

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO CONTROLADO POR SENSORES INCORPORADOS EN BRAZALES, PARA LA EMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN BRAZO HUMANO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ALEX FABRICIO OÑA ÑACATA

on_alex8_cp@hotmail.es

DIRECTOR: Ing. Luis Alberto Morales Escobar, MSc.

luis.moralesec@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: Dr. Jorge Andrés Rosales Acosta

andres.rosales@ieee.org

Quito, Septiembre 2014

DECLARACIÓN

Yo, Alex Fabricio Oña Ñacata, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Alex Fabricio Oña Ñacata

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alex Fabricio Oña Ñacata, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Morales, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Andrés Rosales
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien con su infinito amor me ha guiado desde siempre y me ha dado la sabiduría y fuerza para superarme día a día permitiéndome crecer como persona y profesionalmente.

Agradezco a mi madre que a más de haberme dado la vida, dedicó su tiempo para llenarme de amor y guiarme en los caminos correctos, que me han permitido formarme como un hombre de bien, inculcándome el respeto hacia los demás y el ser agradecido de Dios por todas las cosas que nos acontecen.

Agradezco a mi padre por haberme dado la vida, brindarme su apoyo y comprensión.

Agradezco a mis hermanas Mayri y Taty y a mi hermano Jorge que me han apoyado incondicionalmente compartiéndome sus experiencias y logros para ser seguro de mí mismo, confiar en mis capacidades y poder alcanzar las metas que me proponga en la vida.

Agradezco a mis queridos abuelitos, tíos, tías, primos, primas y amigos cercanos que siempre supieron animarme moralmente, además de brindarme su gran cariño y aprecio hacia mi persona.

Agradezco a mis amigos que me han demostrado compañerismo y me han brindado una grata amistad durante toda la vida universitaria, de la cual me llevo grandes recuerdos y vivencias.

Agradezco a todos los profesores de la gran apreciada Escuela Politécnica Nacional, que me supieron compartir sus conocimientos con dedicación y paciencia, esperando formar grandes profesionales colaboradores, trabajadores, y especialmente ser grandes personas al servicio del país.

Agradezco al Ing. Luis Morales, MSc. y al Dr. Andrés Rosales que me supieron apoyar y guiar en el desarrollo del presente proyecto, así mismo por brindarme su valioso tiempo y paciencia para que los objetivos planteados hayan sido logrados con gran satisfacción.

Alex Fabricio Oña Ñacata

DEDICATORIA

A mi querido Dios, quien me ha permitido día a día aprender grandes experiencias que me han llenado de sabiduría y paz en mi vida.

A mi amada madre quien que con su humildad y lucha constante a pesar de las adversidades fue un gran referente en mi vida, quien me enseñó el gran valor de las cosas pequeñas en la vida, quien me inculcó valores y tener fe en nuestro Dios que él nos da la salud y la vida para ser mejores cada día.

A mi padre que a pesar de las circunstancias adversas me ha brindado su apoyo.

A mis hermanas y hermano que confiaron en mí y me incentivaron a luchar siempre por mis sueños, brindándome su apoyo y amor incondicional.

A mi familia en general que siempre estuvo para brindarme su apoyo y un ambiente de paz y amor.

Alex Fabricio Oña Ñacata

CONTENIDO

RESUMEN	vi
PRESENTACIÓN	viii
CAPÍTULO 1	1
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1 BRAZO HUMANO	1
1.1.1 PARTES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR	1
1.1.1.1 Cintura escapular (Hombro).....	2
1.1.1.2 Brazo	2
1.1.1.3 Antebrazo	2
1.1.1.4 Mano.....	3
1.1.2 BIOMECÁNICA DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR [5][6][7].....	3
1.1.2.1 Modelo biomecánico de la extremidad superior.....	5
1.1.2.2 Movimientos.....	6
1.1.2.2.1 Hombro.....	6
1.1.2.2.2 Codo.....	9
1.1.2.2.3 Muñeca.....	11
1.2 ROBÓTICA.....	11
1.2.1 DEFINICIÓN [9]	12
1.2.2 CLASIFICACIÓN [9].....	12
1.3 MANIPULADOR ROBÓTICO [9][14]	14
1.3.1 DEFINICIONES.....	15
1.3.1.1 Eslabón [15].....	15
1.3.1.2 Articulación [14] [9]	15
1.3.1.3 Grado de libertad [16]	16
1.3.1.4 Volumen de trabajo [16].....	16
1.3.1.5 Capacidad de carga [17].....	17
1.3.1.6 Efecto final [17] [14].....	17
1.3.2 CONFIGURACIONES CINEMÁTICAS.....	17
1.3.2.1 Configuración cartesiana	17
1.3.2.2 Configuración cilíndrica	18
1.3.2.3 Configuración polar o esférica	18
1.3.2.4 Configuración angular o antropomórfica	19
1.4 SISTEMAS FUNCIONALES DE UN MANIPULADOR.....	19

1.4.1	SENSOR [9][18].....	20
1.4.1.1	Sensor de desplazamiento [9][14]	20
1.4.1.1.1	Potenciómetro	20
1.4.1.2	Sensores de presencia o proximidad [9][14].....	22
1.4.1.2.1	Sensor óptico.....	22
1.4.1.3	Sensores IMU (inertial measurement unit).....	24
1.4.2	ACTUADORES [9][14]	29
1.4.2.1	Servomotor [20][21][22]	29
CAPÍTULO 2		32
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DE LOS SISTEMAS ROBÓTICO Y BRAZALES		32
2.1	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO	32
2.1.1	PARTES DEL SISTEMA ROBÓTICO [28]	32
2.1.1.1	Base para rotación.....	32
2.1.1.2	Soporte multipropósito para servomotor	33
2.1.1.3	Soporte largo “C” para servomotor	34
2.1.1.4	Soporte para servo “C” (Sin rodamiento de bolas)	35
2.1.1.5	Soporte conector tipo “L”	36
2.1.1.6	Mano robótica	36
2.1.2	ENSAMBLE DEL SISTEMA ROBÓTICO.....	37
2.1.2.1	Ensamble articulación 1 (hombro)	37
2.1.2.2	Ensamble articulación 2 (hombro)	38
2.1.2.3	Ensamble articulación 3 (Brazo)	39
2.1.2.4	Ensamble articulación 4 (Codo).....	40
2.1.2.5	Ensamble articulación 5 (muñeca).....	41
2.1.3	ENSAMBLAJE DE LA ESTRUCTURA SOPORTE	42
2.1.4	ACOPLAMIENTO BRAZO ROBÓTICO-ESTRUCTURA SOPORTE.....	46
2.1.5	SERVOMOTORES UTILIZADOS	46
2.1.5.1	Servomotor para la articulación 1	48
2.1.5.2	Servomotor para la articulación 2	49
2.1.5.3	Servomotor para la articulación 3	50
2.1.5.4	Servomotor para la articulación 4	51
2.1.5.5	Servomotor para la articulación 5	51
2.1.5.6	Servomotor para la apertura y cierre de la mano robótica	52

2.1.6	CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBÓTICO	52
2.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO	53
2.2.1	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	54
2.2.2	SISTEMA ELECTRÓNICO DEL ROBOT	57
2.2.2.1	Sistema sensorizado	57
2.2.2.2	Sistema de acondicionamiento 1	61
2.2.2.3	Sistema de control de servomotores [32].....	64
2.2.2.4	Panel frontal del robot.....	67
2.2.2.5	Sistema de control del robot [36]	73
2.2.3	SISTEMA ELECTRÓNICO DE BRAZALES	76
2.2.3.1	Brazal mano (guante)	77
2.2.3.2	Sistema de acondicionamiento 2	79
2.2.3.3	Brazales brazo y antebrazo	79
2.2.3.4	Sistema de control de brazos.....	80
2.2.4	INTERFAZ DE COMUNICACIÓN SERIAL.....	83
CAPÍTULO 3		85
DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL.....		85
3.1	PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SISTEMA ROBÓTICO.....	86
3.1.1	PROGRAMA PRINCIPAL	86
3.1.2	SUBROUTINA DE ENCENDIDO DEL SISTEMA ROBÓTICO	89
3.1.3	SUBROUTINA DE EJECUCIÓN DE MOVIMIENTOS PREDEFINIDOS	90
3.1.4	SUBROUTINA DEL ENLACE SISTEMA ROBÓTICO - PC	91
3.1.5	SUBROUTINA PARA EL SISTEMA DE SENSORES DEL BRAZO ROBÓTICO	93
3.1.6	SUBROUTINA DE ENVÍO DE DATOS AL CONTROLADOR DE SERVOS	94
3.1.7	SUBROUTINA DE DETECCIÓN DE ERROR EN LA COMUNICACIÓN.....	95
3.1.8	SUBROUTINA DE DESCONEXIÓN SISTEMA ROBÓTICO-PC ..	96
3.1.9	SUBROUTINA DE APAGADO DEL SISTEMA	96
3.1.10	COMANDOS DE CONTROL	97
3.1.10.1	Comando de control manual.....	98
3.1.10.2	Comando de control con brazos	98
3.1.10.3	Comando de fin de control.....	99

3.1.11	INTERRUPCIONES	100
3.2	PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE BRAZALES	100
3.2.1	PROGRAMA PRINCIPAL	101
3.2.2	SUBROUTINA DEL ENLACE SISTEMA DE BRAZALES – PC..	103
3.2.3	SUBROUTINA DEL SISTEMA DE SENSORES ÓPTICOS	104
3.2.4	SUBROUTINA DE LOS SENSORES IMU CHR-UM6	105
3.2.5	SUBROUTINA DE DETECCIÓN DE ERROR EN LA COMUNICACIÓN.....	107
3.2.6	COMANDOS DE CONTROL.....	108
3.2.6.1	Comando de control activo	108
3.2.6.2	Comando de fin de control.....	109
3.2.6.3	Comando para el encendido de los giroscopios del sensor IMU CHR-UM6	109
3.2.7	INTERRUPCIONES	110
3.3	DISEÑO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI).....	110
3.3.1	PANEL PRINCIPAL	111
3.3.2	PANEL DE CONTROL.....	115
3.3.3	DIAGRAMA DE BLOQUES.....	120
3.3.3.1	Programación del enlace sistema robótico/brazales con el computador	120
3.3.3.2	Programación para la recepción de datos del sistema robótico 120	
3.3.3.3	Acondicionamiento de datos de los sensores del sistema robótico 121	
3.3.3.4	Acondicionamiento de datos de los sensores del sistema de brazales 127	
3.3.3.5	Programación del controlador PID.....	130
3.3.3.5.1	Controlador PID.....	130
3.3.3.6	Datos de salida del controlador	134
3.3.3.7	Programación de envío de datos para los servomotores.....	139
3.3.3.8	Programación para el posicionamiento inicial del robot.....	140
CAPÍTULO 4	141
PRUEBAS Y RESULTADOS.....		141
4.1	CONSIDERACIONES INICIALES	141
4.2	PRUEBAS DE LA ESTRUCTURA ROBÓTICA	144
4.2.1	RANGO ANGULAR DE LOS ACTUADORES.....	144

4.2.2	PRUEBAS DE MOVILIDAD DEL SISTEMA ROBÓTICO.....	145
4.3	PRUEBAS ELECTRÓNICAS.....	146
4.3.1	PRUEBA DE ENLACE DE LOS SISTEMAS ROBÓTICO/BRAZALES CON EL COMPUTADOR	146
4.3.2	PRUEBAS DE DETECCIÓN DE ERRORES EN LA COMUNICACIÓN.....	148
4.3.3	PRUEBAS DE MOVIMIENTOS PREDEFINIDOS DEL SISTEMA ROBÓTICO	150
4.3.4	CALIBRACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID	151
4.4	PRUEBA DE MOVILIDAD DEL BRAZO ROBÓTIVO EMPLEANDO EL MODO DE CONTROL MANUAL.....	155
4.5	PRUEBA DE ORIENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTIVO EMPLEANDO UN CONTROL CON BRAZALES	162
4.5.1	UBICACIÓN DE BRAZALES.....	162
4.5.2	MOVIMIENTOS EMULADOS.....	166
4.6	PRUEBA DE AGARRE DE OBJETOS	170
4.7	COSTOS DEL PROYECTO	171
CAPÍTULO 5		174
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		174
5.1	CONCLUSIONES	174
5.2	RECOMENDACIONES.....	176
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		178
ANEXOS		

RESUMEN

En el presente proyecto se detalla el ensamblaje de un brazo robótico de cinco grados de libertad que le permiten emular gran parte de los movimientos de un brazo humano, cuyo programa de control está embebido en un computador, mismo que hace uso de un sistema de brazales y guante para determinar la posición del brazo humano y usarlas como medio de control.

El sistema robótico está basado en una configuración angular lo que ha permitido la obtención de un sistema rígido y maniobráble, que con sus 5 grados de libertad es capaz de efectuar gran parte de los movimientos anatómicos de un brazo real abarcando un amplio espacio de trabajo, además se ha dotado de un efector final que permite aumentar visualmente la similitud a un brazo humano, además que posibilita al robot la función de agarre de objetos de peso liviano.

El sistema de brazales emplea sensores inerciales (IMU) que permiten fácilmente estimar por medio de los ángulos de Euler la orientación de los eslabones del brazo humano, así mismo un guante emplea sensores ópticos de reflexión que permiten sensar el movimiento angular de la muñeca y la apertura o cierre de la mano; estos datos son procesados y envidados al computador por medio de un sistema microprocesado.

Para el control electrónico del brazo robótico se emplea un microcontrolador, que además procesa las señales provenientes de los sensores de cada articulación para tener un sistema realimentado, finalmente el sistema microprocesado permite interactuar visualmente al usuario con el prototipo mediante de un panel frontal que además permite: encender el sistema robótico, establecer una comunicación física con el computador, y ejecutar movimientos predefinidos por parte del robot.

Los datos enviados de los sistemas microprocesados del robot y de los brazales al computador, están comprendidos en tramas con bytes de sincronización que mejoran el rendimiento de la transmisión y la confiabilidad de los datos; para la transmisión y recepción de datos hace uso de un bus serial con el estándar RS-232 a una velocidad de 57600 baudios, valor con el cual se han obtenido buenos resultados de control sin interferencias externas.

El HMI fue desarrollado empleando el software LabView, y permite al usuario interactuar fácilmente para controlar los movimientos del sistema robótico manualmente o empleando el sistema de brazales, además posibilita visualizar en un gráfico en tiempo real la acción de control proporcionada por los controladores PID implementados en el software.

PRESENTACIÓN

En este proyecto se describe el diseño e implementación de un brazo robótico controlado por sensores incorporados en brazales para la emulación de los movimientos del brazo humano, para lo cual su desarrollo se ha distribuido en 5 capítulos que son presentados a continuación:

En el Capítulo 1 se exponen todos los fundamentos teóricos abarcados en el desarrollo de este prototipo, los mismos que comprenden un estudio básico de la anatomía y biomecánica del brazo humano, así mismo se ha efectuado el estudio pertinente a la robótica donde se exponen definiciones, clasificación, configuraciones y componentes de los manipuladores robóticos enfocándose al sistema implementado en este proyecto.

En el Capítulo 2 se detallan los componentes mecánicos que han sido seleccionados para el sistema robótico, así mismo se expone el ensamblaje tanto del robot como del soporte para el mismo. Además se exhibe todo el diseño e implementación de los sistemas electrónicos adecuados para la buena operación del sistema de control; también se presentan las características más importantes de los componentes empleados como: microcontroladores, circuitos digitales, sensores inerciales, controlador de servos, actuadores, LCD y sensores ópticos, resaltando su uso dentro del funcionamiento del sistema correspondiente.

En el Capítulo 3 se detalla el software en función de los diagramas de flujo que corresponden a las subrutinas de control de cada sistema microprocesado, dando a entender la estructura de ejecución de las tareas de control establecidas. También se muestra el desarrollo del HMI, dando las pautas fundamentales para el entendimiento de la interfaz y las funciones que en este se incluyen para controlar el sistema robótico ya sea en un modo manual o haciendo uso de los brazales.

En el Capítulo 4 se detallan las pruebas efectuadas con el sistema en cuanto a funcionamiento, control, comunicación y movilidad del robot; así mismo se expone una tabla con el error de posición estimado para cada articulación del sistema robótico empleando un control manual. En adición se presenta el desglose de todos los componentes con sus respectivos costos, que permiten efectuar una

estimación del valor total invertido para el desarrollo del presente proyecto de titulación incluyendo el valor de ingeniería.

