que “**n**” sólo puede tomar el valor de uno a tres.

También se tiene una variable “**ang**” la cual es la que finalmente tomará el valor definitivo (del ángulo) para mover el servomotor. Si se presiona una sola tecla, es decir de 0 a 9, dentro de la variable “**aux**” se restará al valor del dato ingresado (que está en código ASCII) un valor para convertirlo en el entero correspondiente a la tecla manipulada, y multiplicándolo por cien para formar las centenas. Por otra parte, la variable “**ang**” toma ese número entero por si no se requiere de más dígitos y pueda ingresarse el valor como unidad en lugar de una centena en el control del servomotor. Sin embargo, si se presiona una tecla más, el proceso de conversión a la unidad correspondiente a la tecla presionada es el mismo, pero en este caso la unidad se guarda en una variable “**key**” donde posteriormente se multiplica por diez para convertir esa unidad en una decena y sumarla a la centena que se encontraba en la variable “**aux**”.

De igual manera, si sólo se requieren dos dígitos (del 10 al 99) tal valor se guarda en la variable “**ang**” para ser introducido al control del servomotor. Finalmente, si se presionan los tres dígitos (de 100 a 180), el proceso anterior se repite al sumar solamente la unidad y cuyo resultado de esa suma es el número de tres dígitos que posteriormente será introducido al control del servomotor y reiniciando el contador de la variable “**n**” a cero.

```

case 2:
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(4,0); lcd.print("ESLABON A:");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Angulo:");
  //programa angulos
  n++;
  if(n == 1){
    aux = (key - '0') * 100;
    ang = aux/100;
    lcd.setCursor(7,1); lcd.print(ang);
  }
  else if(n == 2){
    key = (key - '0') * 10;
    aux= aux + key;
    ang = aux/10;
    lcd.setCursor(7,1); lcd.print(ang);
  }
  else if(n == 3){
    aux = aux + (key - '0');
    ang = aux;
    lcd.setCursor(7,1); lcd.print(ang);
    n = 0;
  }
  opc = -1;
  break;

```

Para concluir este bloque, está el último caso en el que, si se presiona la tecla «D», el programa regresa al menú del brazo robótico donde se da la selección de la articulación a mover.

```

case 3:
    opc = -3;
    menuscara();
    break;
}
}
while(opc !=-3);
}

```

De esta manera se rompe el ciclo y regresa al menú anterior.

4.5. Prototipo Terminado

Una vez que se ha ensamblado cada parte del modelo a escala así como el respectivo cableado de los elementos electrónicos que lo componen, el resultado es el prototipo funcional de un robot manipulador reconfigurable. A continuación se describen los elementos que lo conforman, así como la forma de operarlo.

4.5.1. Módulo de Control

El módulo de control es la parte más compleja de todo el prototipo pues es este donde se ingresan y se observan los valores que moverán cada brazo robótico. En la siguiente serie de imágenes se muestra el módulo de control desde varias perspectivas y se analizarán los elementos de cada una de ellas.



Figura 4.9: Vista Frontal del Módulo de Control Terminado

En la **figura 4.9** se observa la parte frontal del módulo donde se encuentra el teclado matricial el cual descansa en medio de dos piezas de la estructura que son presionadas por cuatro tornillos. También se puede observar la pantalla LCD que orienta al operador en el movimiento de cada brazo robótico y la cual está incorporada al armazón a través de cuatro tornillos M3 descritos con anterioridad.

La imagen correspondiente a la **figura 4.10** muestra el módulo de control desde una vista lateral. Se observa en la parte trasera una estructura con un servomotor incorporado el cual tiene la función de ser el primer eslabón.

Dicho servomotor se incorporó a la estructura por medio de cuatro tornillos los cuales brindan estabilidad al momento de su funcionamiento.

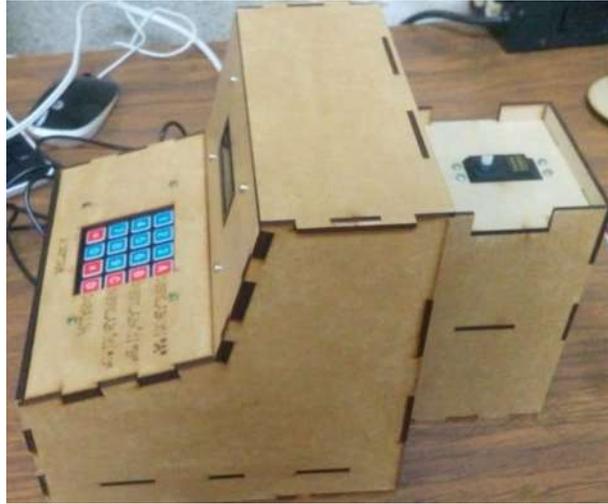


Figura 4.10: Vista Lateral del Módulo de Control Terminado

Finalmente, la **figura 4.11** muestra la parte trasera del módulo de control. En esta imagen se observa el cableado correspondiente a los servomotores que dan movimiento a la segunda y tercera articulación de cada brazo robótico. Cada juego de cables contiene dos cables de alimentación (positivo y negativo) y un cable de control que transmite la señal PWM al servomotor para controlar la posición.

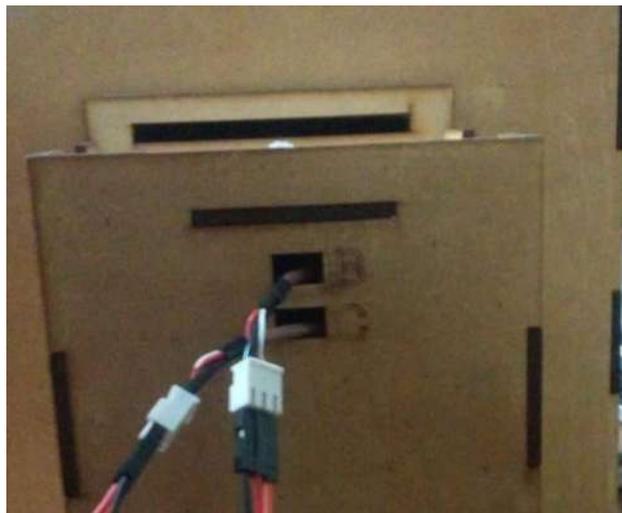


Figura 4.11: Vista Trasera del Módulo de Control Terminado

En la última imagen (**figura 4.11**) sólo se observan dos juegos de cables, ya que el correspondiente a la primera articulación está oculto en la estructura siendo el servomotor que corresponde a esta articulación el que se encuentra unido a la misma estructura.

4.5.2. Brazos Robóticos

Ya que se ensamblaron todos los elementos de cada estructura que conforman ambos brazos robóticos (SCARA y PUMA), el resultado son estructuras que pueden acoplarse o desacoplarse de forma manual a través de los acopladores que se insertan en el servomotor.

4.5.2.1. Brazo Robótico SCARA

Las primeras dos imágenes (**figura 4.12** y **figura 4.13**) muestran la estructura que contiene la segunda articulación del robot SCARA vista desde arriba y desde un lateral. Se puede observar el servomotor que tiene la función de dar movimiento a la segunda articulación el cual está incorporado a la estructura por medio de cuatro tornillos.

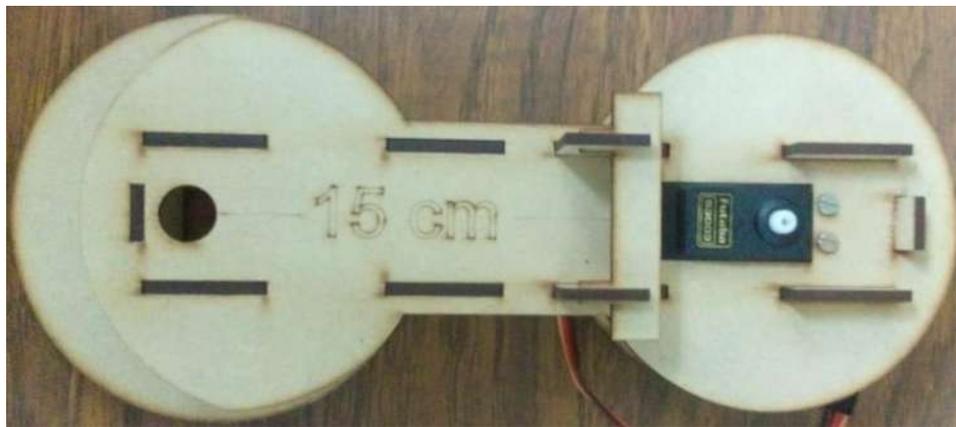


Figura 4.12: Primer Eslabón del Brazo SCARA (Vista Superior)



Figura 4.13: Primer Eslabón del Brazo SCARA (Vista Lateral)

Las siguientes imágenes muestran la última estructura, la cual contiene a la tercera articulación. La **figura 4.14** muestra dicha estructura vista desde arriba, mientras que la **figura 4.15** muestra la estructura desde una vista lateral.