Finalmente en base a la experiencia adquirida en el diseño, implementación y pruebas de todo el sistema en conjunto, en el Capítulo 5 se muestran las conclusiones y recomendaciones extraídas, así mismo se presentan las futuras mejoras para potencializar las aplicaciones del prototipo obtenido.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTO TEÓRICO

En el presente capítulo se detallan los aspectos teóricos del proyecto, para lo cual se hace referencia a un breve estudio relacionado al brazo humano; estudio de la robótica enfocándose a los manipuladores robóticos; análisis de sensores y actuadores como parte de la robótica orientándose a los utilizados en el proyecto.

1.1 BRAZO HUMANO

El brazo es un miembro superior del cuerpo humano, también llamado extremidad superior; el cuerpo tiene dos extremidades superiores que se encuentran ubicadas en la parte superior del tronco y además cubren toda la zona desde el hombro hasta los dedos de la mano; entre la cual se distinguen cuatro secciones: la mano, el antebrazo, el brazo, y la cintura escapular.

Básicamente una extremidad superior está constituida por 32 huesos y 42 músculos que junto con articulaciones y tendones permiten la ubicación del miembro en diferentes posiciones, permitiendo de esta manera interactuar con un medio físico donde se efectúan actividades como: ejercicios físicos, actividades deportivas, manipulación y agarre de objetos, entre otras [1] [2].

1.1.1 PARTES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR

De lo mencionado anteriormente, la extremidad superior se puede fraccionar en cuatro secciones que son:

- Cintura escapular (Hombro)
- Brazo
- Antebrazo
- Mano

En la Figura 1.1 se muestran las partes del miembro superior, con el fin de relacionar cada término con la concepción visual que se tiene de un brazo humano.

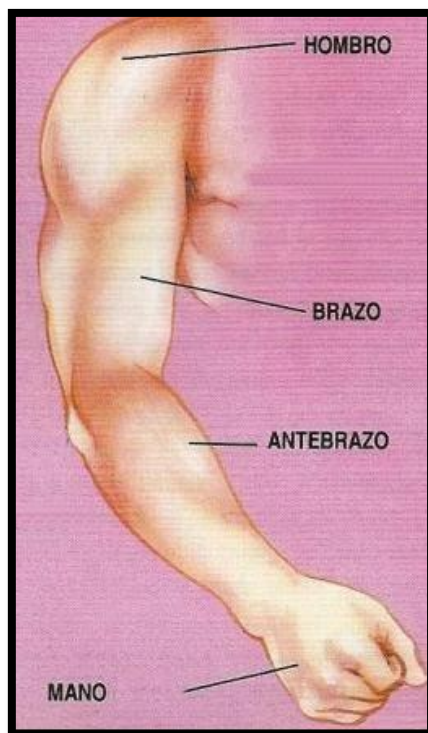


Figura 1.1 Partes de la extremidad superior [3]

1.1.1.1 Cintura escapular (Hombro)

Es una estructura conformada por dos huesos: la escápula y clavícula, las mismas que son ubicadas dos a cada lado, y su función principal es fijar la extremidad superior al tronco.

En esta región se forman tres articulaciones principales: articulación glenohumeral, articulación esternoclavicular, y la articulación acromioclavicular.

1.1.1.2 Brazo

Es la segunda sección de la extremidad superior, y se encuentra localizada entre la cintura escapular y el antebrazo. Su estructura esquelética está conformada por el hueso húmero el mismo que se articula por su parte superior con la escápula mediante la articulación glenohumeral (Hombro), y en por su parte inferior se articula con el cúbito y el radio a través de la articulación del codo [1] [4].

1.1.1.3 Antebrazo

Es una de las secciones de la extremidad superior ubicada entre el brazo y la mano. Su esqueleto está constituido por dos huesos largos: el cúbito y el radio.

Por la parte superior del antebrazo se articula del brazo por medio de la articulación codo (Húmero – Cubital y Húmero – Radial), y en su parte inferior se articula con la mano por medio de la articulación de la muñeca.

Adicionalmente existe una articulación denominada radiocubital la cual se manifiesta en la unión por la parte superior e inferior del cúbito y el radio permitiendo realizar movimientos de pronación y supinación [1].

1.1.1.4 Mano

Es la sección final de la extremidad superior y se encuentra unida con el antebrazo por medio de la articulación de la muñeca. Su esqueleto está conformado por tres conjuntos de huesos:

- **Carpo:** conformado por 8 huesos pequeños (Carpianos).
- **Metacarpo:** constituido por 5 huesos largos (metacarpianos).
- **Falanges:** constituido por los huesos de los dedos.

En total suman 27 huesos que conforma la mano [1] [4].

Articulación: este término es entendido en esta sección como la unión de dos o más huesos que permite el movimiento de los mismos.

1.1.2 BIOMECÁNICA DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR [5][6][7]

La extremidad superior tiene un movimiento en tres dimensiones, donde cada segmento del mismo va tomando posiciones y orientaciones diferentes en el espacio conforme se vaya haciendo algún tipo de movimiento.

Generalmente los movimientos del cuerpo humano se hacen referencia con respecto a un plano anatómico donde se distinguen tres planos: frontal o coronal, sagital y transversal; los mismos que permiten hacer una descripción anatómica tanto interna como externa del cuerpo humano.

En la Figura 1.2 se puede diferenciar los planos y ejes que permiten hacer una descripción anatómica.

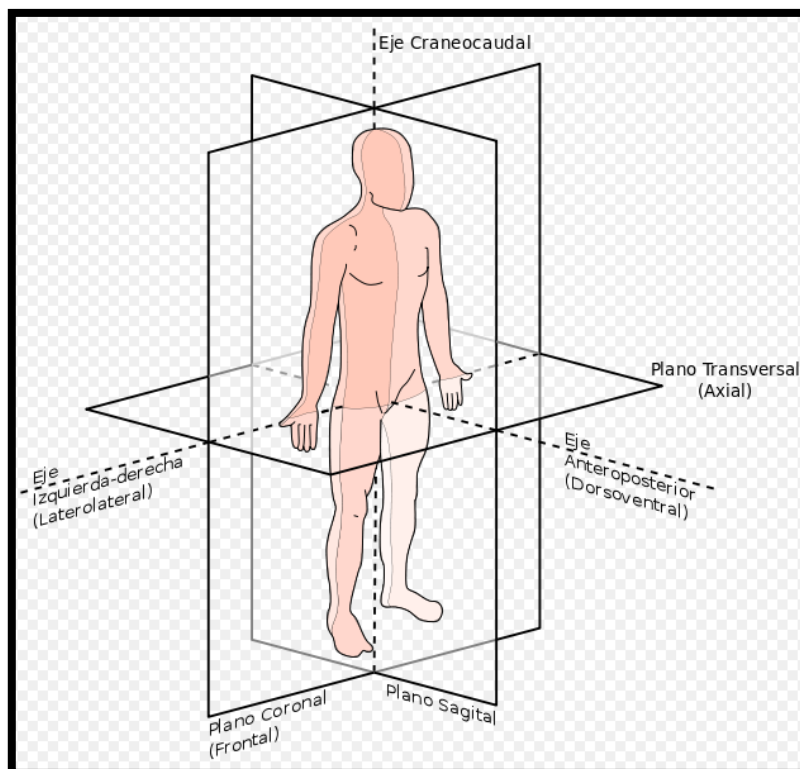


Figura 1.2 Plano anatómico [7]

- **Plano Frontal (Coronal):** está orientado verticalmente y divide al cuerpo en dos zonas: anterior y posterior.
- **Plano Sagital:** de igual manera que el anterior se encuentra orientado verticalmente y separa al cuerpo en dos zonas: izquierda y derecha.
- **Planos Horizontales:** están orientados horizontalmente y dividen al cuerpo en dos zonas: superior e inferior.
- **Planos Transversales (Axiales):** son planos equivalentes a los horizontales y son relativos a una estructura en particular; dividen al cuerpo en dos zonas: proximal y distal.
- **Eje cráneo-caudal:** es un eje vertical que se extiende desde la cabeza a los pies.
- **Eje latero-lateral (transversal):** es un eje horizontal que va de izquierda a derecha.
- **Eje anteroposterior:** es un eje que se extiende de adelante hacia la parte de atrás.

El movimiento de las extremidades superiores particularmente se hace con referencia a una posición anatómica, es decir una posición inicial a partir de la

cual se va identificando los movimientos de cada uno de los segmentos que conforman la extremidad, permitiendo un estudio anatómico pertinente y referenciado. La posición cero ubica a todo el brazo en conjunto extendido verticalmente al costado del tórax con la palma de la mano orientada hacia la parte frontal tal como se muestra en la Figura 1.2.

1.1.2.1 Modelo biomecánico de la extremidad superior

Este modelo está puntualizado como una cadena de segmentos considerados como cuerpos rígidos, los mismos se encuentran interconectados por articulaciones; de los cuales se tiene:

- **Tórax:** está definido como una estructura donde se tiene origen del sistema articulado.
- **Clavícula:** se extiende desde la articulación esternoclavicular hasta la articulación Acromioclavicular.
- **Húmero:** se extiende desde la articulación glenohumeral hasta la articulación del codo.
- **Antebrazo:** se extiende desde la articulación del codo hasta la articulación de la muñeca.
- **Mano:** es el segmento que se encuentra al final de la extremidad, y se extiende desde la articulación de la muñeca.

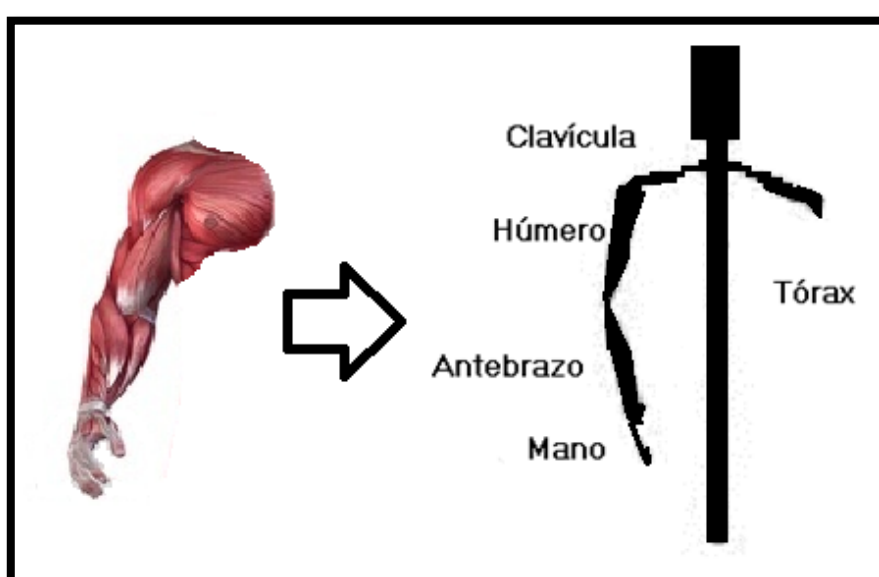


Figura 1.3 Modelo de la extremidad superior [8]

La unión de los segmentos es realizada por articulaciones, dando lugar a varios grados de libertad que permiten diferentes ubicaciones de cada uno de los segmentos. Entre los más importantes se tiene:

- **Esternoclavicular:** articulación que da origen a 2 grados de libertad.
- **Hombro:** está constituido por la articulación acromioclavicular y la articulación glenohumeral dando origen a 3 grados de libertad.
- **Codo:** se encuentra constituido por la articulación húmero-radial, húmero-cubital y radio cubital que en conjunto dan origen a 2 grados de libertad.
- **Muñeca:** es una articulación que provee 2 grados de libertad.

1.1.2.2 Movimientos

Tomando como base los conceptos básicos expuestos, se presenta a continuación cada uno de los movimientos realizados por la extremidad superior:

1.1.2.2.1 Hombro

El hombro básicamente define una articulación esférica, la cual permite una gran variedad de movimientos del húmero en el espacio, de los cuales se tienen:

Abducción: es el movimiento permitido por la articulación glenohumeral, y se efectúa en el plano frontal y en el eje anteroposterior, su rango angular es de 180° pero requiere del movimiento de rotación externa para llegar a los 180° .

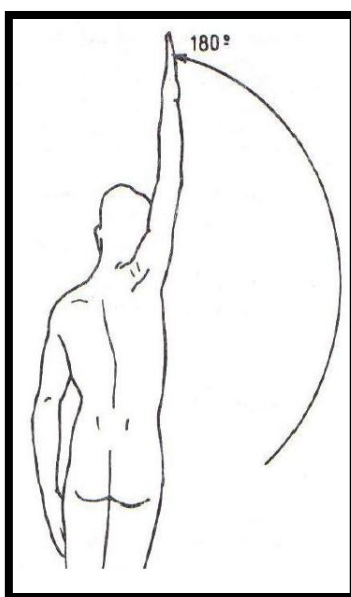


Figura 1.4 Movimiento de Abducción [6]

- a) **Aducción:** al igual que el movimiento anterior, este movimiento se desarrolla en el plano frontal y en el eje anteroposterior, y su rango angular está entre 30° a 45° dependiendo del individuo.

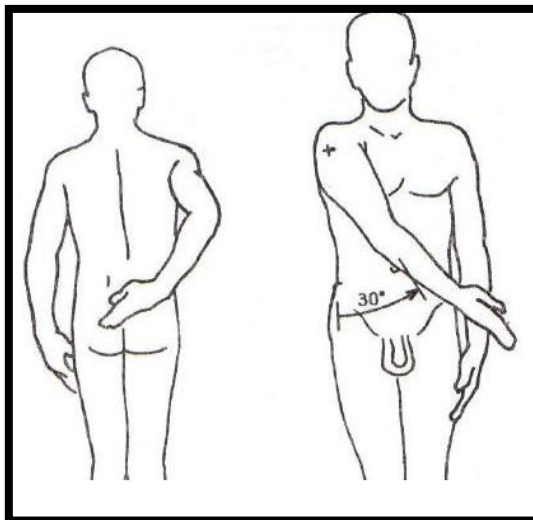


Figura 1.5 Movimiento de Aducción [6]

- b) **Flexión:** se desarrolla en el plano sagital y en el eje transversal, su rango angular está en los 180° .

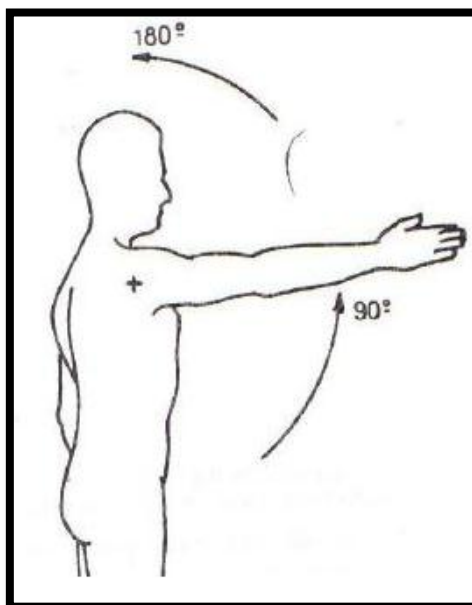


Figura 1.6 Movimiento de Flexión [6]

- c) **Extensión:** es efectuado en el plano sagital y en el eje transversal, y su rango angular está entre 45° a 60° .

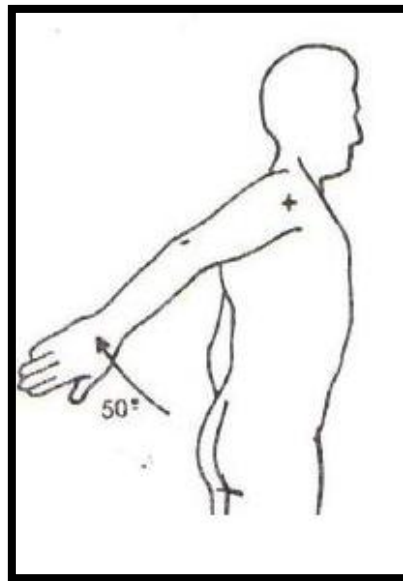


Figura 1.7 Movimiento de Extensión [6]

- d) Flexión – Extensión Horizontal:** se efectúa en un plano horizontal y en un eje vertical, su rango angular es de 140° para la flexión humeral y de 30° a 40° para la extensión humeral, tomando como referencia una abducción de 90° por parte del hombro.

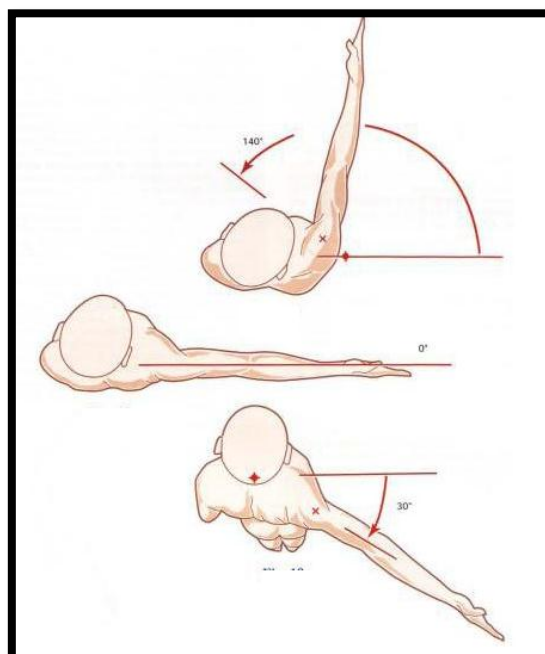


Figura 1.8 Movimiento Flexión – Extensión horizontal [6]

- e) Rotación:** es un movimiento que se lleva a cabo en cualquier posición del espacio y en el eje longitudinal del húmero, adicionalmente se considera

dicho movimiento cuando el codo está en un ángulo de 90° . Se tienen dos tipos de rotaciones: rotación interna y rotación externa. El rango de movimiento de la rotación interna es de 100° , y el rango de la rotación externa es de 40° .

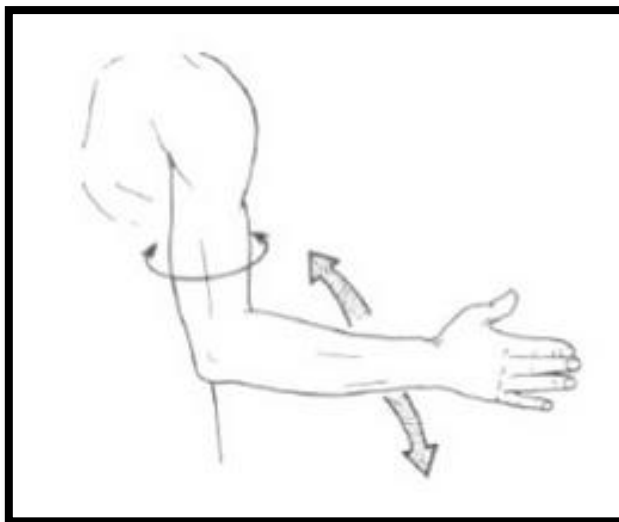


Figura 1.9 Movimiento de Rotación Interna – Externa [5]

1.1.2.2.2 Codo

El movimiento del antebrazo viene dado por el codo, el cual es determinado por las articulaciones húmero – cubital, húmero – radial y radiocubital. Dando origen a cuatro movimientos que se exponen a continuación:

- a) **Flexión:** considerando la posición anatómica inicial, este movimiento se desarrolla en el plano sagital por el bíceps y por las articulaciones húmero-cubital y húmero-radial, su rango de movimiento es de 135° llegando a tocar el hombro.
- b) **Extensión:** al igual que en el movimiento de flexión es un movimiento realizado en el plano sagital por los tríceps y también por las articulaciones húmero – cubital y húmero – radial, al ser una articulación de tipo bisagra su movimiento es nulo o muy poco significativo; en algunas mujeres puede tener un rango de 0° a 5° .

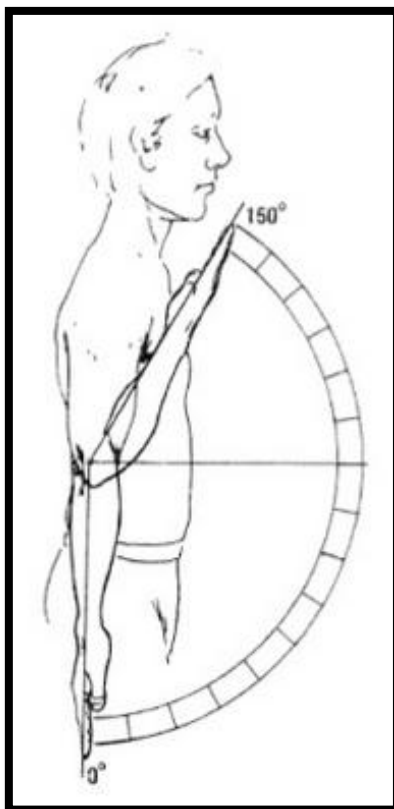


Figura 1.10 Movimiento flexión extensión del codo [5]

- c) **Supinación:** es un movimiento realizado en el plano frontal, y está dado por la articulación radiocubital; su rango de movimiento es de 90°.
- d) **Pronación:** al igual que el movimiento anterior se realiza en el plano frontal, y está dado por la articulación radiocubital; su rango de movimiento es de 90°.

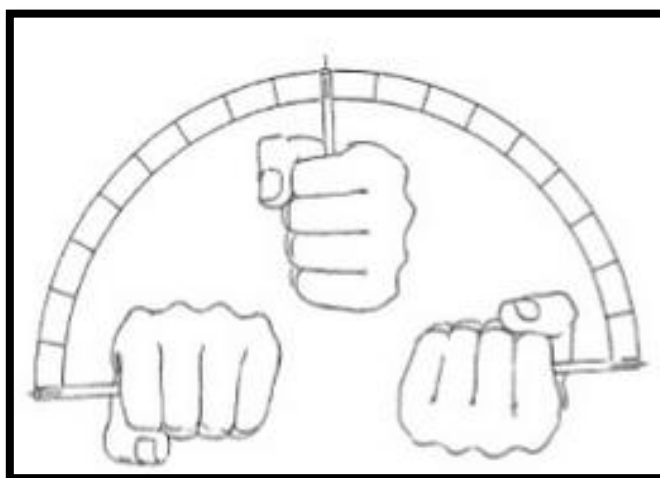


Figura 1.11 Movimiento pronación y supinación [5]

1.1.2.2.3 Muñeca

El movimiento que realiza la mano se basa en la articulación de la muñeca, la misma que se encuentra constituida por el radio, cubito y los huesos que se compone la mano; dando lugar a los siguientes movimientos.

- a) **Flexión – Extensión:** es el movimiento realizado en el eje transversal con un rango angular de 80° para la flexión y 70° para la extensión.

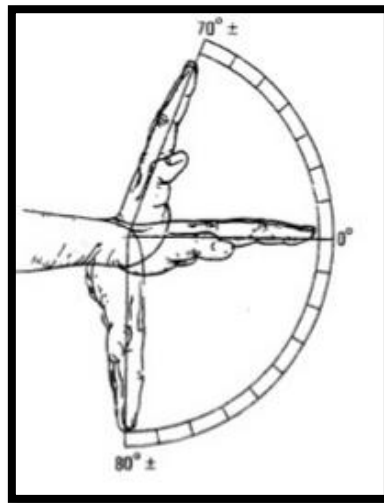


Figura 1.12 Movimiento Flexión – Extensión [5]

- b) **Desviación:** está constituido por dos movimientos: desviación cubital con un rango angular de 30° y desviación radial con un rango angular de 20° .

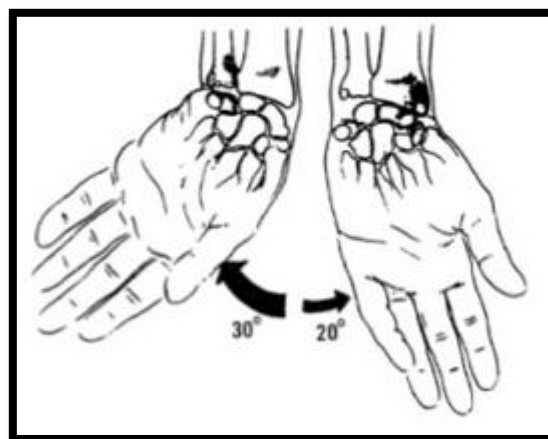


Figura 1.13 Movimiento de desviación [5]

1.2 ROBÓTICA

La robótica viene a ser un campo de estudio enfocado a los robots.

1.2.1 DEFINICIÓN [9]

Puesto que la palabra robot tiene muchas definiciones, se ha optado por un concepto más amplio, mismo que es tomado del Instituto Norteamericano del Robot y de la ISO 8373, que mencionan lo siguiente:

“Un robot es un manipulador reprogramable, multifuncional, controlado automáticamente, que puede estar fijo en un sitio o moverse, y que está diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variables programados para la realización de diversas tareas o trabajos.”

1.2.2 CLASIFICACIÓN [9]

La clasificación presentada se ha realizado en base a los robots desarrollados actualmente:

- **Humanoide:** tiene apariencia humana que pretende emular el comportamiento de un humano [9].

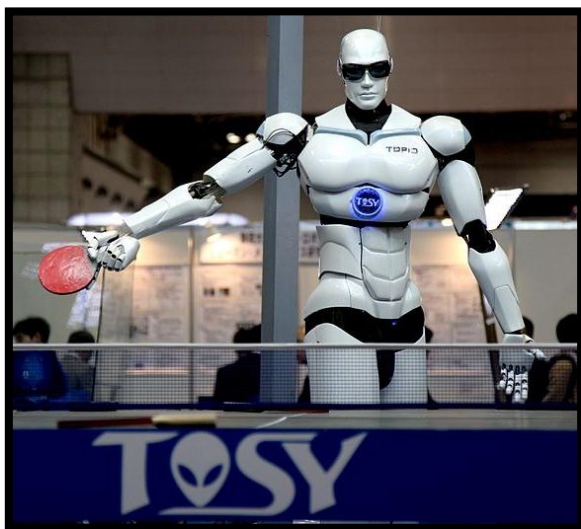


Figura 1.14 Robot humanoide TOPIO “TOSI Ping Pong Playing Robot” [10]

- **Robot móvil:** es un robot acoplado a una superficie móvil que pueden estar provistas de patas, ruedas u orugas que permiten el desplazamiento del robot en conjunto [9] [11].



Figura 1.15 Robot móvil [11]

- **Robot industrial:** es un manipulador creado para la movilización de materiales, herramientas o elementos especiales por medio de movimientos programados que desarrollan actividades de una manera automática [9] [11].



Figura 1.16 Robot industrial [11]

- **Robot inteligente:** tiene la aptitud de movilizarse y operar en ambientes impredecibles ya que dispone de una capacidad de aprendizaje en base a un adecuado sistema de sensores [9].



Figura 1.17 Robot inteligente ASIMO [12]

- **Robot de servicios:** robots móviles o estacionarios que son empleados para trabajar parcial o totalmente con autonomía para desempeñar servicios útiles [9] [13].



Figura 1.18 Robots de servicio [13]

1.3 MANIPULADOR ROBÓTICO [9][14]

En la actualidad los robots industriales en su gran mayoría son brazos mecánicos con un sistema articulado que permite desempeñar actividades específicas, cuyos

desplazamientos han sido pre-programados. En base a la definición de manipulador robótico anteriormente expuesta se puede extraer términos como:

- **Manipulador:** mecanismo firme de varios segmentos y uniones, que está en la capacidad de movilizar objetos en varios grados de libertad.
- **Reprogramable:** dentro de las funciones y movimientos de un manipulador, se pueden reprogramar sin la necesidad de alterar la estructura mecánica del manipulador, haciéndolo de esta manera más flexible.
- **Multifuncional:** se puede adaptar a varias aplicaciones contemplando modificaciones ya sea en la estructura mecánica o en el sistema de control del manipulador.

1.3.1 DEFINICIONES

Para la mejor comprensión de los manipuladores robóticos es necesario definir los siguientes términos empleados en la descripción de este tipo de robots:

1.3.1.1 Eslabón [15]

Cuerpo rígido que conforma la estructura física de un manipulador robótico, básicamente se encuentran separados por articulaciones.

1.3.1.2 Articulación [14] [9]

Es un componente físico que permite la unión entre dos eslabones, permitiendo el movimiento relativo entre dichos eslabones; esencialmente existen dos tipos de articulaciones que genera un grado de libertad: articulación prismática y articulación rotacional:

- **Articulación Prismática (Lineal):** permite el desplazamiento de un eslabón con respecto a otro a lo largo del eje de la articulación.
- **Articulación Rotacional:** posibilita el giro entorno al eje de un eslabón con respecto a otro.

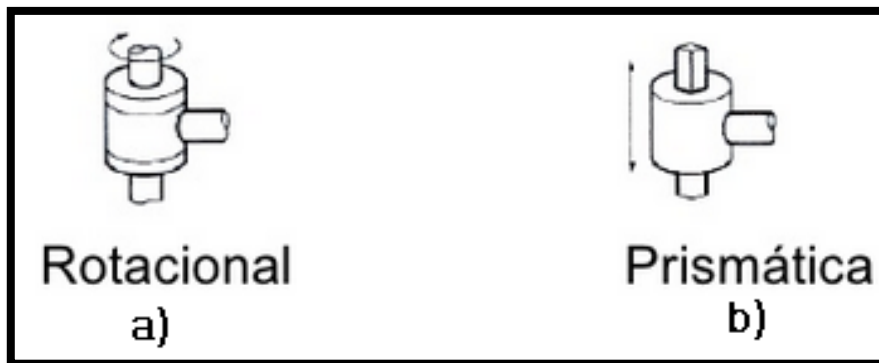


Figura 1.19 a) Articulación Rotacional (1 GL) b) Articulación Prismática (1GL) [14]

Adicionalmente hay articulaciones que permiten obtener dos grados de libertad de las cuales se puede resaltar las articulaciones: cilíndrica y planar. Finalmente se tiene una articulación que en una sola estructura física se puede generar tres movimientos, también conocida como articulación esférica.

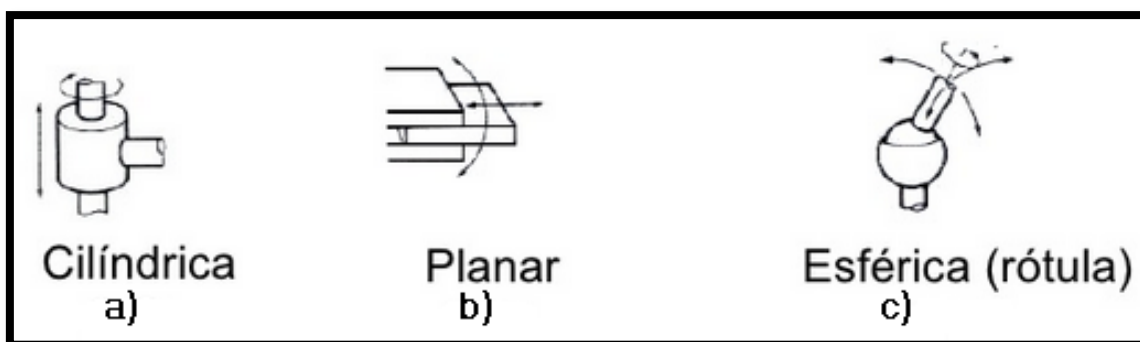


Figura 1.20 a) Articulación Cilíndrica (2 GL) b) Articulación Planar (2GL) c) Articulación Esférica (3GL) [14]

1.3.1.3 Grado de libertad [16]

Está definido como el movimiento independiente que puede realizar cada articulación.

1.3.1.4 Volumen de trabajo [16]

Es el volumen para el desempeño de tareas de un manipulador, mismo que es realizado por su efector final; está confinado en el espacio euclidiano y generalmente se construye con los límites de cada eslabón y cada articulación.

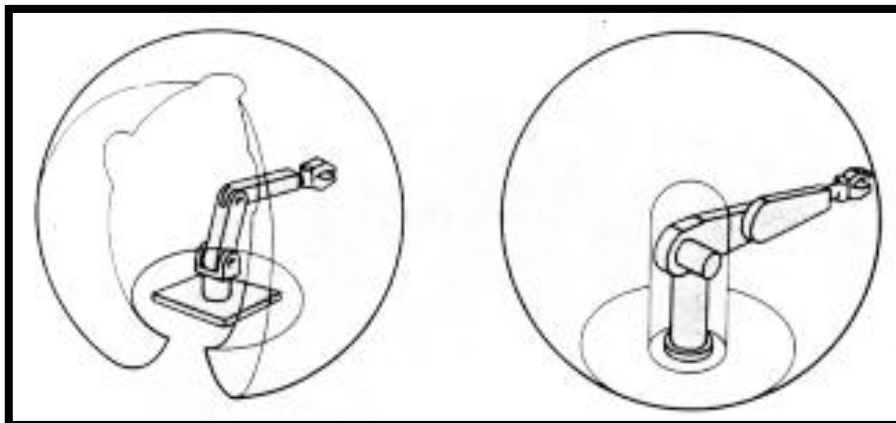


Figura 1.21 Volumen de trabajo de un robot en configuración angular [14]

1.3.1.5 Capacidad de carga [17]

Es el peso que el efector final del manipulador puede transportar, generalmente es un dato proporcionado por el fabricante.