Figura 4.14: Segundo Eslabón del Brazo SCARA (Vista Superior)

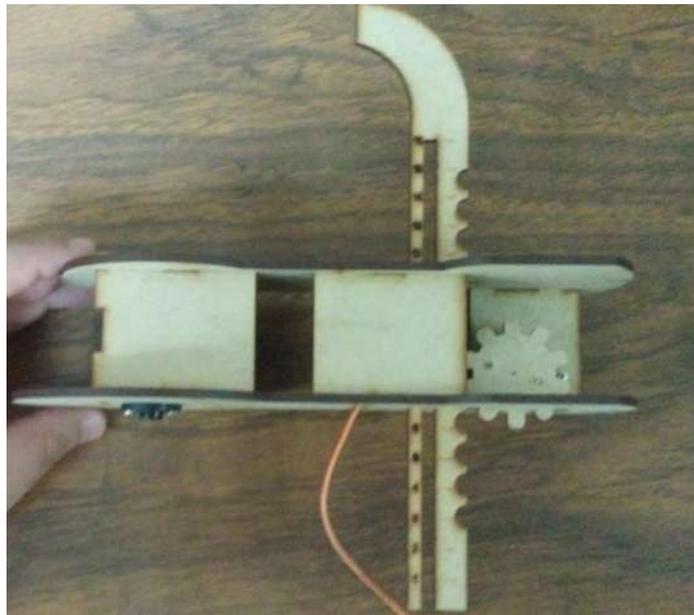


Figura 4.15: Segundo Eslabón del Brazo SCARA (Vista Lateral)

Es en esta última imagen donde se puede observar la regleta dentada y el engrane que proporciona el movimiento prismático de la tercera articulación.

Cada estructura tiene grabada en el material la longitud de cada eslabón que conforman al brazo SCARA con la intención de facilitar las pruebas de cinemática directa, siendo un factor necesario para analizarlo matemáticamente.

4.5.2.2. Brazo Robótico PUMA

Al igual que el brazo SCARA, el brazo PUMA tiene la capacidad de ensamblar y desensamblar cada elemento que lo compone a través de los acopladores que se insertan en los servomotores.

En las siguientes dos imágenes (**figura 4.16** y **figura 4.17**) se muestra la estructura que da movimiento a la segunda articulación y en la cual, también se puede observar el servomotor que cumple con esta acción sujetado a la estructura por medio de cuatro tornillos.

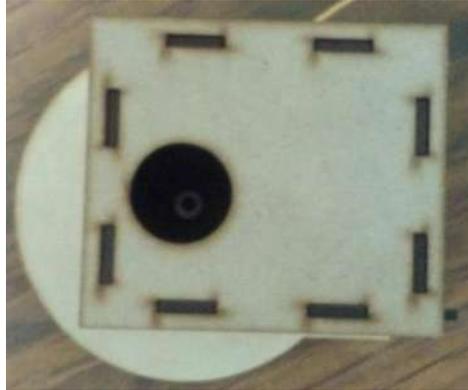


Figura 4.16: Primer Eslabón del Brazo PUMA (Vista Superior)

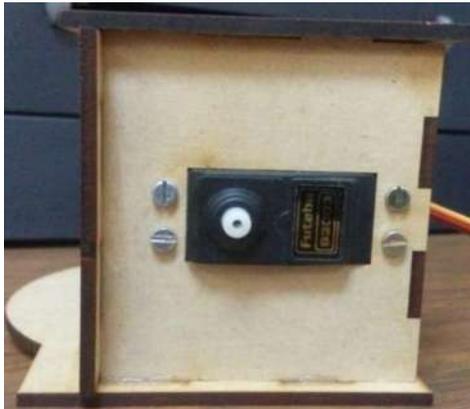


Figura 4.17: Primer Eslabón del Brazo PUMA (Vista Lateral Derecho)

Las siguientes tres imágenes muestran la estructura que soporta al servomotor encargado de dar movimiento a la tercera articulación. En la **figura 4.18** se observa la estructura vista desde el lateral derecho mientras que en la **figura 4.19** se muestra una vista superior y, finalmente, la **figura 4.20** muestra la estructura vista desde el lateral izquierdo.



Figura 4.18: Segundo Eslabón del Brazo PUMA (Vista Lateral Derecho)

Esta estructura tiene la particularidad de incorporar la última articulación orientada hacia el centro del robot manipulador, es por eso que el servomotor se encuentra sobre el mismo lado que el acoplador del servomotor anterior. Es en la **figura 4.20** donde se puede observar lo antes mencionado.



Figura 4.19: Segundo Eslabón del Brazo PUMA (Vista Superior)

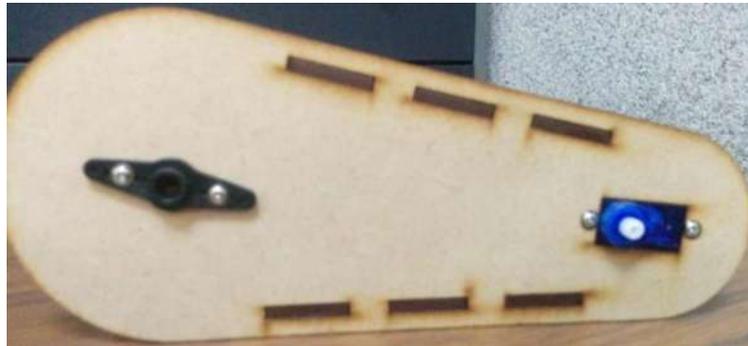


Figura 4.20 Segundo Eslabón del Brazo PUMA (Vista Lateral Izquierdo)

Finalmente se muestra la última estructura del robot PUMA en la **figura 4.21** y la **figura 4.22**. La primera proporciona un vistazo al costado izquierdo del tercer eslabón, mientras que la segunda muestra al eslabón visto desde arriba. Esta estructura carece de servomotor pues es aquí donde se incorporaría el efector final, por lo cual sólo se observa el acoplador que será insertado en el servomotor de la tercera articulación.



Figura 4.21: Tercer Eslabón del Brazo PUMA (Vista Lateral Izquierdo)



Figura 4.22: Tercer Eslabón del Brazo PUMA (Vista Superior)

Para este modelo de brazo robótico también se grabó en el material las dimensiones de cada estructura con la finalidad de poder determinar matemáticamente la posición aplicando la cinemática directa.

4.5.3. Energización del Prototipo

El prototipo de robot manipulador reconfigurable realizado en este trabajo requiere dos fuentes de alimentación, la que energiza a la placa Arduino y la fuente que alimenta a los servomotores.

La razón de energizarlos por separado es que la placa Arduino no brinda la suficiente corriente para solventar los requerimientos de los tres servomotores por lo que el prototipo de robot manipulador tiene las terminales para alimentar tanto a la placa Arduino como a la fuente que energizará a los servomotores. Para la placa Arduino se eligió un eliminador de 9 volts a 1 amper a través del puerto jack que la misma placa posee. En la **figura 4.23** se observa el eliminador utilizado para energizar la placa Arduino UNO.



Figura 4.23: Eliminador de 9v a 1A



Figura 4.24: Eliminador de 12v a 2A

Como el prototipo contiene una fuente de voltaje que se diseñó para ser regulada hasta 6.45 volts a través del regulador LM317T, la cual alimenta a los servomotores, se optó por utilizar un eliminador de 12 volts a 2 ampers con la única consideración que el integrado LM317T brinda una corriente máxima de 1.5 ampers. La **figura 4.24** muestra el eliminador utilizado para suministrar energía a los servomotores.

La siguiente imagen (**figura 4.25**) muestra la alimentación de ambos módulos, en la que se observa un voltímetro para indicar el voltaje que la fuente está suministrando a los servomotores así como el puerto USB de la placa Arduino por donde se realiza la programación del mismo. También se puede observar un interruptor para energizar o desenergizar la fuente de los servomotores, y una perilla para variar el potenciómetro y modificar el voltaje de la fuente.



Figura 4.25: Alimentación del Prototipo

Una vez energizado el prototipo, la pantalla recibe al operador con un mensaje de bienvenida y la posibilidad de escoger uno de los dos tipos de brazo robótico. La **figura 4.26** muestra el menú de brazo robótico que se visualiza al iniciar el prototipo.



Figura 4.26: Pantalla de Bienvenida del Prototipo

Una vez que se ha elegido el tipo de brazo que se quiere manipular, para ambos casos se muestra en pantalla la posibilidad de elegir la articulación que se requiera mover. La siguiente imagen (**figura 4.27**) muestra el menú de articulaciones que la pantalla despliega.



Figura 4.27: Menú de las Articulaciones

Para ambos casos, las opciones son elegidas por medio del teclado matricial, siendo la tecla «A» para la primera articulación, la tecla «B» para la segunda y la tecla «C» para la tercera y última articulación. Una vez seleccionada la articulación, se despliega en pantalla la articulación en la que se encuentra el usuario y el ángulo que se requiere mover dicha articulación.



Figura 4.28: Interfaz de la Primera Articulación

En la imagen anterior (**figura 4.28**) se muestra la articulación en la que se encuentra y el ángulo que se movió dicha articulación.

4.6. Representación Denavit-Hartenberg

Jaques Denavit y Richard S. Hartenberg en 1955 presentaron un procedimiento para obtener una mínima representación de la orientación y traslación de robots manipuladores. La convención Denavit-Hartenberg es una herramienta útil para deducir las ecuaciones de cinemática directa de robots manipuladores. Consiste en determinar una tabla de parámetros relacionados con los eslabones del robot.

En esta convención, cada transformación homogénea \mathbf{A}_i es representada como un producto de cuatro transformaciones básicas:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i}$$

Lo que matricialmente se representa como:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & -S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al realizar la multiplicación de las matrices se obtiene:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & l_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & l_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde las cuatro cantidades θ_i , l_i , d_i , α_i son parámetros del eslabón «i» y unión «i». Los parámetros que se observan en la matriz resultante son:

- l_i es la longitud.
- α_i es la torsión.
- d_i es el desplazamiento.
- θ_i es el ángulo de rotación.

A partir de que la matriz \mathbf{A}_i es una función de una sola variable, resulta que tres de los cuatro parámetros son constantes para un enlace dado, mientras que el cuarto parámetro, θ_i es variable para una articulación de revolución y d_i es variable para una articulación prismática.

En la representación Denavit-Hartenberg hay solamente cuatro parámetros, esto es posible debido a que, mientras el marco de referencia de la articulación es requerida para colocarse al eslabón «i», aquí se tiene la libertad de escoger el origen y los ejes de las coordenadas del marco de referencia.

Así, si se selecciona hábilmente el origen y los ejes coordenados, es posible reducir el número de parámetros que se necesitan. En la **figura 4.29** se pueden apreciar los parámetros Denavit-Hartenberg de articulaciones con movimiento de revolución, y cómo están distribuidos dichos parámetros en cada articulación.

11. Obtener « d_i » como la distancia medida a lo largo de « z_{i-1} », que habría que desplazar { S_{i-1} } para que « x_i » y « x_{i-1} » quedasen alineados.
12. Obtener « a_i » como la distancia medida a lo largo de « x_i » (que ahora coincidirá con « x_{i-1} ») que habría que desplazar el nuevo { S_{i-1} } para que su origen coincidiese con { S_i }.
13. Obtener « α_i » como el ángulo que habría que girar en torno a « x_i » (que ahora coincidirá con « x_{i-1} »), para que el nuevo { S_{i-1} } coincidiese totalmente con { S_i }.
14. Obtener las matrices de transformación « A_i ».
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$.
16. La matriz « T » define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las « n » coordenadas articulares. [1]

4.6.1. Cinemática Directa del Robot PUMA

Los brazos mecánicos o robots manipuladores que tienen la configuración antropomórfica (figura 4.30) presentan mayor destreza en su espacio de trabajo, ya que sus eslabones están unidos por tres articulaciones rotacionales. Considerando un robot manipulador antropomórfico de tres grados de libertad, donde el sistema de referencia { S_0 } se encuentra en la base del robot, los sistemas de referencia { S_1 }, { S_2 } y { S_3 } están seleccionados de tal forma que sus ejes z_i , z_2 y z_3 coincidan con sus respectivos ejes de rotación de cada articulación.

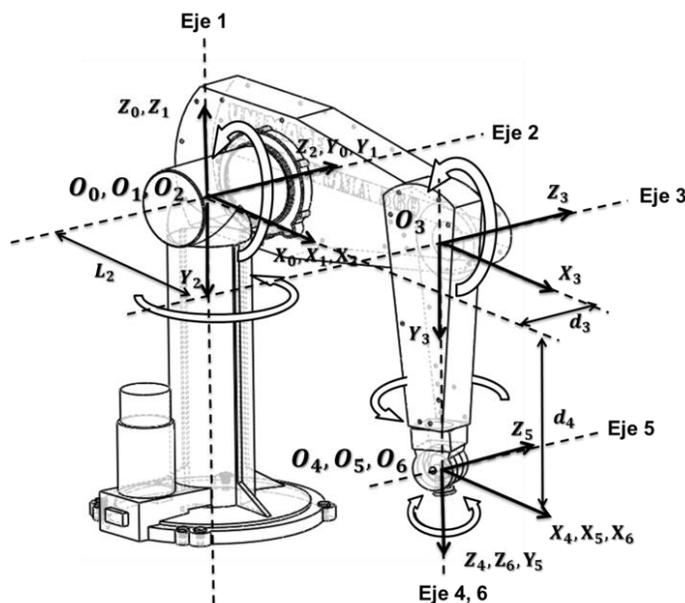


Figura 4.30: Ejes de las Articulaciones de un Manipulador Antropomórfico

De esta manera el eje z_1 es perpendicular a los ejes z_2 y z_3 , y estos dos últimos ejes son paralelos entre sí. La **tabla 4.2** contiene los parámetros Denavit-Hartenberg para el robot antropomórfico de tres grados de libertad.

Tabla 4.2: Parámetros Denavit-Hartenberg del Robot PUMA

ESLABÓN	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3

La configuración antropomórfica se caracteriza por tener todas sus articulaciones del tipo rotacional, lo que significa que las matrices de transformaciones homogéneas adquieran la siguiente forma:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto la matriz homogénea del robot antropomórfico es:

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 + \theta_3 & -\cos\theta_1 \sin\theta_2 + \theta_3 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 [l_2 \cos\theta_2 + l_3 \cos\theta_2 + \theta_3] \\ \sin\theta_1 \cos\theta_2 + \theta_3 & -\sin\theta_1 \sin\theta_2 + \theta_3 & -\cos\theta_1 & \sin\theta_1 [l_2 \cos\theta_2 + l_3 \cos\theta_2 + \theta_3] \\ \sin\theta_2 + \theta_3 & \cos\theta_2 + \theta_3 & 0 & l_2 \sin\theta_2 + l_3 \sin\theta_2 + \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, la cinemática directa de un robot antropomórfico de tres grados de libertad es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ \text{Sen}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ l_2 \text{Sen}_{\theta_2} + l_3 \text{Sen}_{\theta_2 + \theta_3} \end{bmatrix}$$

4.6.2. Cinemática Directa del Robot SCARA

El robot SCARA es un manipulador que posee dos articulaciones rotacionales que se mueven en un plano horizontal, mientras que la tercera articulación es prismática. Para este tipo de configuración, todos los ejes de movimiento z_1 , z_2 y z_3 son paralelos entre sí. La siguiente tabla (**tabla 4.3**) presenta los parámetros Denavit-Hartenberg del robot SCARA.

Tabla 4.3: Parámetros Denavit-Hartenberg del Robot SCARA

ESLABÓN	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	π	0	θ_2
3	0	0	d_3	0

De acuerdo a la tabla anterior, el robot SCARA tiene las siguientes matrices de transformación homogénea:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_1} & -\text{Sen}_{\theta_1} & 0 & l_1 \text{Cos}_{\theta_1} \\ \text{Sen}_{\theta_1} & \text{Cos}_{\theta_1} & 0 & l_1 \text{Sen}_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_2} & \text{Sen}_{\theta_2} & 0 & l_2 \text{Cos}_{\theta_2} \\ \text{Sen}_{\theta_2} & -\text{Cos}_{\theta_2} & 0 & l_2 \text{Sen}_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Así pues, la matriz homogénea resultante queda de la siguiente manera:

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) + \sin(\theta_1+\theta_2) & -\cos(\theta_1+\theta_2) + \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) - \cos(\theta_1+\theta_2) & -\sin(\theta_1+\theta_2) - \cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, la cinemática directa para el robot SCARA queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \\ -d_3 \end{bmatrix}$$

4.7. Comprobación del Modelo

Para obtener la cinemática directa a partir de la representación Denavit-Hartenberg se deben cumplir algunas condiciones para reducir el desarrollo matemático. Tales condiciones son principalmente la ubicación de los ejes cartesianos en cada articulación en función al tipo de movimiento que realizan las mismas así como la aplicación de la regla de la mano derecha para posicionar los ejes cartesianos de forma correcta. Debido a esto el análisis de las rotaciones o movimientos lineales se realiza a partir de esos ejes cartesianos que ya se han establecido.