1.3.1.6 Efector final [17] [14]

Es un dispositivo que es ubicado en el extremo del último enlace del manipulador con el objetivo de ponerlo en funcionamiento para desempeñar una tarea específica como por ejemplo el agarre de objetos. Los parámetros fundamentales a considerarse en su diseño son: capacidad de carga, fuerza de agarre, geometría, entre otros.

1.3.2 CONFIGURACIONES CINEMÁTICAS

Un manipulador es considerado como una cadena cinemática constituido por una secuencia de eslabones y articulaciones, en el cual en el último enlace del manipulador generalmente se ubica un efector final cuya orientación y posicionamiento del mismo depende fundamentalmente de la cadena cinemática. Partiendo de lo mencionado actualmente los manipuladores robóticos pueden ser de configuraciones diferentes que son especificadas de acuerdo al tipo de articulación de manipulador [9] [14].

1.3.2.1 Configuración cartesiana

Es un modelo constituido por tres articulaciones prismáticas tienen la característica de tener buena precisión y una velocidad constante en todo su volumen de trabajo, son utilizados para el desplazamiento de cargas voluminosas.

En este tipo de configuración la especificación de posición de un punto en particular se lo hace mediante la utilización de coordenadas cartesianas [9] [14].

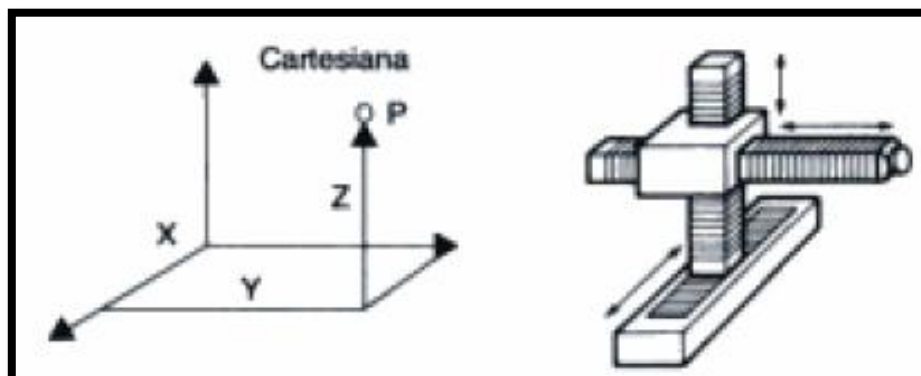


Figura 1.22 Configuración cartesiana [14]

1.3.2.2 Configuración cilíndrica

En esta configuración se tiene un aspecto similar al anterior, ya que sus dos últimas articulaciones son de tipo prismático, y tiene una articulación rotacional en la base cuyo eje es paralelo al eje de la segunda articulación. Su nombre viene de la forma del volumen de trabajo obtenida en esta configuración. Y la posición específica de un punto en particular viene dado en coordenadas cilíndricas [9].

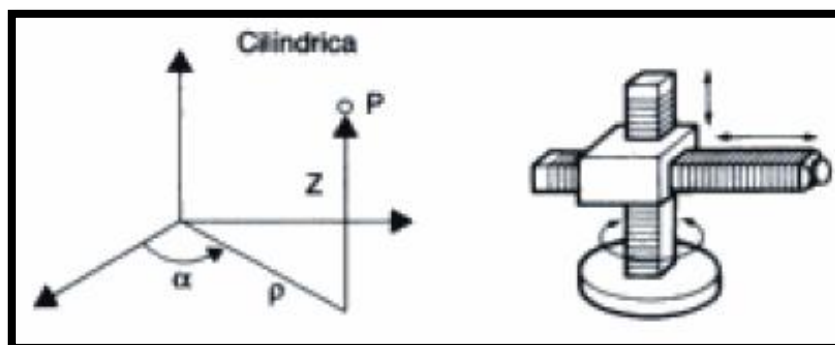


Figura 1.23 Configuración cilíndrica [14]

1.3.2.3 Configuración polar o esférica

Es una configuración variante de la configuración cilíndrica ya que la articulación del medio pasa a ser una articulación de tipo rotacional, por lo que los ejes de las primeras articulaciones son perpendiculares. La forma del volumen de trabajo para esta configuración es un casquete esférico y la ubicación del extremo final viene dado en coordenadas polares [9].

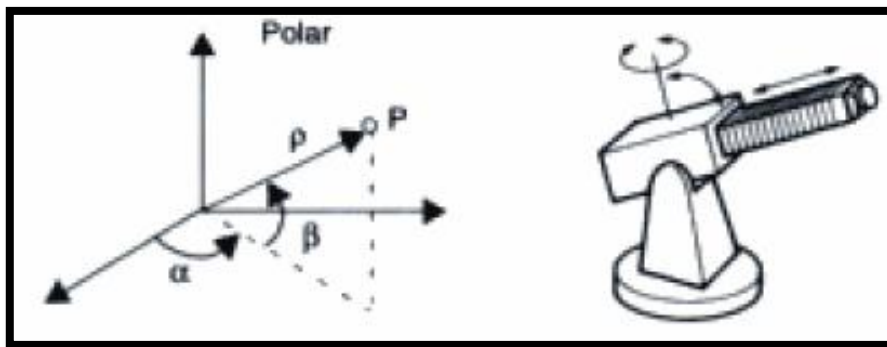


Figura 1.24 Configuración polar [14]

1.3.2.4 Configuración angular o antropomórfica

Al igual que en el caso anterior, se considera a esta configuración como variante de la configuración de la polar ya que la tercera articulación se cambia a una de tipo rotacional cuyo eje es paralelo al eje de la segunda articulación. Esta configuración está caracterizada por su facilidad para efectuar trayectorias complejas, presentar alta maniobrabilidad y permitir el acceso a entornos con obstrucciones. La posición del extremo final viene dada en coordenadas angulares. Un aspecto importante radica en que es de fácil construcción [9] [14].

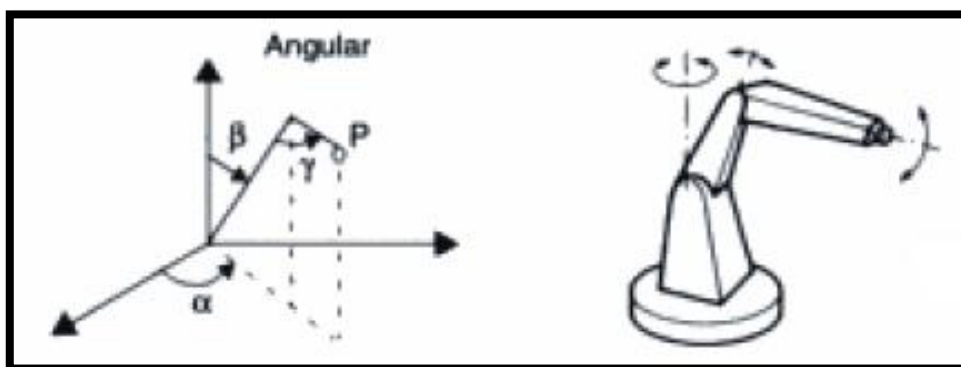


Figura 1.25 Configuración angular [14]

1.4 SISTEMAS FUNCIONALES DE UN MANIPULADOR

Después de que ha sido explicado lo referente a la estructura física de un manipulador robótico, es importante tomar en consideración que un manipulador puede estar diseñado para desarrollar alguna actividad en particular, para lo cual su estructura física requiere de sistemas funcionales que ayudan a efectuar dicha actividad, entre los sistemas más importantes se tienen: el sistema de actuadores que constituye la parte de potencia de un robot, es decir está encargado de

accionar cada articulación del robot para efectuar una acción; el sistema de sensores que está constituido por elementos que permiten conocer parámetros del entorno al robot, logrando que este pueda tomar alguna acción en respuesta de dichos parámetros; sistema de control el cual interactúa con los dos sistemas anteriores para dar mayor confiabilidad en el funcionamiento del manipulador. Estos sistemas han sido considerados en el desarrollo de este proyecto, por lo cual en el desarrollo del presente trabajo se detallará cada parte constituyente de manipulador, orientando a su aplicación en el presente proyecto.

1.4.1 SENSOR [9][18]

Es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que transforma una magnitud física (luz, magnetismo, presión, movimiento entre otras) a un valor medible de dicha magnitud, generalmente a una señal de naturaleza eléctrica. La señal de salida de un sensor es siempre dependiente de las variaciones de la señal física en tratamiento, dicha salida a su vez pasa por un sistema de acondicionamiento con el fin de convertirla en una señal estandarizada capaz de ser adquirida y digitalizada por un sistema microprocesado o un computador, para posteriormente ser parte de un sistema de control. Generalmente un sensor puede estar constituido por elementos pasivos y/o activos.

El enfoque fundamental de éste proyecto hace la utilización de algunos sensores para el funcionamiento del prototipo y control del mismo, por lo que más adelante se detallará los sensores utilizados.

1.4.1.1 Sensor de desplazamiento [9][14]

Este tipo de sensores permiten medir el ángulo o distancia del movimiento de un determinado elemento con respecto a una ubicación definida. Para ello se emplea dos tipos de sensores: los que se basan en el contacto, y aquellos que no tiene contacto.

1.4.1.1.1 Potenciómetro

Son sensores que miden el desplazamiento por efecto de la variación de una resistencia eléctrica y miden desplazamientos lineales o angulares, dando origen a potenciómetros lineales y potenciómetro rotatorios.

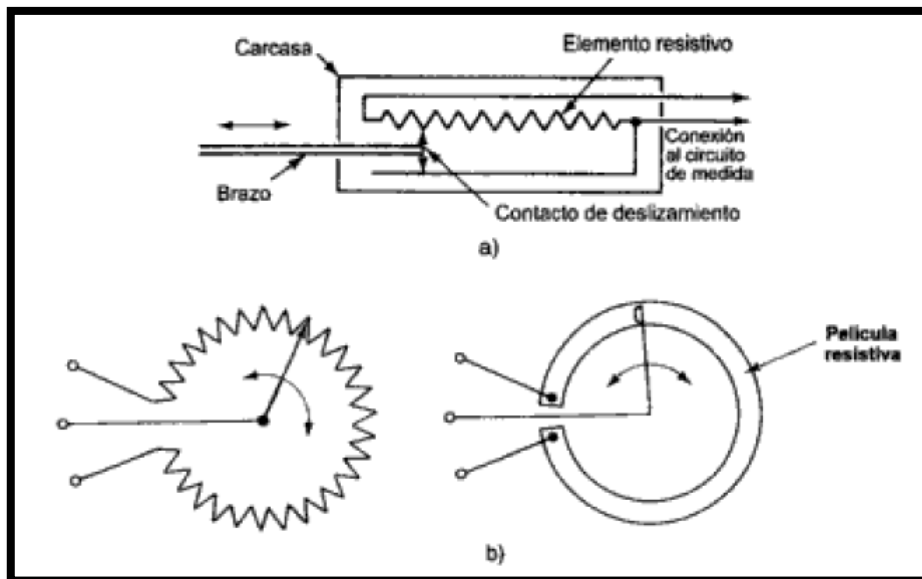


Figura 1.26 Potenciómetro a) Lineal b) Rotatorio [14]

Generalmente estos sensores actúan como divisores de voltaje, ya que al aplicar un voltaje V_e en la resistencia total, se obtiene un voltaje V_s que es proporcional al desplazamiento del contacto móvil (Figura 1.27).

$$L_1 = \frac{R_1 \cdot L_T}{R_T} = \frac{V_s \cdot L_T}{V_e} \quad (1.1)$$

Donde R_T es la resistencia total, R_1 es la resistencia del contacto referente a un extremo, L es la longitud total y L_1 es la longitud de desplazamiento. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado potenciómetros rotatorios, cuya parte móvil es acoplada al eje de movimiento de cada articulación con el objetivo de sensar la posición angular de dicha articulación.

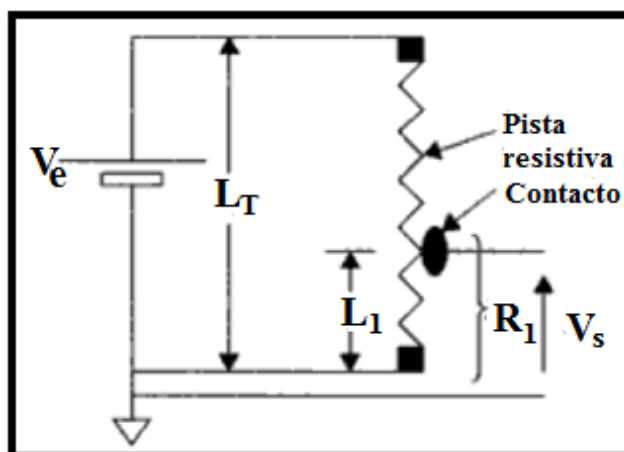


Figura 1.27 Potenciómetro como divisor de voltaje [14]

1.4.1.2 Sensores de presencia o proximidad [9][14]

Son elementos que pueden proporcionar la presencia o proximidad de un objeto situado a una distancia. Su funcionamiento radica en la variación de las propiedades de la señal medida por el sensor a partir de la presencia de algún objeto que se desea detectar.

1.4.1.2.1 Sensor óptico

Dentro de este tipo de sensores se puede encontrar los sensores ópticos tipo barrera y tipo reflexión; en el cual el principio de funcionamiento del tipo barrera se basa en obstaculizar un haz de luz entre un emisor y un receptor; mientras que en el tipo reflexión el principio de funcionamiento se basa en la reflexión de la luz sobre un objeto, generalmente se usan sensores infrarrojos que son sensibles a longitudes de onda inferiores a la luz visible.

El elemento emisor está constituido por un diodo emisor de luz, mientras que el detector emplea foto detectores tales como: foto resistores, fotodiodos o fototransistores.



Figura 1.28 Sensores ópticos

- Sensor reflectivo de objetos QRD1114 [19]

Para el desarrollo de éste proyecto se ha empleado el sensor QRD1114 cuyas características ópticas permiten hacer la medición de los movimientos de la articulación de la muñeca y el movimiento de apertura y cierre de la mano; la utilización de este tipo de sensores en el presente proyecto se la detallará en el Capítulo 2.

El sensor reflectivo QRD1114 es un sensor que está constituido de un diodo emisor de luz infrarroja, y un fototransistor NPN de silicio ubicado en un lado de la

carcasa. El eje de radiación por parte del emisor y el eje de reacción por parte del detector, están perpendiculares a la cara del dispositivo. La respuesta del fototransistor a la radiación del diodo emisor se da solo cuando un objeto con características reflectivas está en el campo de visión del detector.

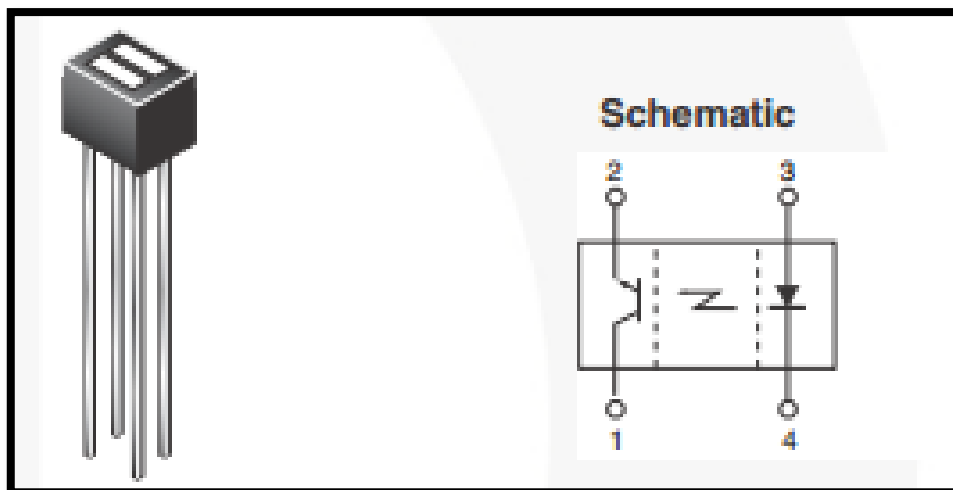


Figura 1.29 Sensor QRD1114 - Esquemático [19]

Distribución de pines:

Pin1: colector.