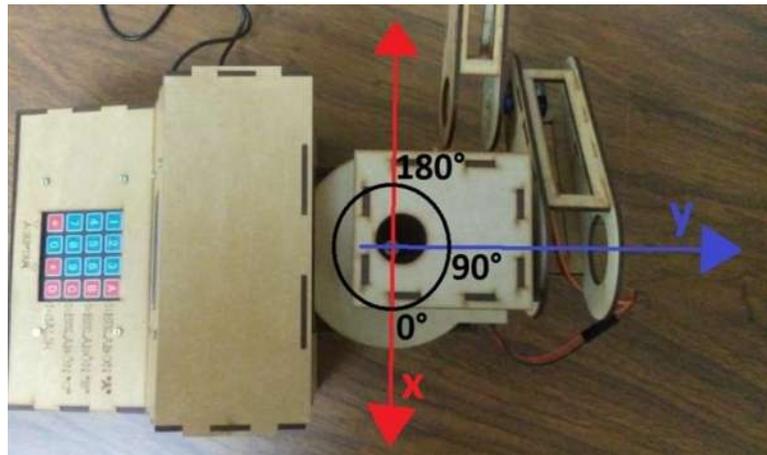


Figura 4.31: Ejes Convencionales (Empleados por el Usuario)

Como el usuario controla el ángulo de cada articulación considerando los ejes cartesianos convencionales (como se muestra en la **figura 4.31**), y los ejes cartesianos que la representación Denavit-Hartenberg requiere para el análisis de la cinemática directa están en una posición distinta (como se observa en la **figura 4.32**), se debe realizar una

modificación al ángulo de algunas articulaciones para ajustar el valor y obtener la posición real a partir del dato ingresado por el usuario.

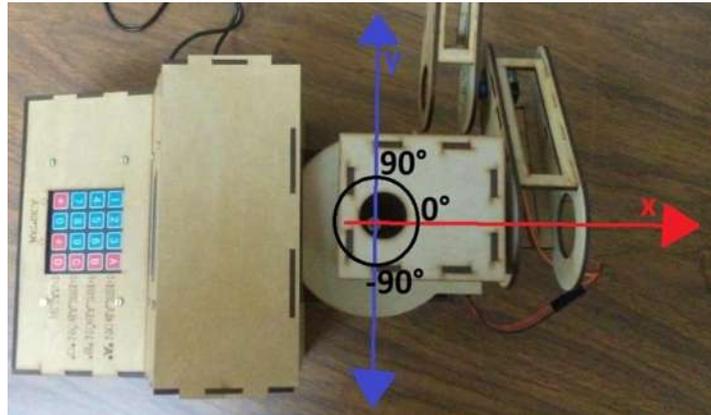


Figura 4.32: Ejes Establecidos por el Criterio Denavit-Hartenberg (Modelo Matemático)

Esta modificación consiste en trasladar el eje convencional hacia el eje fijado por la representación Denavit-Hartenberg, lo que se traduce como una resta o una suma de noventa grados a dicho ángulo.

4.7.1. Brazo Robótico SCARA

Una vez realizada la traslación de los ejes para ajustar los datos ingresados por el usuario del prototipo, los parámetros Denavit-Hartenberg del prototipo en su configuración SCARA (correspondientes a los ángulos de la primera y segunda articulación) se modifican. En la **tabla 4.4** se muestra los parámetros reales para el dispositivo construido.

Tabla 4.4: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg del Robot SCARA

ESLABÓN	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	15 cm	0	0	$\theta_1 - 90^\circ$
2	10 cm	π	0	$\theta_2 - 90^\circ$
3	0	0	$-[\theta_3(0.03) + 2.5]$	0

Se puede observar de la tabla anterior que se han efectuado tres ajustes.

La distancia recorrida por la tercera articulación se modificó para ser calculada a partir de un movimiento angular. A pesar de que tal articulación tiene un movimiento lineal, es el giro angular del servomotor el que produce ese movimiento a través de un engrane y una cremallera.

Por tal motivo se decidió obtener la relación del giro del servomotor a partir de su movimiento angular con la distancia recorrida de manera lineal. Por otra parte, también se puede observar que a los ángulos de giro de la primera y segunda articulación se les ha restado noventa grados, producto del desplazamiento de los ejes.

4.7.1.1. Primera Prueba

En la siguiente imagen (**figura 4.33**) se puede observar la pantalla con cada articulación y sus respectivos ángulos para obtener la posición final del manipulador.



Figura 4.33: Pantalla de los Ángulos Ingresados por el Usuario (Primera Prueba)

Una vez introducidos los ángulos para cada articulación, el prototipo obtiene una posición específica. Las siguientes figuras muestran la posición final del dispositivo.

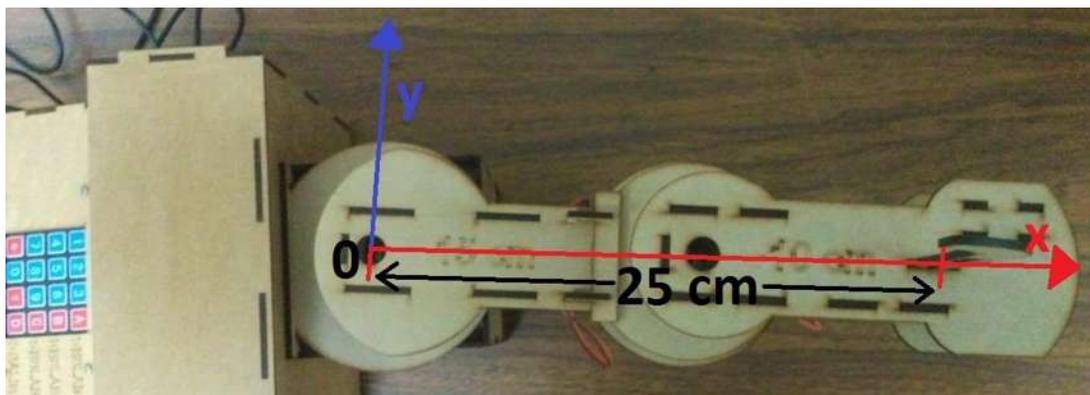


Figura 4.34: Posición Final del Prototipo SCARA. Primera Prueba (Vista Superior)

La **figura 4.34** muestra el dispositivo visto desde arriba, de donde se puede apreciar la posición en el eje X y el eje Y.

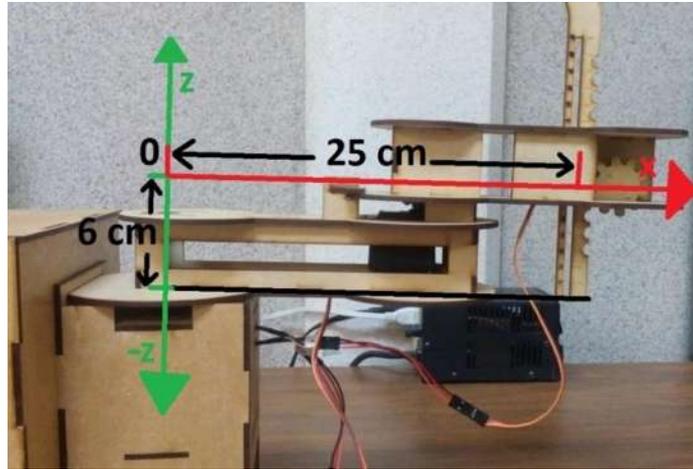


Figura 4.35: Posición Final del Prototipo SCARA. Primera Prueba (Vista Lateral)

La **figura 4.35** muestra el prototipo visto desde un costado, donde se aprecia la posición en el eje Z y nuevamente la posición en el eje X.

Es así como se obtiene la posición real y corresponde a:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \text{ cm} \\ 0 \text{ cm} \\ 6 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Para obtener matemáticamente la posición del manipulador SCARA es necesario obtener los parámetros Denavit-Hartenberg cuyo desarrollo se muestra en la **tabla 4.5**.