Pin2: emisor.

Pin3: ánodo.

Pin4: cátodo.

Características:

- Salida transistor.
- Sensado de superficies sin contacto.
- Paquete compacto.
- Desenfocado para sensar de superficies difusas.
- Filtro en el sensor para luz del día.

Especificaciones máximas absolutas

Exceder los valores que están especificados como máximos puede dañar al dispositivo, por lo que no es recomendable trabajar sobre estos valores. Los valores están dados para una temperatura ambiente de $T_A=25^{\circ}\text{C}$.

Emisor:**Tabla 1.1 Características del emisor sensor QRD1114 [19]**

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
IF	Corriente continua directa	50	mA
VR	Voltaje inverso	5	V
PD	Potencia de disipación	100	mW

Detector:**Tabla 1.2 Características del receptor sensor QRD1114 [19]**

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
VCEO	Voltaje colector-emisor	30	V
PD	Potencia de disipación	100	mW

Para más detalle acerca de las características del sensor QRD1114 puede referirse a la referencia [19].

1.4.1.3 Sensores IMU (inertial measurement unit)

Una “Unidad de Medición Inercial” es un elemento electrónico que proporciona información relacionada con la orientación, velocidad angular y aceleraciones lineales (Fuerza de gravedad); generalmente está constituido por una combinación de sensores: acelerómetros, giroscopios y magnetómetros [23] [24].

Acelerómetro: elemento con capacidad de medir fuerzas de aceleraciones, donde estas fuerzas pueden ser: estáticas (Gravedad de la Tierra) o dinámicas (Movimiento o vibración del acelerómetro) [25].

Giroscopio: es un elemento esférico que está montado en un soporte cardánico, de manera que pueda girar en cualquier dirección. Es usado para dar una orientación (desplazamientos de sus ejes), dando la posición referente a un punto de inicio [25].

Magnetómetro: es un dispositivo que mide los campos magnéticos como el de la Tierra, o campos magnéticos inducidos por corrientes eléctricas o materiales ferromagnéticos. Están siendo incluidos en los sensores IMU con el fin de obtener

un mejor rendimiento para la obtención de la orientación dinámica de actitud y de los sistemas de referencia de rumbo [25].

Los sensores IMU son usados en sistemas para guiado inercial como en aeronaves, buques, vehículos, en otros. Una aplicación de la cual se parte para el presente proyecto radica la aplicación de un sensor IMU en la robótica para el seguimiento de los movimientos del cuerpo humano, para lo cual se ha considerado el sensor IMU CHR-UM6 de CH-Robotics, por su versatilidad y sus características las cuales son detalladas a continuación.

- **Sensor IMU CHR-UM6 [26]**

Es un sensor de orientación que tiene la combinación de sensores tales como: giroscopios, acelerómetros, y sensores magnéticos que proporcionan la orientación a una tasa de actualización de 500Hz logrando una buena precisión en sus mediciones. Adicionalmente este sensor tiene la facilidad de conectarse con un GPS para brindar la información de posición, velocidad y curso.

La comunicación con el sensor CHR-UM6 puede ser configurada ya sea por un puerto serial UART (niveles TTL) o un bus SPI, a una velocidad de transmisión de 9600 a 115200 baudios, además permite la configuración de la frecuencia de transmisión de los datos por la UM6 de 20 a 300 HZ.

El sensor IMU dispone de un procesador de 32 bits ARM Cortex utilizado para la estimación de los cuaterniones y ángulos de Euler a mediante un Filtro Extendido de Kalman (EKF), el mismo que emplea los valores de los sensores: giroscopios, acelerómetros y magnetómetros.

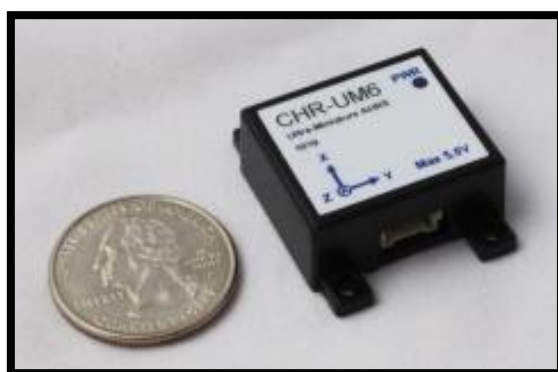


Figura 1.30 Sensor IMU CHR-UM6 [26]

La IMU CHR-UM6 dispone de un sensor de temperatura interno que permite realizar una compensación que disminuye los efectos de desviación de los giroscopios por efecto de la temperatura. El sensor es calibrado de fábrica para eliminar las distorsiones del campo magnético provocadas por metales (materiales ferrosos) presentes en su entorno, pero puede requerir una calibración adicional si el sensor es ubicado en una plataforma fija que contenga materiales ferrosos, dicha calibración puede realizarse con la ayuda de la interfaz de la UM6 proporcionada por el fabricante y disponible en www.poplolu.com.

La UM6 simplifica su integración al disponer de rutinas automáticas de calibración, como la calibración de los magnetómetros, la compensación de desviación de los giroscopios y la compensación de los acelerómetros. Dichas rutinas son ejecutadas mediante el envío de simples comandos al sensor a través de un bus serial SPI o un puerto UART.

Dentro de las salidas proporcionadas por el CHR-UM6 se tiene:

- Ángulos de Euler.
- Cuaterniones.
- Datos puros de los giroscopios, acelerómetros y magnetómetros.
- Datos ya procesados de los giroscopios, acelerómetros y magnetómetros.
- Covarianza de la estimación de actitud.

Características eléctricas:

Tabla 1.3 Características eléctricas del sensor CHR-UM6 [26]

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
Vdd	Voltaje de alimentación	3.5 - 5	V
Idd	Corriente de alimentación	50 - 58	mA
Top	Temperatura de operación	(-)40 a (+)80	°C

Dimensiones del sensor:

- Largo: 27.8mm
- Ancho: 35.6mm
- Altura: 11.5mm

El sensor UM6 dispone de dos puertos de conexiones, un puerto lateral de 4 pines y un puerto de 12 pines ubicado en la parte inferior, para este proyecto ha sido utilizado el puerto de 4 pines con el conector incluido en el sensor, del cual se tiene la siguiente distribución:

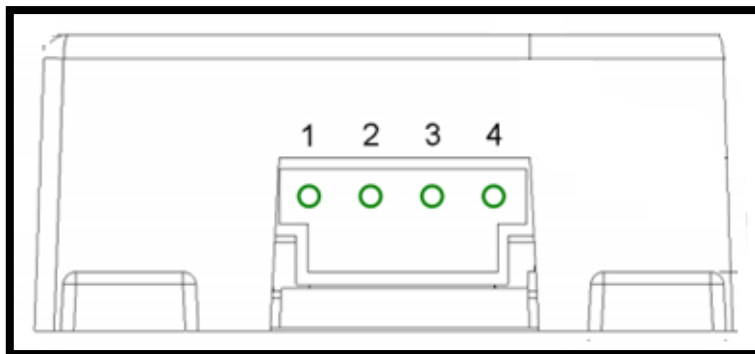


Figura 1.31 Distribución de pines [26]

- 1: Vdd
- 2: GND
- 3: RX
- 4: TX

De acuerdo al manual de usuario, el sensor CHR UM6 viene programado para un envío automático de los datos como por ejemplo los ángulos de Euler.

Desde esta perspectiva fue necesario configurar el sensor para que el envío de datos solo se efectúe cuando se solicite los mismos mediante el envío de comandos al sensor. Otras configuraciones que fueron necesarias están enfocadas en la velocidad de transmisión de datos seriales, y la velocidad de actualización de los datos del sensor. Para la realización de estas configuraciones se hizo uso del software de interface serial de CH-Robotics disponible en [26].

Para hacer uso de este software es importante identificar y establecer el puerto de comunicación, además de la velocidad de transmisión de datos que por defecto es de 115200 baudios, posterior a ello se habilita la conexión con el sensor, con la cual si se establece la comunicación con el mismo, se indicará la versión del firmware del dispositivo (Figura 1.32).

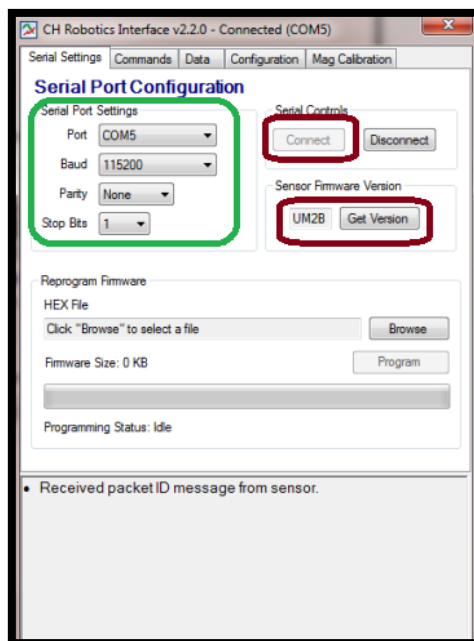


Figura 1.32 Software de interface serial de CH-Robotics

Una vez que se confirma la comunicación con el sensor, se dispone de una pestaña “Configuration”. En la nueva pantalla se puede acceder a las configuraciones actuales del sensor mediante el botón “READ”, dentro del menú desplegado se dispone de una serie de parámetros a ser modificados de los cuales para nuestras necesidades fueron pertinentes de configurar ciertos ítems (Figura 1.33).

Broadcast: permite configurar si los datos del sensor son transmitidos automáticamente o bajo peticiones mediante comandos, que para el prototipo éste parámetro es establecido en 0.

Broadcast rate: facilita la configuración de la velocidad de actualización de los datos del sensor, para mantener una buena estimación de los datos con una buena precisión, este valor es establecido en 255 que permite una velocidad de actualización de 300 Hz.

Baud rate: permite la configuración de la velocidad de transmisión de datos, este valor fue establecido en 4 que especifica una velocidad de 57600 baudios, con la cual se obtuvieron buenos resultados en el funcionamiento del sistema en conjunto.

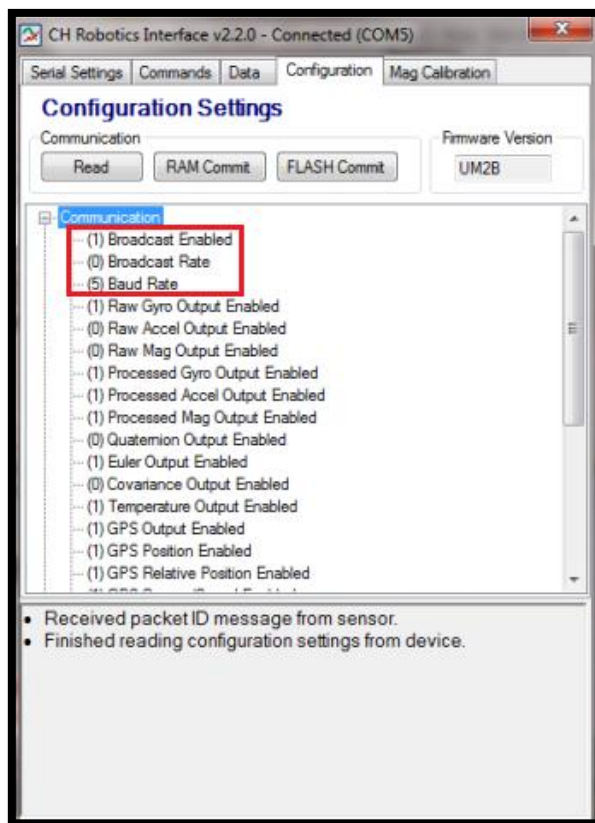


Figura 1.33 Configuración de comunicación

Una vez que son establecidas las configuraciones pertinentes, es importante que esta configuración sea escrita en la memoria Flash del dispositivo, esto con la finalidad que se mantenga la configuración aun si el elemento es desconectado de la alimentación eléctrica.

Para más detalle acerca del sensor IMU CHR-UM6 remítase a la referencia [26].

1.4.2 ACTUADORES [9][14]

Estos elementos son aquellos que a partir de una señal de control generan las fuerzas necesarias para animar o dar movimiento a un mecanismo o articulación.

Los actuadores generalmente emplean tecnología hidráulica, neumática o eléctrica según el tipo de aplicación.

1.4.2.1 Servomotor [20][21][22]

Es un dispositivo de tamaño pequeño cuyo eje es de rendimiento controlado, es decir que se lo puede ubicar en posiciones angulares fijas al enviarle una señal de control codificada.



Figura 1.34 servomotor [20]

Un servomotor está constituido por un motor eléctrico de corriente continua, un conjunto de engranajes que elevan el torque a costa de reducir la velocidad, y un sistema de control que mediante la utilización de un potenciómetro acoplado directamente al eje del servomotor sensa constantemente la posición del eje con el fin que el controlador mantenga el eje en la posición establecida por la señal de control externa, es decir si el eje está en la posición indicada el motor estará apagado, mientras que si el eje difiere de la posición el controlador encenderá el motor en la dirección correspondiente hasta que el eje llegue a dicha posición.

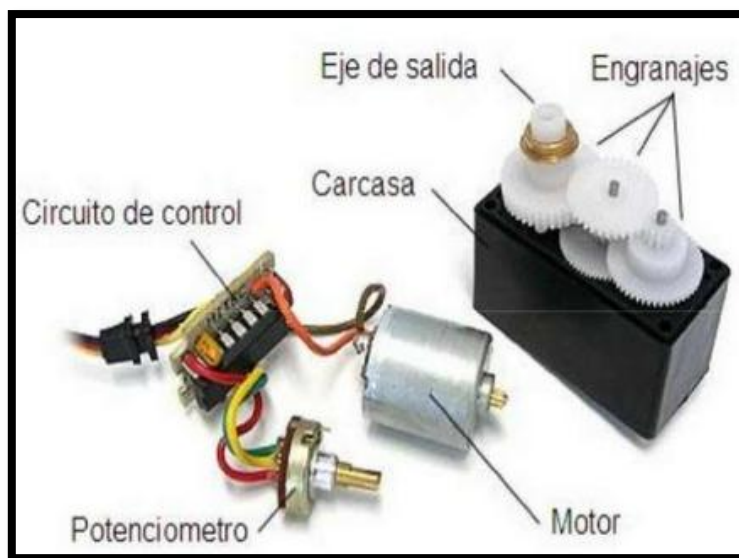


Figura 1.35 partes de un servomotor [22]

La señal de control codificada es una PWM (Pulse Width Modulation), que se manifiesta como una onda cuadrada cuyo pulso en nivel alto es variante, manteniendo el período que generalmente en los servomotores es 20ms.

La variación de la señal PWM generalmente esta entre 0,5ms a 2,1ms posicionando al eje del servomotor normalmente en un rango de 0 a 180° tal como se muestra en la Figura 1.36. Estos valores pueden variar de acuerdo al fabricante.