Tabla 4.5: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. SCARA (Primera Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l_1	15 cm	15 cm	15 cm
l_2	10 cm	10 cm	10 cm
θ_1	$\theta_1 - 90^\circ$	$90^\circ - 90^\circ$	0°
θ_2	$\theta_2 - 90^\circ$	$90^\circ - 90^\circ$	0°
d_3	$\theta_3(0.03) + 2.5$	$(120)(0.03) + 2.5$	6.1 cm

Y recordando que las ecuaciones que definen la posición final del manipulador SCARA son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 + \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 + \theta_2 \\ -d_3 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en las ecuaciones que determinan la posición del robot manipulador SCARA se obtiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \text{ cm} \\ 0 \text{ cm} \\ -6.1 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Si se comparan ambos resultados, se puede notar que para este ejemplo la diferencia es considerablemente mínima. A continuación se comparan los resultados obtenidos en la práctica y los obtenidos con la representación Denavit-Hartenberg:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	25 cm	25 cm
y	0 cm	0 cm
z	6 cm	-6.1 cm

4.7.1.2. Segunda Prueba

La segunda prueba se realizó introduciendo a cada articulación un nuevo ángulo por lo que la posición final cambia. Los ángulos introducidos en esta prueba se pueden observar en la **figura 4.36**.



Figura 4.36: Pantalla de los Ángulos Ingresados por el Usuario (Segunda Prueba)

Una vez que se han introducido los datos de cada articulación, el brazo robótico adquiere una posición que es visible en las siguientes imágenes (**figura 4.37**). La primera imagen (izquierda) corresponde a una vista superior del dispositivo mostrando la posición final de ambos eslabones lo que permite observar la posición que el prototipo obtuvo en el eje x y en el eje y. Por otro lado, la segunda imagen (derecha) es el dispositivo visto desde una perspectiva en la que se observa la posición que se tiene en el eje z.

Se puede observar también que, a pesar de no ejercer ningún movimiento en la tercera articulación correspondiente a la articulación prismática, se tiene una longitud de 2.5 cm y se debe a que el dispositivo tiene esa saliente y a partir de ese punto comienza el desplazamiento. Esto es considerado en la expresión para determinar los parámetros Denavit-Hartenberg.

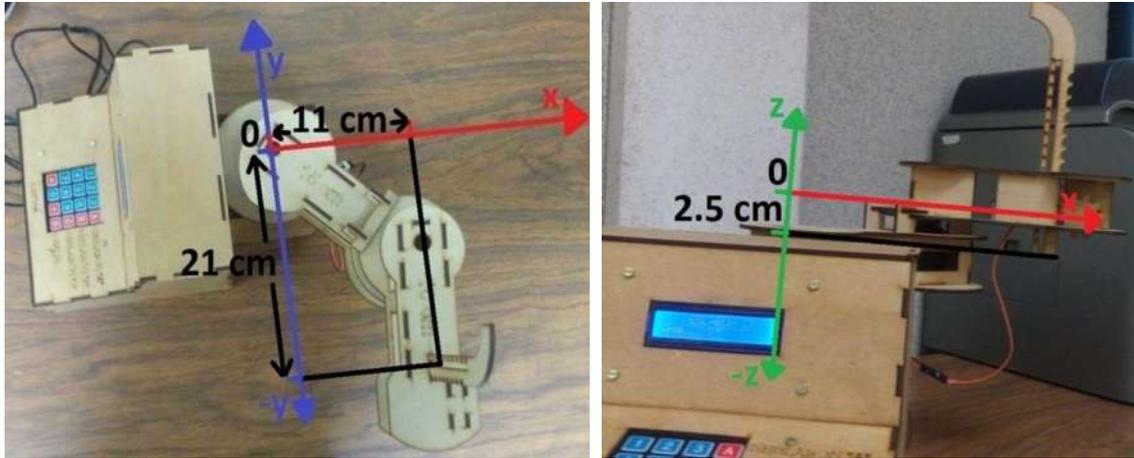


Figura 4.37: Posición Final del Prototipo SCARA (Segunda Prueba)

Es así como se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 \text{ cm} \\ 21 \text{ cm} \\ 2.5 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Analizando la posición de forma matemática, se obtienen los siguientes parámetros Denavit-Hartenberg (tabla 4.6) para los ángulos establecidos en cada articulación.

Tabla 4.6: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. SCARA (Segunda Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l_1	15 cm	15 cm	15 cm
l_2	10 cm	10 cm	10 cm
θ_1	$\theta_1 - 90^\circ$	$45^\circ - 90^\circ$	-45°
θ_2	$\theta_2 - 90^\circ$	$45^\circ - 90^\circ$	-45°
d_3	$-[\theta_3(0.03) + 2.5]$	$-[(0)(0.03) + 2.5]$	-2.5 cm

Si sabemos las ecuaciones que define la posición final del manipulador SCARA obtenidas con la representación Denavit-Hartenberg son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 + \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 + \theta_2 \\ -d_3 \end{bmatrix}$$

Al sustituir los parámetros Denavit-Hartenberg en las ecuaciones previamente descritas se obtiene matemáticamente la posición final del robot manipulador SCARA cuyos resultados son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.6066 \text{ cm} \\ -20.6066 \text{ cm} \\ -2.5 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Comparando ambos resultados, el error se puede observar con claridad en la siguiente tabla:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	11 cm	10.606 cm
y	21 cm	-20.606 cm
z	2.5 cm	-2.5 cm

4.7.1.3. Tercera Prueba

Para la tercera y última prueba se utilizaron los ángulos que se muestran en la **figura 4.38**.



Figura 4. 38: Pantalla de los Ángulos Ingresados por el Usuario (Tercera Prueba)

Por lo que el prototipo se posicionó de la manera que lo muestran las siguientes dos imágenes.

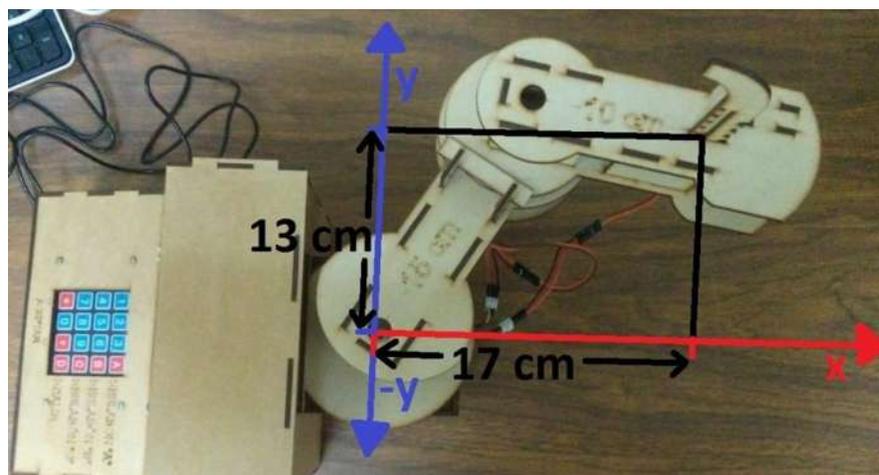


Figura 4.39: Posición Final del Prototipo SCARA. Tercera Prueba (Vista Superior)

En la imagen anterior (**figura 4.39**) muestra al prototipo visto desde arriba con las respectivas dimensiones alcanzadas por la posición final. La imagen muestra la posición adquirida en el eje x y en el eje y.

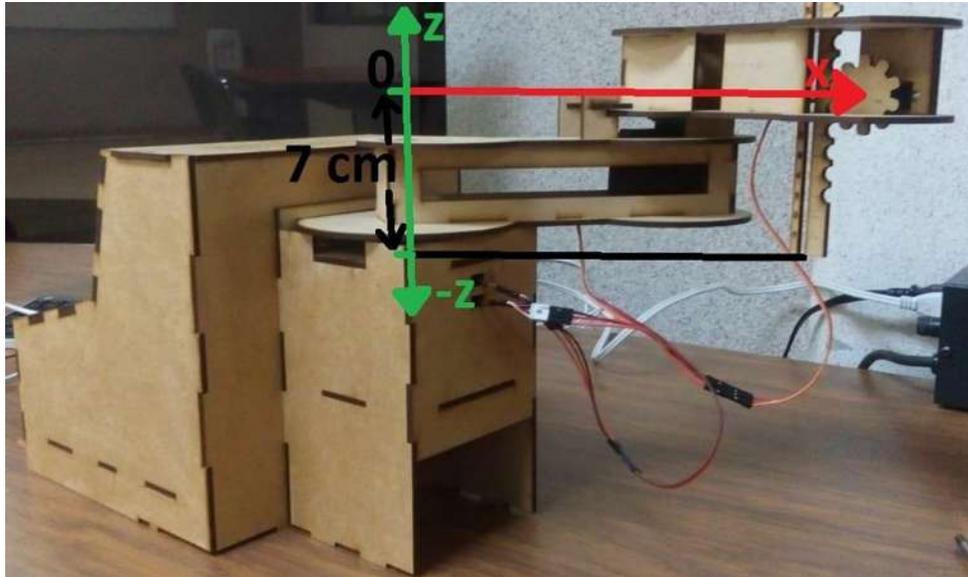


Figura 4.40: Posición Final del Prototipo SCARA. Tercera Prueba (Vista Lateral)

Visto desde una perspectiva lateral, se observa en la **figura 4.40** el posicionamiento de la tercera articulación en el eje z. Es de esta manera que se puede determinar la posición real del prototipo, y corresponde a los siguientes puntos cartesianos:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17 \text{ cm} \\ 13 \text{ cm} \\ 7 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Para realizar el cálculo matemático que determina la posición del manipulador se requieren los parámetros Denavit-Hartenberg de esta prueba los cuales se muestra su obtención en la **tabla 4.7**, a partir de los valores establecidos por el usuario.

Tabla 4.7: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. SCARA (Tercera Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l_1	15 cm	15 cm	15 cm
l_2	10 cm	10 cm	10 cm
θ_1	$\theta_1 - 90^\circ$	$150^\circ - 90^\circ$	60°
θ_2	$\theta_2 - 90^\circ$	$30^\circ - 90^\circ$	-60°
d_3	$-\theta_3(0.03) + 2.5$	$-(150)(0.03) + 2.5$	-7 cm

Utilizando las ecuaciones para determinar la posición final del manipulador SCARA las cuales son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 + \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 + \theta_2 \\ -d_3 \end{bmatrix}$$

Una vez que se han sustituido los parámetros Denavit-Hartenberg en las ecuaciones mencionadas se obtiene como resultado las coordenadas de la posición final del dispositivo, las cuales son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.5 \text{ cm} \\ 12.9903 \text{ cm} \\ -7 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Finalmente, a continuación se muestra la comparación de los resultados prácticos con los resultados teóricos analizados con la representación Denavit-Hartenberg para determinar la posición final del manipulador:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	17 cm	17.5 cm
y	13 cm	12.9903 cm
z	7 cm	-7 cm

4.7.2. Brazo Robótico PUMA

Al igual que para el caso del manipulador SCARA, la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg se modifica ligeramente debido a la rotación de los ejes cartesianos convencionales para lograr ajustar el valor introducido por el usuario al valor requerido para el desarrollo matemático.

Los cambios necesarios se muestran en la **tabla 4.8**. Es en dicha tabla donde se pueden notar ciertos cambios respecto a la tabla original, específicamente en la longitud l_1 y en los ángulos correspondientes a la segunda y tercera articulación. Por su parte, la modificación realizada en los ángulos de la segunda como de la tercera articulación es producto de la rotación de los ejes cartesianos convencionales para ajustar los parámetros ingresados por el usuario.

Tabla 4. 8: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg del Robot PUMA

ESLABÓN	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	0 cm	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_1
2	12 cm	0	0	$\theta_2 - 90^\circ$
3	10 cm	0	0	$90^\circ - \theta_3$

4.7.2.1. Primera Prueba

La prueba se realizó introduciendo los grados que se observan en la **figura 4.41**, aplicados a cada una de las tres articulaciones.



Figura 4.41: Pantalla de los Ángulos Ingresados por el Usuario (Primera Prueba)

Con las articulaciones acomodadas en esos ángulos, el dispositivo adquiere la posición que se muestra en las siguientes imágenes.

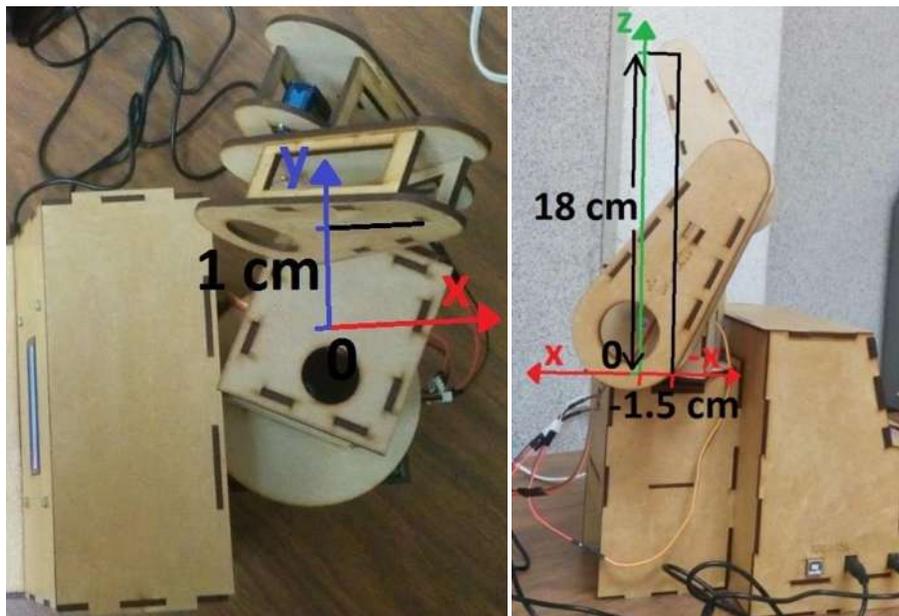


Figura 4.42: Posición Final del Prototipo PUMA (Primera Prueba)

De las imágenes anteriores (**figura 4.42**) se observa la posición final en sus tres ejes distribuidos de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \text{ cm} \\ 1 \text{ cm} \\ 18 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Para el análisis matemático de esta prueba se requiere obtener los parámetros ajustados para poderlos introducir en la ecuación que define la posición del manipulador PUMA. La obtención de dichos parámetros se presenta en la **tabla 4.9**.

Tabla 4.9: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. PUMA (Primera Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l2	12 cm	15 cm	15 cm
l3	10 cm	10 cm	10 cm
θ1	θ ₁	150°	150°
θ2	θ ₂ - 90°	145° - 90°	55°
θ3	90° - θ ₃	90° - 25°	65°

Recordando que las ecuaciones para determinar la posición final del manipulador PUMA, obtenidas en el apartado de la cinemática directa mediante el proceso de la representación Denavit-Hartenberg, son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2+\theta_3}] \\ \text{Sen}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2+\theta_3}] \\ l_2 \text{Sen}_{\theta_2} + l_3 \text{Sen}_{\theta_2+\theta_3} \end{bmatrix}$$

Una vez que se han sustituido los valores de los parámetros Denavit-Hartenberg en las ecuaciones mencionadas anteriormente, se obtiene la posición final del robot manipulador PUMA de forma matemática. Los resultados de las ecuaciones son:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.6306 \text{ cm} \\ 0.9414 \text{ cm} \\ 18.49 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

A continuación se muestra la comparación entre los resultados obtenidos en la práctica, y los resultados obtenidos de forma matemática. Los resultados son los siguientes:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	1.5 cm	-1.6306 cm
y	1 cm	0.9414 cm
z	18 cm	18.49 cm

4.7.2.2. Segunda Prueba

Para esta prueba se utilizaron los ángulos mostrados en la siguiente imagen (**figura 4.43**) para cada articulación respectivamente.



Figura 4.43: Pantalla de los Ángulos Introducidos por el Usuario (Segunda Prueba)

Una vez introducidos los valores en cada articulación, el dispositivo se coloca en la posición que muestra el siguiente par de imágenes.