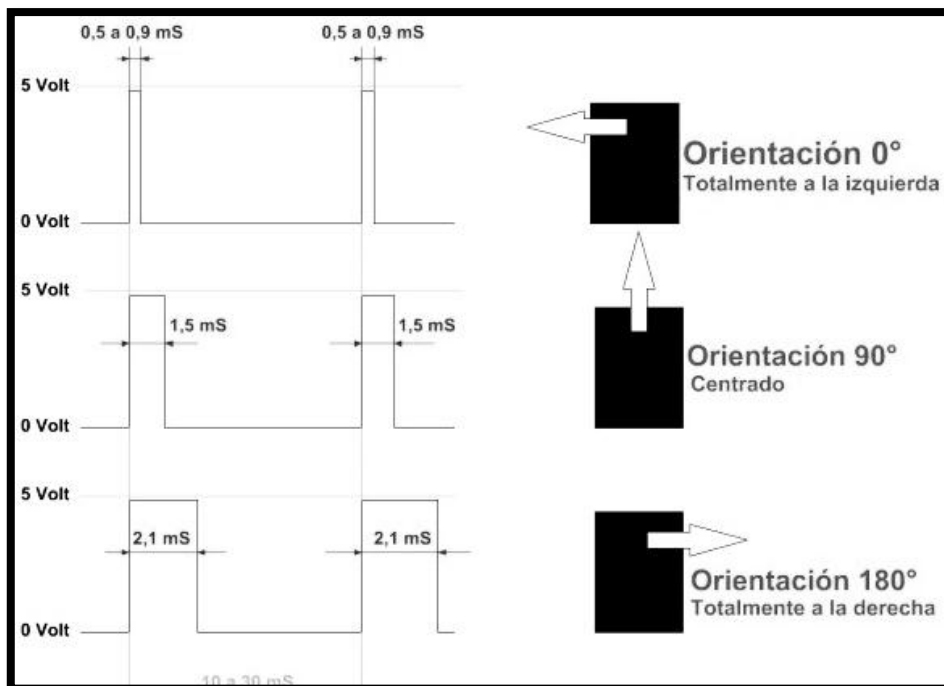


Figura 1.36 posición del eje del servomotor [20]

El voltaje de alimentación de los servomotores está entre 4,8 y 6V, pero puede variar de acuerdo al fabricante. Los servomotores constan de tres cables, donde dos son de alimentación de voltaje, y el tercer cable es utilizado para la señal de control codificada; estos cables están generalmente dados por colores que varían de acuerdo al fabricante. En la Figura 1.37 se presenta el código de colores de los servomotores empleados en el proyecto.

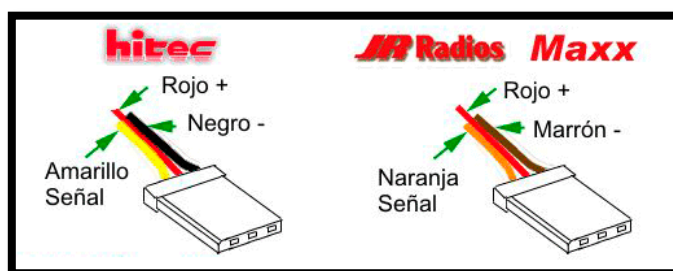


Figura 1.37 Codificación de colores para servomotor [20]

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DE LOS SISTEMAS ROBÓTICO Y BRAZALES

En el presente capítulo se explican los aspectos más relevantes en cuanto al hardware del sistema en conjunto, por lo que se detalla: el ensamble completo del brazo robótico, el diseño y construcción de la estructura soporte para el robot, diseño e implementación del sistema de brazales y guante, finalmente se presenta el diseño e implementación del hardware electrónico para el sistema en conjunto.

2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO

El hardware empleado para el ensamblaje del sistema está conformado de piezas de manipuladores comerciales con la finalidad de construir un brazo robótico tipo antropomórfico (angular) de 5 grados de libertad y con articulaciones de tipo rotacional, adicionalmente el robot ha sido proporcionado de un efector final tipo garra con el fin de dar la función de agarre al sistema robótico (movimiento de apertura y cierre de la mano robótica).

Cada una de las partes constituyentes del sistema, fueron seleccionadas en función de las necesidades del proyecto con el fin de conseguir movimientos similares a los realizados por un brazo humano; además se ha considerado el tipo de material de las piezas con el objeto que del brazo robótico implementado sea lo más liviano posible.

2.1.1 PARTES DEL SISTEMA ROBÓTICO [28]

2.1.1.1 Base para rotación

Es una base ideal para la rotación de masas considerables; de acuerdo con el fabricante la base soporta 10 libras de peso sin ninguna dificultad.

Está constituida por una base fija donde se dispone un compartimiento para la ubicación de un servomotor, una plataforma móvil que va directamente acoplada

al eje del servomotor, y cinco rodamientos tipo esfera que reducen la fricción entre la plataforma y la base fija.



Figura 2.1 Base para rotación

Tabla 2.1 Especificaciones de la base para rotación.

Fabricante	Lynxmotion
Material	Plástico ABS
Modelo	BR-NS
Diámetro superior	3.688"
Diámetro inferior	3.875"
Altura	1.875"

2.1.1.2 Soporte multipropósito para servomotor

Se trata de un soporte para un servomotor de tamaño estándar, idóneo para la unión de ejes en el ensamble de brazos y piernas robóticas.

Tabla 2.2 Especificaciones del soporte multipropósito.

Fabricante	Lynxmotion
Material	Aluminio adonizado
Modelo	ASB-04 & ASB-24



Figura 2.2 Soporte multipropósito

2.1.1.3 Soporte largo “C” para servomotor

Es un soporte de tipo “C” largo, diseñado para su uso con el soporte multipropósito en prestaciones de servo-bisagra para el ensamble de brazos y piernas robóticas.

Además incorpora un rodamiento de bolas para mejorar el movimiento en un eje evitando el desgaste de las piezas inmiscuidas. Está diseñado para trabajar con servomotores de tamaño estándar.



Figura 2.3 Soporte tipo “C” largo

Tabla 2.3 Especificaciones del soporte largo tipo “C” (con rodamiento).

Fabricante	Lynxmotion
Material	Aluminio adonizado
Modelo	ASB-10
Largo	51 mm
Ancho	24 mm
Altura	57 mm

2.1.1.4 Soporte para servo “C” (Sin rodamiento de bolas)

Soporte de tipo “C” diseñado para su uso con el soporte multipropósito en prestaciones de servo-bisagra para el ensamble de brazos y piernas robóticas. Está diseñado para trabajar con servos de tamaño estándar.



Figura 2.4 Soporte tipo “C”

Tabla 2.4 Especificaciones del soporte tipo “C”.

Fabricante	Lynxmotion
Material	Aluminio adonizado
Modelo	ASB-03
Largo	51 mm
Ancho	24 mm
Altura	40 mm

2.1.1.5 Soporte conector tipo “L”

Soporte diseñado para la fijación de un soporte tipo “C” a un soporte multipropósito, también puede ser usado en otras configuraciones robóticas.

Tabla 2.5 Especificaciones del soporte “L”.

Fabricante	Lynxmotion
Material	Aluminio adonizado
Modelo	ASB-06



Figura 2.5 Soporte tipo “L”

2.1.1.6 Mano robótica

Kit diseñado para un humanoide bípedo o para aplicaciones donde es requerido un agarre de objetos. El kit puede ser usado para ensamblar una mano derecha o izquierda. En el presente proyecto ha sido utilizado como efector final del brazo robótico con el fin de dar una función de agarre de objetos.

Tabla 2.6 Especificaciones de la mano robótica.

Fabricante	Lynxmotion
Material	LEXAN
Modelo	RH-01



Figura 2.6 Mano robótica

2.1.2 ENSAMBLE DEL SISTEMA ROBÓTICO.

En los siguientes puntos se muestra el ensamble del brazo robótico considerando una articulación por ítem.

2.1.2.1 Ensamble articulación 1 (hombro)

Para que el brazo robótico realice su movimiento de flexión vertical, se ha utilizado el kit de base de rotación y un servomotor, los mismos que conforman la base principal donde ha sido asentado el brazo robótico.



Figura 2.7 Kit para el ensamble de la articulación 1

El servomotor de tamaño estándar es ubicado en la base fija donde se tiene un compartimiento para la ubicación del mismo. La plataforma va acoplada directamente al eje del servomotor y finalmente fueron ubicados los rodamientos incluidos en el kit, con el objeto de que haya estabilización de movimiento entre la plataforma y la base fija logrando además reducir la fricción.

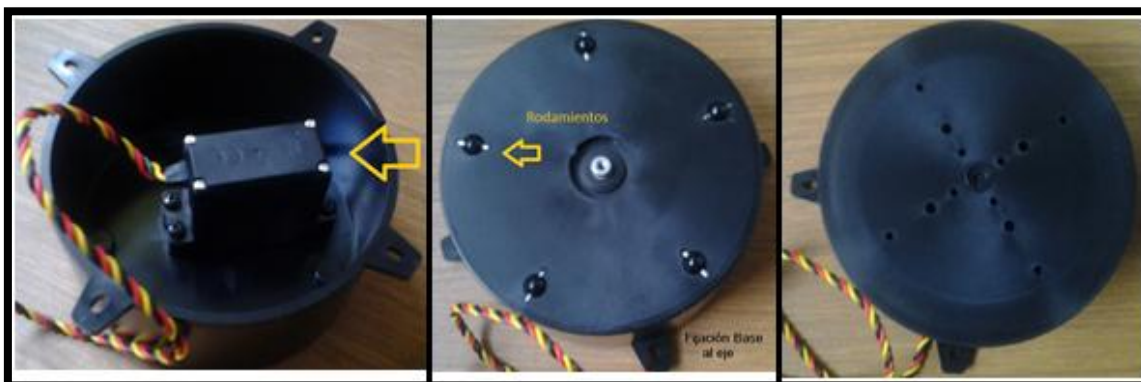


Figura 2.8 Ensamble de la articulación 1

2.1.2.2 Ensamble articulación 2 (hombro)

Para el movimiento de abducción requerido por el robot, se ha hecho uso de las piezas: soporte multipropósito, soporte tipo C y un servomotor de tamaño estándar.



Figura 2.9 Kit ensamble articulación 2

El soporte multifunción fija el servomotor a la plataforma de la base, y el soporte tipo C va acoplada al eje del servomotor haciendo uso del rodamiento incluido en el kit que ayuda a mejora la estabilidad del giro.



Figura 2.10 Ensamble articulación 2

2.1.2.3 Ensamble articulación 3 (Brazo)

El movimiento de rotación interna y el de rotación externa se ha conseguido con la utilización de las piezas: soporte multipropósito, un servomotor de tamaño estándar y un soporte tipo C.



Figura 2.11 Kit ensamble articulación 3

El soporte multipropósito asienta el servomotor a la estructura robótica ensamblada, y el soporte tipo C es fijado en el eje del servomotor permitiendo el movimiento de rotación para el brazo robótico.

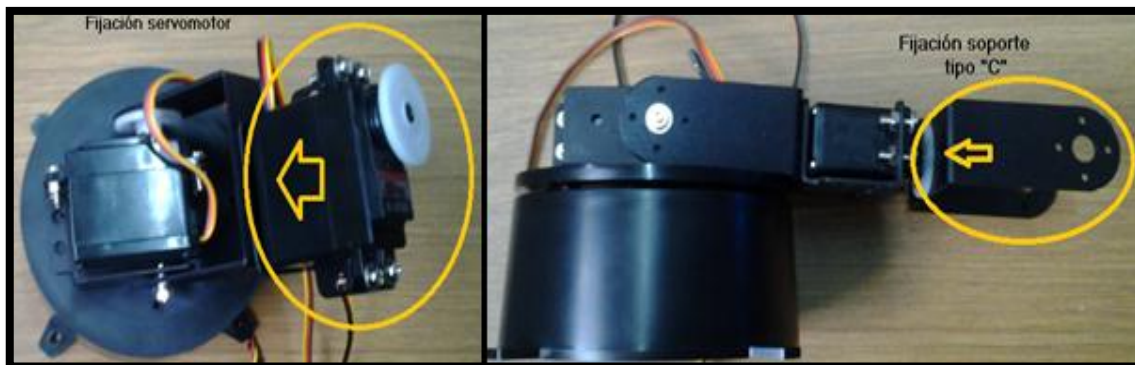


Figura 2.12 Ensamble articulación 3

2.1.2.4 Ensamble articulación 4 (Codo)

El movimiento de flexión y extensión para la articulación del codo ha sido obtenido con el uso de las piezas: soporte multipropósito, acople tipo L, soporte tipo C y un servomotor tipo estándar.



Figura 2.13 Kit ensamble articulación 4

Cada una de las piezas mencionadas en este punto, se ensamblaron de manera que se forme el antebrazo del robot, en el mismo se ha fijado el servomotor que permite el movimiento del codo.

El antebrazo se acopla al brazo ensamblado por medio del eje del servomotor empleando el rodamiento incluido en el kit para tener mayor estabilidad del movimiento.

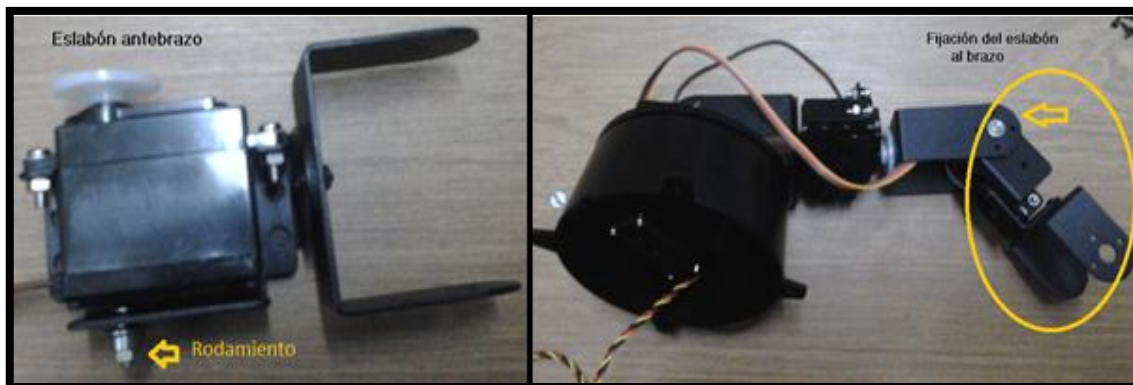


Figura 2.14 Ensamble articulación 4

2.1.2.5 Ensamble articulación 5 (muñeca)

El movimiento de flexión y extensión, así como el de apertura y cierre de la mano del efector final de este proyecto se ha conseguido con la utilización de un kit de una mano robótica comercial, y dos servomotores. El efector final ha sido fijado al antebrazo del robot.



Figura 2.15 Kit ensamble articulación 5 (Efector final)

El Kit de la mano robótica ha sido diseñado para realizar dos movimientos: el primer movimiento radica en la flexión y extensión de la mano, mientras que el segundo movimiento permite la apertura y cierre de la mano dotando al robot la función de agarre de objetos. La mano robótica se acopla al antebrazo del robot por medio del eje de primer servomotor y de la misma manera que en los casos

anteriores se emplea un rodamiento incluido en el kit, con el fin de tener un movimiento estable.

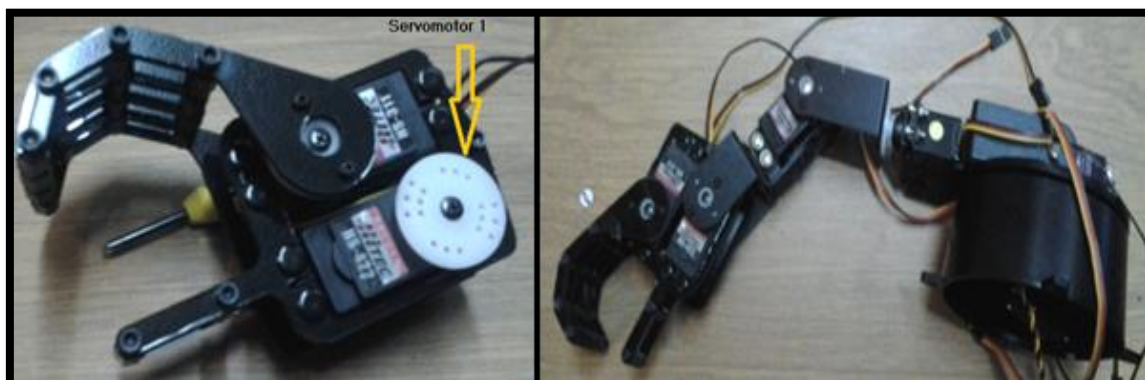


Figura 2.16 Ensamble Articulación 5

2.1.3 ENSAMBLAJE DE LA ESTRUCTURA SOPORTE

Debido a la necesidad de un soporte para que el brazo robótico realice sus movimientos en el espacio, se ha diseñado una estructura soporte, el cual ha considerado dos aspectos importantes que se mencionan a continuación:

- **Dimensiones del brazo robótico:** se ha tomado en cuenta la longitud máxima del brazo robótico, es decir cuando éste está completamente extendido, esto ha permitido determinar la altura que debe tener la estructura soporte para evitar que el brazo robótico impacte con la superficie donde se acentúe todo el sistema.