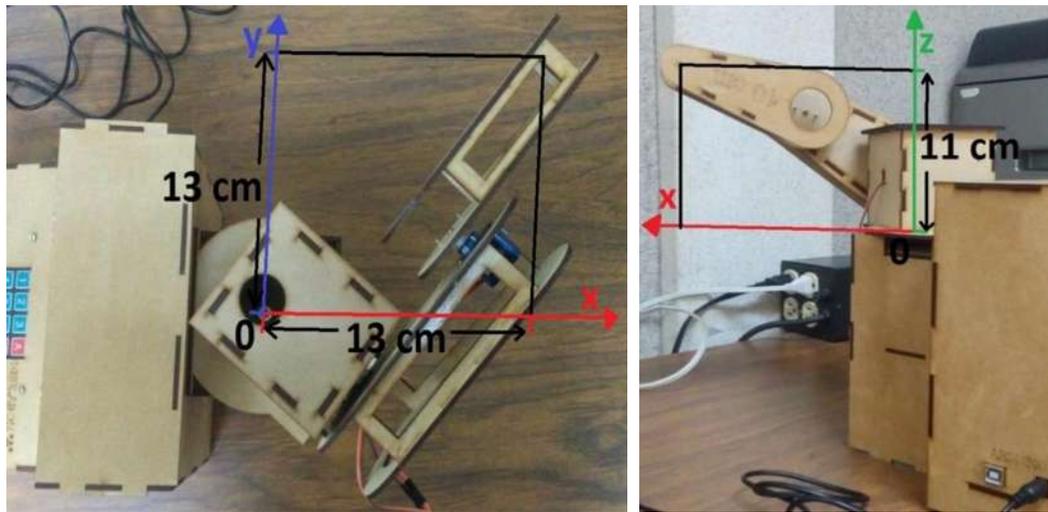


Figura 4.44: Posición Final del Prototipo PUMA (Segunda Prueba)

En las imágenes de la **figura 4.44** se observa la posición final respecto a cada uno de ejes. El resultado obtenido en la práctica es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13 \text{ cm} \\ 13 \text{ cm} \\ 11 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

El desarrollo matemático se llevó a cabo después de determinar los parámetros Denavit-Hartenberg los cuales se presentan en la **tabla 4.10**.

Tabla 4.10: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. PUMA (Segunda Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l2	12 cm	15 cm	15 cm
l3	10 cm	10 cm	10 cm
θ1	θ ₁	45°	45°
θ2	θ ₂ - 90°	120° - 90°	30°
θ3	90° - θ ₃	90° - 90°	0°

Para obtener la posición final del manipulador de forma matemática es importante recordar las ecuaciones que determinan las coordenadas de dicha posición:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ \text{Sen}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ l_2 \text{Sen}_{\theta_2} + l_3 \text{Sen}_{\theta_2 + \theta_3} \end{bmatrix}$$

La posición resultante por medio de la representación Denavit-Hartenberg es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.4721 \text{ cm} \\ 13.4721 \text{ cm} \\ 11 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

A continuación se presentan ambos resultados para poderlos comparar. Los resultados fueron:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	13 cm	13.4721 cm
y	13 cm	13.4721 cm
z	11 cm	11 cm

4.7.2.3. Tercera Prueba

Para la última prueba, se ingresó a cada articulación los ángulos correspondientes a la siguiente imagen (**figura 4.45**).



Figura 4.45: Pantalla de los Ángulos Introducidos por el Usuario (Tercera Prueba)

Tales ángulos produjeron que el prototipo se ubicara en la posición mostrada por el siguiente par de imágenes.

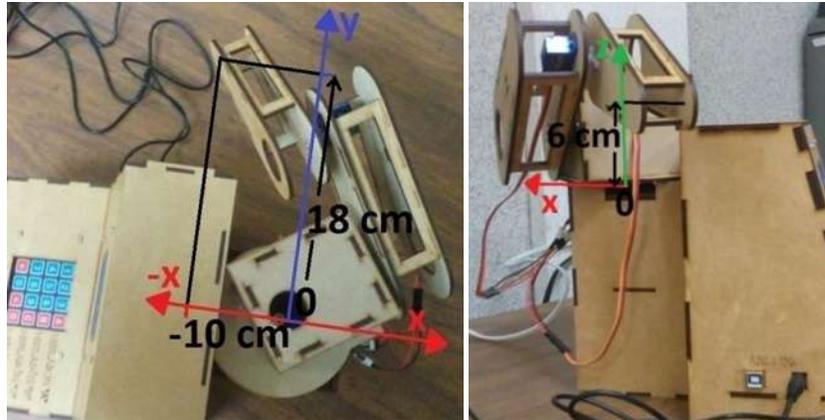


Figura 4.46: Posición Final del Dispositivo PUMA (Tercera Prueba)

Observando ambas imágenes (**figura 4.46**) se puede notar la posición final distribuida sobre los tres ejes cartesianos. El resultado fue el siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \text{ cm} \\ 18 \text{ cm} \\ 6 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Posteriormente, se obtuvo la posición a través de la representación Denavit-Hartenberg, pero antes de aplicar las ecuaciones que definen la posición final se debe obtener la tabla de parámetros con el respectivo ajuste. La **tabla 4.11** muestra la obtención de dichos parámetros:

Tabla 4.11: Ajuste de los Parámetros Denavit-Hartenberg. PUMA (Tercera Prueba)

Parámetro	Ecuación	Sustitución	Valor Ajustado
l2	12 cm	15 cm	15 cm
l3	10 cm	10 cm	10 cm
θ1	θ ₁	120°	120°
θ2	θ ₂ - 90°	120° - 90°	30°
θ3	90° - θ ₃	90° - 120°	-30°

Retomando las ecuaciones que definen la posición final del robot manipulador PUMA tenemos:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ \text{Sen}_{\theta_1} [l_2 \text{Cos}_{\theta_2} + l_3 \text{Cos}_{\theta_2 + \theta_3}] \\ l_2 \text{Sen}_{\theta_2} + l_3 \text{Sen}_{\theta_2 + \theta_3} \end{bmatrix}$$

Una vez que se ingresaron los parámetros en las ecuaciones para determinar la posición del manipulador, el resultado fue el siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.1961 \text{ cm} \\ 17.6602 \text{ cm} \\ 6 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

Finalmente, a continuación se muestra la comparación de ambos resultados:

Eje	Real	Denavit-Hartenberg
x	13 cm	-10.1961 cm
y	13 cm	17.6602 cm
z	11 cm	6 cm

4.7.3. Observaciones

Es importante aclarar que en algunas pruebas se obtienen valores negativos, esto se debe al posicionamiento de los ejes cartesianos que el proceso para determinar los parámetros Denavit-Hartenberg requiere. Sin embargo, la posición de cada brazo robótico está representada (para el caso de este prototipo) en centímetros, por lo que al tratarse de distancias, las mediciones reales se dejaron positivas. Para concluir, el método de Denavit-Hartenberg para determinar la posición de los robots manipuladores es efectivo siempre y cuando se cumplan los requisitos establecidos.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Este trabajo ha presentado el desarrollo para la construcción de un robot manipulador reconfigurable desde el diseño de la estructura que contiene todos los elementos electrónicos, hasta el ensamble de dichos elementos. Así mismo, la estructura de programación necesaria para controlar el dispositivo. Durante el proceso, se consideraron algunos detalles que al final lograron que el dispositivo construido sea totalmente funcional aunque, evidentemente, esta clase de prototipos puede mejorar de manera considerable.

El material utilizado para la construcción de la estructura cumplió con las expectativas deseadas ya que es ligero, fácil de manipular, es económico comparado con otros materiales, y además tiene la resistencia para soportar los componentes electrónicos. Además, permite la personalización ya que se puede pintar para darle una mejor apariencia. El dispositivo cuenta con una fuente de voltaje variable, la cual se diseñó para establecer un voltaje aceptable en los servomotores los cuales brindan el movimiento a los brazos robóticos. Dicha fuente fue diseñada y construida a partir de los parámetros establecidos por el fabricante de los servomotores y una vez construida e implementada en el prototipo, la fuente cumplió con las expectativas deseadas.

La placa para esta fuente resultó ser de un tamaño bastante compacto, lo que favorece al diseño de la estructura donde se incorporó ya que el tamaño del modelo de robot manipulador se puede ajustar a escalas pequeñas o escalas más grandes.

También es importante mencionar que la fuente fue diseñada para contener un mínimo de elementos electrónicos, evitando el calentamiento de la misma.

La parte más importante del prototipo descrito en este trabajo es la placa Arduino UNO que controla los servomotores, la pantalla y el teclado. Elaborar el modelo con esta placa resultó ser muy favorable para la creación del prototipo ya que tiene muchas ventajas comparada con otras placas. El Arduino UNO tiene diversas ventajas sobre otras placas como el costo, pues es bastante económico, la facilidad con la que se puede adquirir en tiendas de electrónica y la comodidad que brinda su programación. En cuanto a esta, por tratarse de software libre, la plataforma con el que se programa la placa Arduino UNO es gratuito y se puede descargar directamente de la página oficial de Arduino, funcionando para la placa oficial, como para las réplicas que se distribuyen a un costo menor. Otro factor importante fue la facilidad con la que se incorpora el hardware a la placa ya que Arduino cuenta con una amplia gama de librerías para poder vincular la placa con otros elementos de hardware, lo que facilitó la implementación de la pantalla y el teclado matricial.