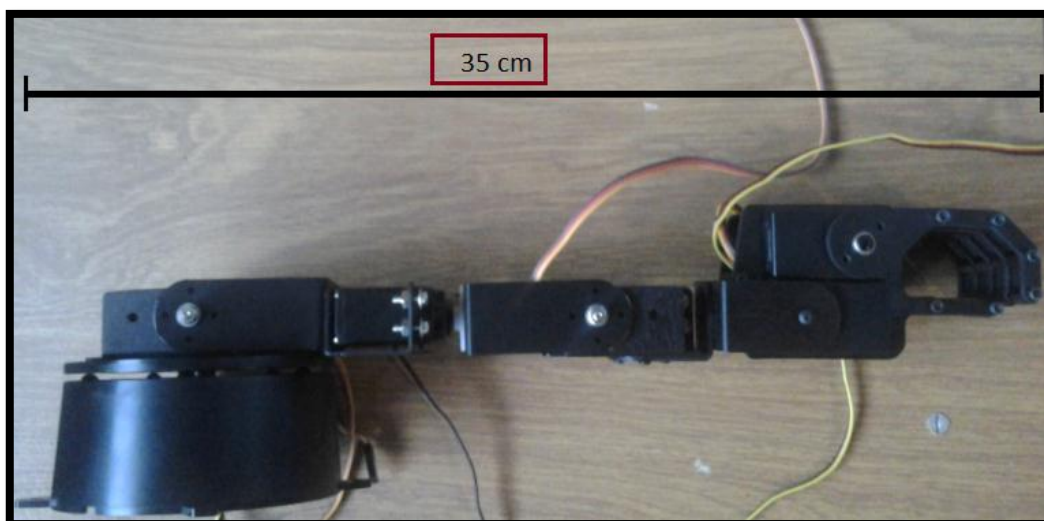


Figura 2.17 Longitud del brazo robótico extendido (35 cm)

- **Área de trabajo:** ya que el proyecto se ha enfocado en la emulación de los movimientos del brazo humano, la estructura soporte se asemeja a la contextura torácica superior del cuerpo humano, lo que ha permitido al robot tipo antropomórfico efectuar una amplia gama de movimientos en el espacio euclidiano de manera similar a los movimientos de un brazo humano.

De las consideraciones expuestas también se ha tomado en cuenta su diseño con la finalidad de alojar toda la circuitería necesaria para el funcionamiento del robot, siendo necesario que la estructura sea un sólido hueco con una tapa lateral desmontable.

Para la estabilidad de la estructura se ha construido una plataforma en la cual ha sido fijada la estructura soporte como se muestra en la Figura 2.18.

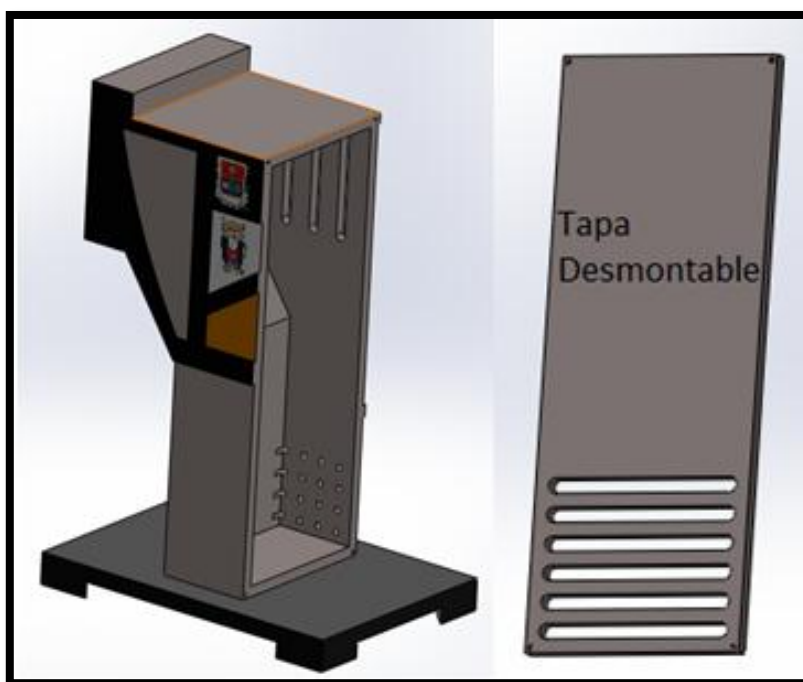


Figura 2.18 Diseño de la Estructura Soporte

Para la construcción de la estructura soporte, se ha utilizado los siguientes materiales:

- **Tablero de fibra de densidad media (MDF) 10mm:** utilizado para la parte frontal, posterior e inferior de la estructura.

- **Madera triplex de 4mm:** empleado para las tapas laterales y tapa superior de la estructura.
- **Tablero de fibra de densidad media (MDF) 20mm:** utilizado para la superficie base de la estructura.
- **Masilla para madera:** se ha adherido masilla a la estructura para la fijación de piezas y dar detalles a la estructura.

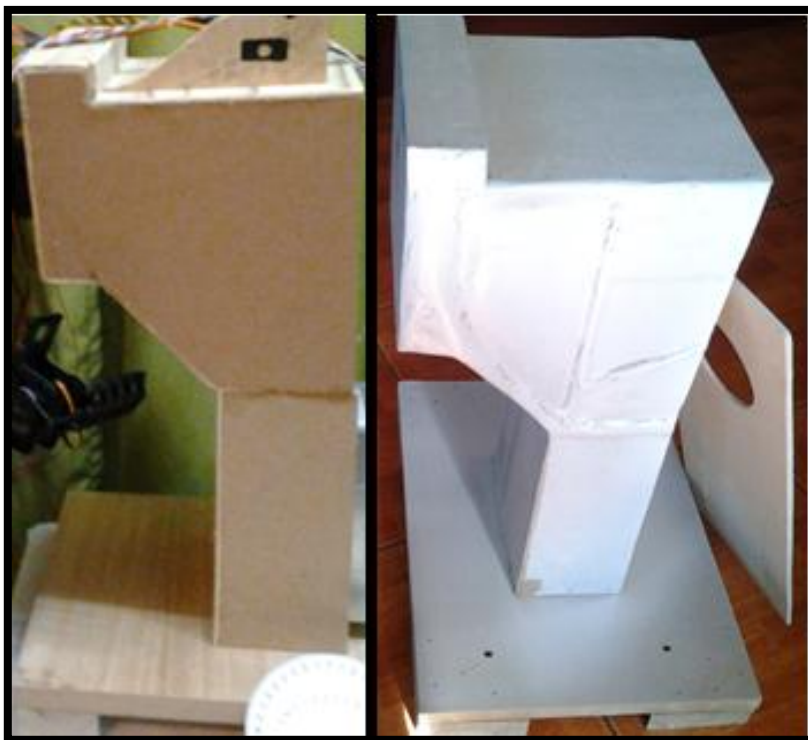


Figura 2.19 Estructura Soporte fabricada

Dado que la estructura soporte también es utilizada como alojamiento para la circuitería del sistema robótico, fue necesario considerar un sistema de ventilación para evacuar el calor que se puede generar en el interior de la estructura por efecto del calentamiento de los elementos electrónicos, para lo cual se han hecho aberturas en la cara posterior y lateral derecha de la estructura para el ingreso del aire externo, además de una perforación de 75 mm de diámetro en la parte superior de la tapa desmontable (lateral derecha) para la fijación de un ventilador, el mismo que se encarga de evacuar el aire caliente generado en el interior de la estructura. En adición en la cara posterior de la estructura se han realizado aberturas pertinentes para la conexión del cable de poder, los cables de

comunicación del sistema en conjunto con el computador y además una abertura para la conexión del sistema de brazos con el sistema robótico.

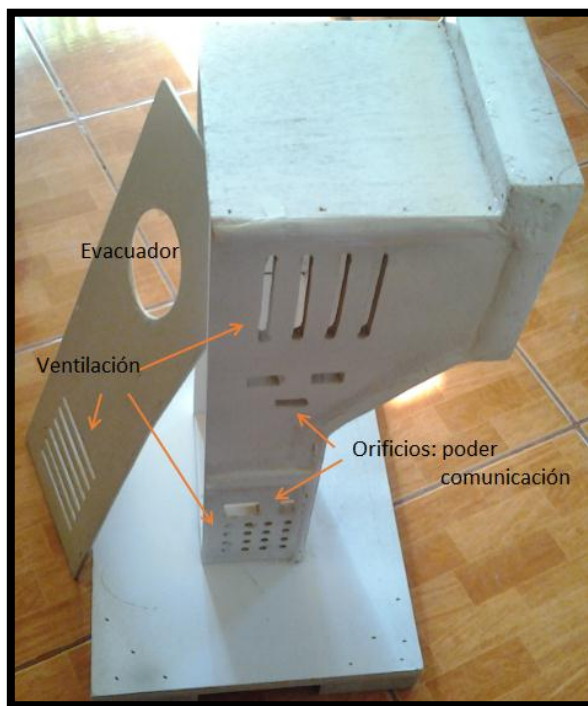


Figura 2.20 Aberturas de los sistemas de ventilación y comunicación

Para el acabado de la estructura se empleó pintura en spray ideal para madera de varios colores (blanca, gris, negra, plateada y dorada), que ha permitido resaltar la estética del sistema robótico tal como se puede ver en la Figura 2.21.



a)



b)

c)

d)

e)

Figura 2.21 a) Estructura en proceso de pintado b) Cara frontal c) Cara lateral derecha d) Cara posterior e) Cara lateral izquierda

2.1.4 ACOPLAMIENTO BRAZO ROBÓTICO-ESTRUCTURA SOPORTE

El brazo robótico ensamblado fue acoplado en la parte lateral izquierda de la estructura soporte como se puede apreciar en la Figura 2.22.

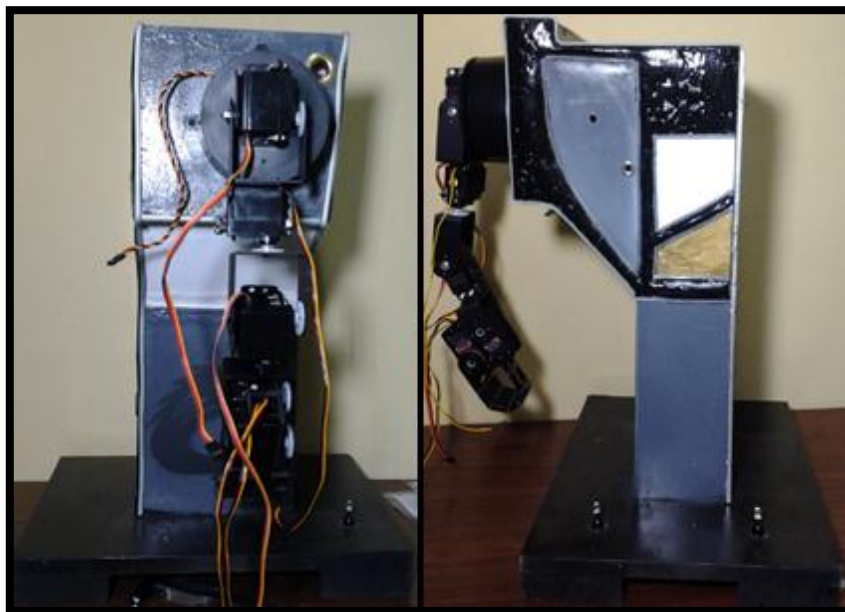


Figura 2.22 Sistema robótico final

2.1.5 SERVOMOTORES UTILIZADOS

Los servomotores que han sido empleados para el ensamble del brazo robótico son de tamaño estándar ya que las piezas del robot son específicamente para ese tamaño de servomotores. Por otro lado fue considerado el torque requerido de acuerdo a las dimensiones y peso de los eslabones, incluyendo el peso de los

actuadores del robot con el fin de que los servomotores tengan la capacidad para lograr los movimientos requeridos por este proyecto. Definiendo al torque como una fuerza que es aplicada a un brazo de palanca de forma que tienda a hacer girar alrededor de un eje, se tiene: [29]

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia} \quad (2.1)$$

Donde la fuerza viene dado por el peso de cada eslabón, incluyendo el peso de los actuadores inmiscuidos en dicho eslabón. El torque vendría dado por la multiplicación del peso y la distancia de cada eslabón (ecuación 2.1).

Se ha considerado que el peso de un eslabón está concentrado en el centro de gravedad, que geoméricamente se aproxima a la mitad de la longitud total del eslabón. Además fue contemplado que el torque máximo desarrollado por cada actuador del brazo robótico se da cuando el mismo está ubicado a 90° de la posición anatómica inicial. En la Figura 2.23 se muestra el sistema robótico replicado pieza a pieza en el software SOLIDWORKS, donde se identifican los eslabones y articulaciones constituyentes del sistema robótico con el propósito de tener visualmente referido cada elemento para el dimensionamiento de cada actuador que es detallado a continuación.

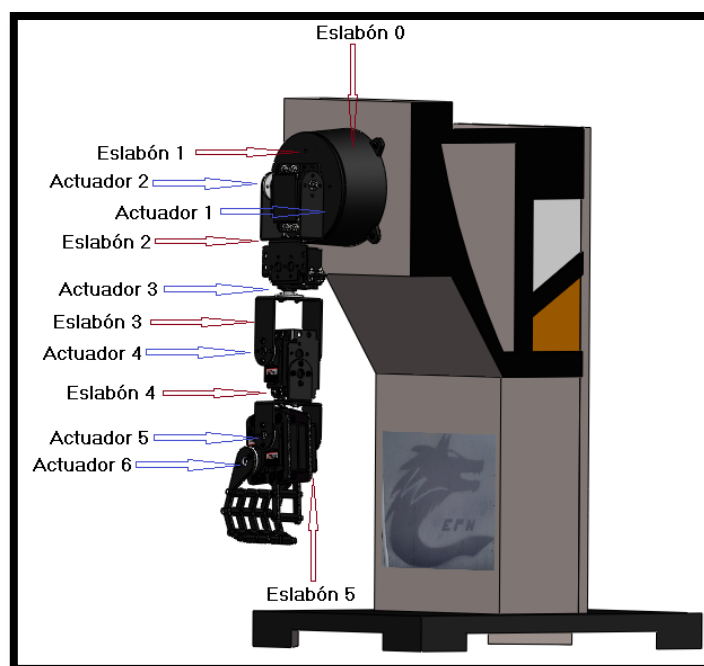


Figura 2.23 Distribución de eslabones y actuadores del sistema robótico

2.1.5.1 Servomotor para la articulación 1

Dado que el movimiento de la articulación 1 (actuador 1) moviliza los eslabones 1, 2, 3, 4 y 5 del brazo robótico, el dimensionamiento del actuador 1 está ligado tanto al peso de los eslabones mencionados, como al peso de los actuadores inmiscuidos (2, 3, 4, 5 y 6) y la distancia de todo el brazo (posición extendida del brazo).

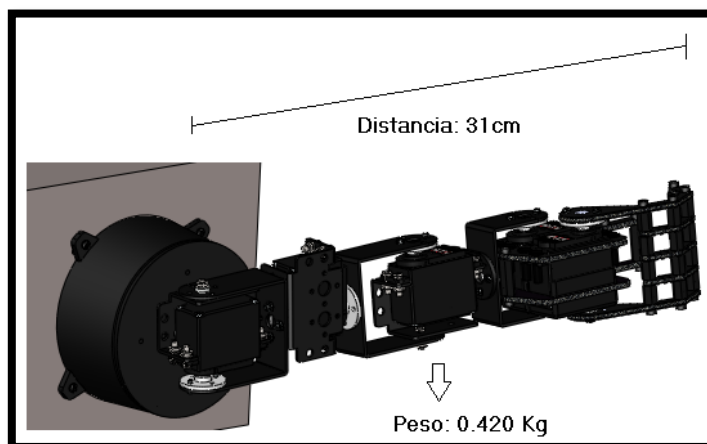


Figura 2.24 Parámetros para el dimensionamiento del actuador 1

Partiendo de la ecuación 2.1 se tiene:

$$(\text{Actuador 1}): \quad \text{Torque} = \frac{31 \text{ cm}}{2} \times 0.420 \text{ Kg}$$

$$(\text{Actuador 1}): \quad \text{Torque} = 6.51 \text{ Kg.cm}$$

Con este valor de torque requerido, se ha empleado el servomotor HS-645 MG cuyas características se presentan en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7: Características del servomotor HS-645MG.