Quizá la parte más problemática fue la incorporación de los servomotores. La resolución de los mismos no es la mejor pues, si se quiere modificar la posición del brazo robótico en un grado, los servomotores no se mueven. Es a partir de los 3 grados cuando el servomotor logra un desplazamiento satisfactorio limitando el funcionamiento del prototipo a desplazarlo al menos tres grados. Sin embargo, lo anterior no afecta al funcionamiento normal de prototipo. También es necesario mencionar que, los servomotores tienen un avance de 0 a 180 grados, sin embargo, los servomotores utilizados en este trabajo exceden los 180 grados por aproximadamente 8 grados y si se lleva al límite, el consumo de corriente aumenta ya que se exige al máximo el control del servomotor. Es por esto que a través del software se limitó el funcionamiento del manipulador para evitar estos puntos conflictivos. A pesar de todo, el modelo de robot manipulador cumple con un funcionamiento bastante bueno y con un buen desempeño, aunque los detalles mencionados con anterioridad, ya se esperaban debido a la calidad de los servomotores.

La reconfiguración también resultó ser funcional y muy sencillo de realizar. Gracias a la posibilidad que brindan los accesorios de los servomotores de ser montados y desmontados a presión en el eje del servomotor, cada parte del brazo robótico que se construyó puede ser removido y colocado de forma manual sin la necesidad de manipular las demás piezas. Sólo es cuestión de desconectar las terminales del servomotor, desensamblar la parte del brazo robótico con el eje del servomotor (articulación) y colocar el nuevo eslabón reconectando la parte eléctrica de la nueva articulación. Así, la reconfiguración de ambos brazos robóticos y controlarlos con el mismo módulo satisface el objetivo que se formuló en un principio.

En general el dispositivo creado funciona correctamente y cumple con las expectativas que se establecieron en un principio. Los objetivos fueron cubiertos en su totalidad pero también es importante mencionar que el prototipo puede ser mejorado en algunos aspectos.

En el siguiente apartado se analizarán algunas recomendaciones para el funcionamiento óptimo del dispositivo, así como una perspectiva al mejoramiento o cambios interesantes en el modelo de robot manipulador reconfigurable.

5.2. Recomendaciones

Una ventaja muy importante que tienen las máquinas de corte láser sobre otros sistemas de corte es la precisión. Tal característica nos brinda la posibilidad de realizar cualquier diseño con un acabado muy bueno. El prototipo que se realizó tiene características establecidas por el asesor del trabajo y el autor del mismo, sin embargo, las ventajas que ofrece el corte láser permite la construcción de cualquier tipo de diseño para el armazón, modificando la forma de las estructuras, el tamaño del prototipo y el material con el que se construirá.

5.2.1. Fuente Externa

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, el prototipo cuenta con una fuente externa para alimentar a todos los servomotores. Esta fuente puede ser sustituida por otro diseño que pudiera ser más robusto, aunque una recomendación sería colocar un eliminador de voltaje de 110v de corriente alterna a 6v de corriente directa y 2A de corriente. El uso de este eliminador sería suficiente para alimentar a todos los servomotores evitando la implementación de una fuente adicional lo que conlleva a evitar la elaboración de la placa. La única observación que se tiene sobre la implementación de este eliminador es el voltaje, este es fijo a 6 volts y los servomotores trabajan con diferente voltaje para diferente torque. Como los servomotores trabajan su torque máximo a 6v, se estarían alimentando en el límite de sus características, aunque para el trabajo que desempeñan en este prototipo no influye demasiado.

5.2.2. Arduino

El Arduino que se utilizó fue el Arduino UNO, sin embargo, los productos de esta familia son muy variados y cada uno con características diferentes tanto a nivel electrónico como a nivel físico. El modelo de robot manipulador reconfigurable se construyó con el más común de todos, siendo Arduino UNO, quizá el más utilizado, por ende el más fácil de conseguir. Sin embargo, este prototipo puede funcionar con otras placas de la misma familia, por ejemplo Arduino NANO, Arduino MICRO y Arduino MINI por mencionar a los más pequeños cuyas características son suficientes para realizar un prototipo de este tipo. Una ventaja de hacer un cambio de placa es el costo, resultando ser los antes mencionados, más económicos que el Arduino UNO. Otra ventaja es el tamaño, ya que los tres mencionados son de dimensiones considerablemente menores lo que podría representar

realizar el prototipo a una escala mucho menor siempre y cuando se consideren todos los elementos que contendrá, como los servomotores, la pantalla y el teclado. En cuanto a la programación, resulta indiferente la placa que se utilice ya que todas las placas de la familia Arduino se programan de manera muy similar.

5.2.3. Pantalla

La pantalla LCD que se utilizó para realizar el prototipo es un LCD de 16x2, es decir, 16 caracteres por dos filas. La pantalla podría ser cambiada por una de 16x4 (16 caracteres por 4 filas) sin ningún problema ya que la librería de Arduino funciona para ambas de la misma manera, con la diferencia que al conectar una pantalla de más filas es necesario determinarlo en el programa. Una ventaja de insertar una pantalla de más filas es la posibilidad de realizar un menú más interactivo aunque prácticamente no aporta algo más, salvo una programación ligeramente más compleja. La recomendación es utilizar una pantalla de 16x2 para evitar complicaciones en la programación y en el diseño de la estructura pues al ser una pantalla más grande se deberá modificar el diseño de la pieza donde se insertará la misma.

5.2.4. Estructura

Finalmente, se recomienda analizar la decisión del material con el que se realizará el prototipo ya que cada material tiene sus ventajas y desventajas. El que se utilizó para este trabajo está construido en MDF el cual es económico, ecológico, fácil de conseguir y rígido, sin embargo, es propenso a la formación de hongos y de dañarse por la humedad a menos que se someta a un tratamiento externo con esmaltes o pinturas especiales. También es un material que a pesar de ser rígido y soportar los elementos electrónicos sin doblarse, suele dañarse muy rápido cuando se usa de manera constante.

Como ya se ha mencionado antes, las máquinas de corte láser pueden desempeñarse de buena manera ante materiales más resistentes que el MDF como el acrílico e incluso aluminio pero se debe considerar otras cosas como el costo (que son más elevados), la forma de unir las piezas (ya sea con tornillos o pegamentos especiales) y la facilidad con la que se pudieran adquirir este tipo de materiales.

Bibliografía

- [1] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA, Madrid: McGraw-Hill, 1997.
- [2] F. Reyes Cortés, ROBÓTICA: CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES, Ciudad de México: Alfaomega, 2011.
- [3] K. S. Fu, R. C. Gonzalez y C. S. G. Lee, ROBOTICA: Control, detección, visión e inteligencia, Madrid: McGraw-Hill, 1993.
- [4] «Organización Mundial del Comercio,» 2017. [En línea]. Available: http://stat.wto.org/CountryProfiles/MX_e.htm.
- [5] J. Cortés Parejo, Enero 2008. [En línea]. Available: https://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/RobotPUMA.pdf. [Último acceso: Junio 2018].
- [6] R. A. Española, «Diccionario de la Lengua Española,» [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/?id=SxiYiPt>. [Último acceso: Junio 2018].
- [7] «SIDEKO: Sistemas de corte CNC,» [En línea]. Available: <https://sideco.com.mx/como-funciona-una-maquina-de-corte-laser2/>. [Último acceso: 26 Junio 2018].
- [8] F. A. Candelas Herías y J. A. Corrales Ramón, «Aurova,» 20 Septiembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.aurova.ua.es/previo/dpi2005/docs/publicaciones/pub09-ServoMotores/servos.pdf>. [Último acceso: Junio 2018].
- [9] A. García González, «PANAMAHITEK: CONOCIMIENTO LIBRE,» 2 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>. [Último acceso: Junio 2018].
- [10] «Arduino: Tecnología para todos,» [En línea]. Available: <https://arduinodhtics.weebly.com/iquestqueacute-es.html>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [11] L. Thayer Ojeda, «ARDUINO.cl,» [En línea]. Available: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [12] «DEFINICIÓN ABC: TU DICCIONARIO HECHO FÁCIL,» [En línea]. Available: <https://www.definicionabc.com/tecnologia/pantalla-lcd.php>. [Último acceso: 23 Junio 2018].

- [13] J. Pérez Porto y M. Merino, «Definición.de,» 2009. [En línea]. Available: <https://definicion.de/teclado/>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [14] «UNICROM Electrónica,» [En línea]. Available: <https://unicrom.com/lm317-regulador-de-voltaje-variable/>. [Último acceso: 23 Junio 2018].