Fabricante	HITEC	
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	4.8-6 voltios	
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C	
Ancho de banda muerta	8us	
Tipo de motor	3 polos de ferrita	
Longitud del cable	300 mm	
Dimensiones	40.6x19.8x37.8 mm	
Tipo de engranajes	3 engranajes de metal y 1 engranaje metálico de resina	
Peso	55.2 g	
	4.8V	6V

Torque	7.7 Kg.cm	9.6Kg.cm
Corriente	8.8mA/libre y 350mA/sin carga	9.1mA/libre y 450mA/sin carga
Velocidad	0.24sec/60° sin carga	0.20sec/60° sin carga

2.1.5.2 Servomotor para la articulación 2

El movimiento la articulación 2 (actuador 2) moviliza los eslabones 2, 3, 4 y 5 del sistema robótico, para lo cual el dimensionamiento del actuador 2 ha tomado en consideración el peso de los eslabones mencionados, el peso de los actuadores involucrados (3, 4, 5 y 6) y la distancia comprendida por los eslabones 2, 3, 4 y 5.

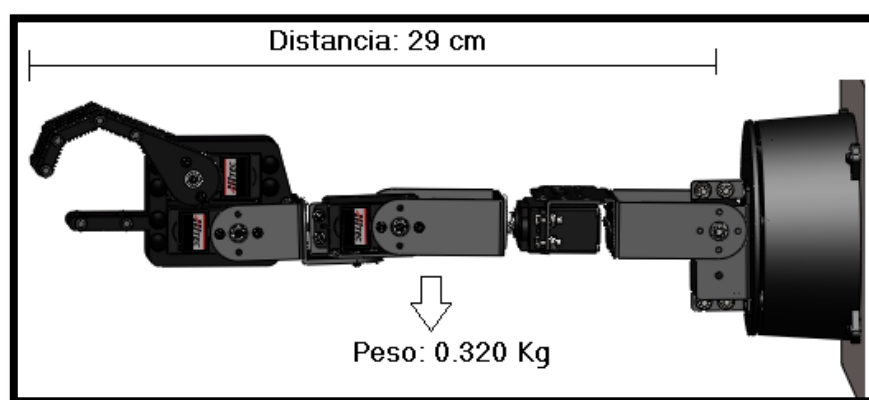


Figura 2.25 Parámetros para el dimensionamiento del actuador 2

Empleando la ecuación 2.1 se tiene:

$$(Actuador 2): \quad Torque = \frac{29 \text{ cm}}{2} \times 0.320 \text{ Kg}$$

$$(Actuador 2): \quad Torque = 4.64 \text{ Kg.cm}$$

De acuerdo al valor del torque requerido se ha utilizado el servomotor MG996R cuyas características se exponen en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8: Características del servomotor MG996R.

Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	4.8 - 7.2 voltios	
Ancho de banda muerta	5us	
Tipo de engranajes	Metal	
Temperatura de trabajo	0 a 55°C	
Dimensiones	40.7x19.7x42.9 mm	
Peso	55.2 g	
	4.8V	6V

Torque	9.4 Kg.cm	11 Kg.cm
Velocidad	0.17sec/60° sin carga	0.14sec/60° sin carga

2.1.5.3 Servomotor para la articulación 3

El movimiento provisto por la articulación 3 (actuador 3) moviliza los eslabones 3, 4 y 5 del brazo robótico, por lo que para el dimensionamiento del actuador 3 se ha tomado en consideración tanto el peso de dichos eslabones como el peso actuadores inmiscuidos (4, 5 y 6) y además la distancia constituida por los eslabones mencionados.

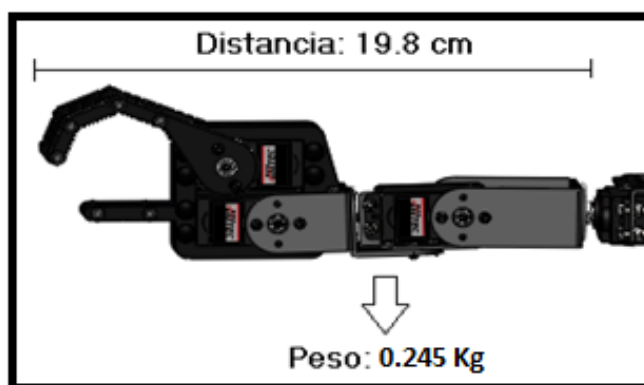


Figura 2.26 Parámetros para el dimensionamiento del actuador 3

Utilizando la expresión 2.1 se tiene:

$$(Actuador 3): \quad Torque = \frac{19.8 \text{ cm}}{2} \times 0.245 \text{ Kg}$$

$$(Actuador 3): \quad Torque = 2.42 \text{ Kg.cm}$$

Dado el torque requerido se ha hecho uso del servomotor HS-485HB cuyas características se exhiben en la Tabla 2.9:

Tabla 2.9: Características del servomotor HS-485HB.

Fabricante	HITEC
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)
Voltaje de operación	4.8 - 6 voltios
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C
Ancho de banda muerta	8us
Tipo de motor	3 polos de ferrita
Longitud del cable	300 mm
Dimensiones	39.9x19.8x37.8 mm
Tipo de engranajes	Engranajes de Karbonite

Peso	45 g	
	4.8V	6V
Torque	4.8 Kg.cm	6.0 Kg.cm
Corriente	8mA/libre y 150mA/sin carga	8.8mA/libre y 180mA/sin carga
Velocidad	0.22sec/60° sin carga	0.18sec/60° sin carga

2.1.5.4 Servomotor para la articulación 4

Para el movimiento de la articulación 4 (actuador 4), misma que moviliza los eslabones 4 y 5 del brazo robótico, se ha considerado el peso de los eslabones mencionados y también el peso de los actuadores inmiscuidos (4, 5 y 6); además la distancia de los eslabones considerados parte del antebrazo y mano.

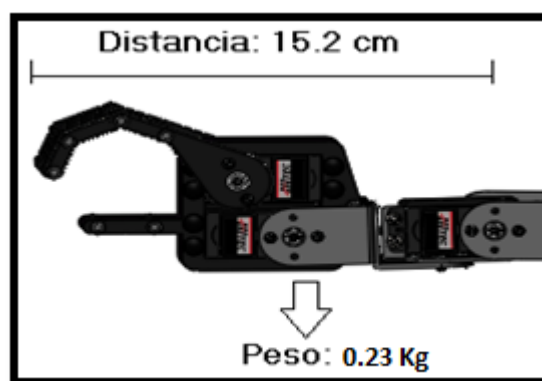


Figura 2.27 Parámetros para el dimensionamiento del actuador 4

Basándose en la ecuación 2.1 se tiene:

$$(Actuador\ 4): \quad Torque = \frac{15.2\ cm}{2} \times 0.230Kg$$

$$(Actuador\ 4): \quad Torque\ 1.748\ Kg.cm$$

De acuerdo al torque requerido para el actuador 4 se ha empleado el servomotor MG996RG cuyas características se exponen en la Tabla 2.8.

2.1.5.5 Servomotor para la articulación 5

Como no fue objetivo de este proyecto el levantamiento de objetos, el actuador 5 utilizado para el movimiento de la articulación 5 (muñeca) es el HS-311, que es ideal para el kit Mano robótica y además recomendado por el fabricante Lynxmotion. Las características de este servomotor utilizado se presentan en la Tabla 2.10:

Tabla 2.10: Características del servomotor HS-311MG.

Fabricante	HITEC	
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	4.8 - 6 voltios	
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C	
Ancho de banda muerta	5us	
Tipo de motor	Cepillo de núcleo metálico	
Longitud del cable	300 mm	
Dimensiones	39.9x19.8x36.3 mm	
Tipo de engranajes	Engranajes de Nyon	
Peso	43 g	
	4.8V	6V
Torque	3 Kg.cm	3.7 Kg.cm
Corriente	7.4mA/libre y 160mA/sin carga	7.7mA/libre y 180mA/sin carga
Velocidad	0.19sec/60° sin carga	0.15sec/60° sin carga

2.1.5.6 Servomotor para la apertura y cierre de la mano robótica

Por recomendación del fabricante se ha utilizado el servomotor HS-311, mismo que permite la apertura y cierre de la mano robótica brindando una acción de agarre al efector final del robot. Las características del servomotor se presentan en la Tabla 2.10.

2.1.6 CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBÓTICO

De acuerdo con todos los puntos expuestos anteriormente, el brazo implementado posee las características que están expuestas en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Características del robot.

Tipo de Robot	Antropomórfico
Tipo de Articulaciones	Rotacionales
Tipo de actuadores	Servomotores de tamaño estándar
Naturaleza de Actuadores	Eléctrica
Material estructura robótica	Aluminio adonizado
Material estructura soporte	MDF y tabla triplex
Peso estructura robótica	525g (sin estructura soporte)
Tipo del efector final	Tipo garra de material LEXAN
Grados de libertad	5 + apertura-cierre de la mano
Alcance horizontal	21.5 cm

2.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

En este proyecto se ha buscado hacer el control del sistema robótico mediante sensores ubicados en la extremidad superior de un individuo por medio de un sistema de brazales, con la finalidad que el sistema robótico pueda emular en gran mayoría los movimientos realizados por el individuo. Puesto que surge la necesidad de procesar datos tanto de la estructura robótica como del sistema de brazales, se optó por hacer uso de un sistema de control individual, dando origen a: el sistema electrónico del robot y el sistema electrónico de brazales, los cuales están constituidos por otros módulos. En la Figura 2.28, se presenta la arquitectura del sistema en conjunto, donde se puede distinguir los dos sistemas antes mencionados.

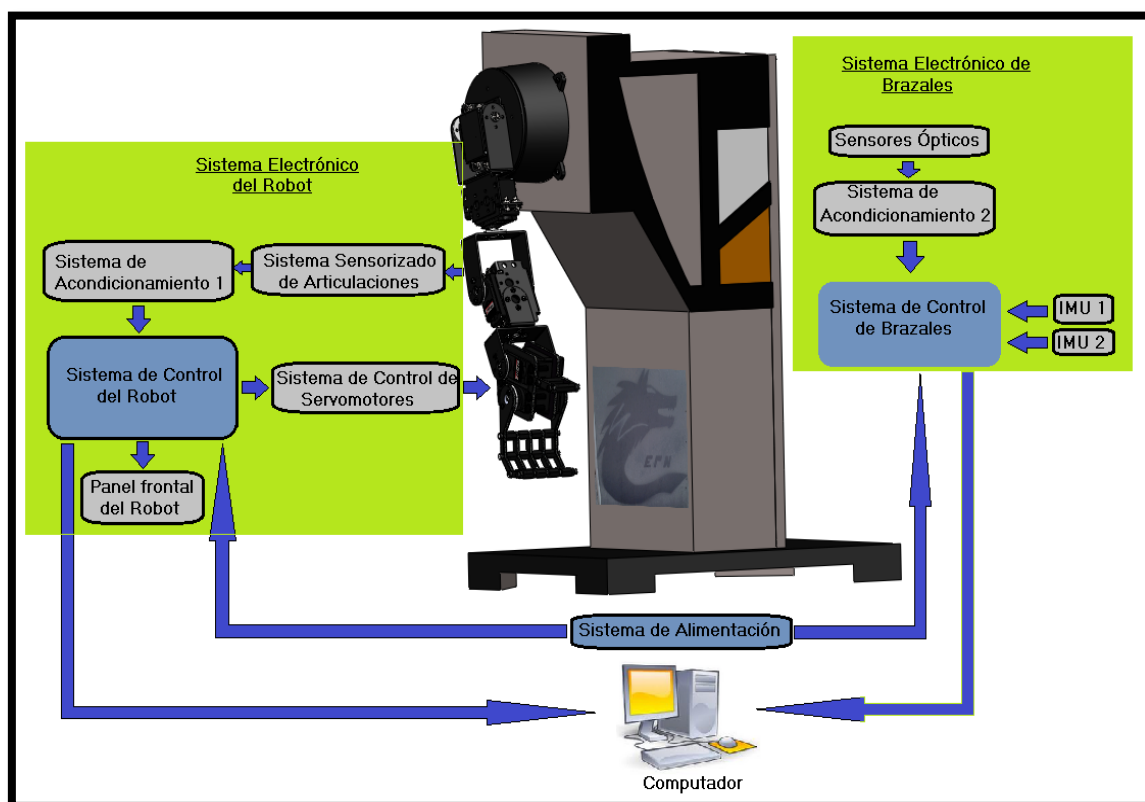


Figura 2.28 Arquitectura del sistema de control en conjunto

Cada uno de estos dos sistemas se comunica vía un bus serial con un computador donde se tiene el HMI del control principal, el mismo que se detalla en el Capítulo 3.

2.2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Un aspecto muy relevante dentro del diseño eléctrico y electrónico de este proyecto, radica en la fuente de alimentación requerida por el sistema, para lo cual se ha considerado los siguientes aspectos:

- **Sistemas de control:** dentro de los sistema de control, encontramos: el sistema sensorizado de articulaciones, microcontroladores, LCD, indicadores LED, sensores ópticos, sensores IMU y circuitos digitales (HD74LS151, MAX 232); cada uno de estos sistemas tienen su rango de voltaje especificado por el fabricante; con la finalidad de que todos trabajen en un valor adecuado y fijo, se optó por tomar como voltaje de alimentación de 5V (V1) para todos los sistemas de control, enfocándose que el diseño de los sistema tengan un mínimo consumo de corriente.
- **Sistema de potencia:** el sistema que requiere un considerable consumo de energía, está dado por el sistema de servomotores del robot. Puesto que el sistema robótico hace uso de 6 servomotores, dentro de los cuales se tienen servomotores de alto torque, se pudo comprobar que se requería de una corriente superior a los 5A en posiciones en las cuales los servomotores estaban exigidos a dar un alto torque, como es en el caso de la flexión del brazo en 90°. El voltaje adecuado para el funcionamiento de los servomotores se estableció en los 5V (V2) con un consumo de corriente considerable.

Dado el requerimiento de corriente por parte de los servomotores es alto, se ha hecho uso de una fuente de poder de computador, ya que por cuestiones de tiempo y dinero fue más fiable hacer uso de la misma; además que posee filtros y reguladores que permiten obtener voltajes estables a su salida. La fuente de poder usada para alimentar el sistema es la PX-400W Ver.2.03 (Figura 2.29) cuyas características se presentan en Tabla 2.12:

Tabla 2.12 Especificaciones Fuente de Poder.

Voltaje de entrada	115V 60Hz
Corriente de entrada	8A
Corriente: Salida DC +5V (cable rojo)	40A

Corriente: Salida DC +3.3V (cable naranja)	14A
Corriente: Salida DC +12V (cable amarillo)	14A
Corriente: Salida DC -12V (cable azul)	0.8A
Corriente: Salida DC -5V (cable blanco)	0.5A
Corriente: Salida DC +5VSB (cable morado)	2A
Encendido digital de la fuente	Cable Verde
Ventilador	12V



Figura 2.29 Fuente de poder utilizada

Para el voltaje de alimentación del sistema de potencia (servomotores) se ha hecho uso del cable rojo de la fuente, mismo que provee el voltaje de 5 voltios establecido anteriormente (V2) y tiene una capacidad de salida de corriente de 14A que es un valor suficiente para solventar la necesidad de corriente requerida por todos los servomotores. De igual forma fue establecido el voltaje fijo de 5V (V1) para el funcionamiento de los sistemas de control, en este caso se ha evitado usar la misma salida de voltaje usada para el sistema de potencia, esto con el fin de evitar que el ruido eléctrico producido por los servomotores interfiera en el funcionamiento de los circuitos microprocesados. Desde ese punto de vista se hace uso de la salida 5VSB (voltage stand by), voltaje que siempre está activo cuando la fuente de poder está conectada a la red eléctrica; una particularidad del voltaje activo en los computadores es alimentar el sistema electrónico que permite el encendido de la fuente y por ende del mismo computador [30]. Puesto que el cable verde al conectarlo a GND activa todas las salidas de voltaje de la fuente de

poder entre ellas la salida de voltaje para el sistema de potencia, se ha diseñado un sistema de encendido electrónico similar al de los computadores. El diseño parte del hecho de que el sistema microcontrolado está constantemente alimentado por la salida 5VSB de la fuente de poder, y bajo la acción de una señal externa (pulsador 1) se active un elemento tipo interruptor (transistor TIP110 NPN) que permite el arranque de la fuente de poder. El diagrama de conexiones del sistema de encendido diseñado puede verse en la Figura 2.30, donde se puede visualizar el uso de $R1=10K\Omega$ en la base del transistor cuya función es limitar la corriente de base y asegurar que el transistor trabaje en corte y saturación; $R2=10\Omega$ que limita la corriente de colector y ayudar a la conmutación del cable verde y GND consiguiendo el encendido electrónico de la fuente.

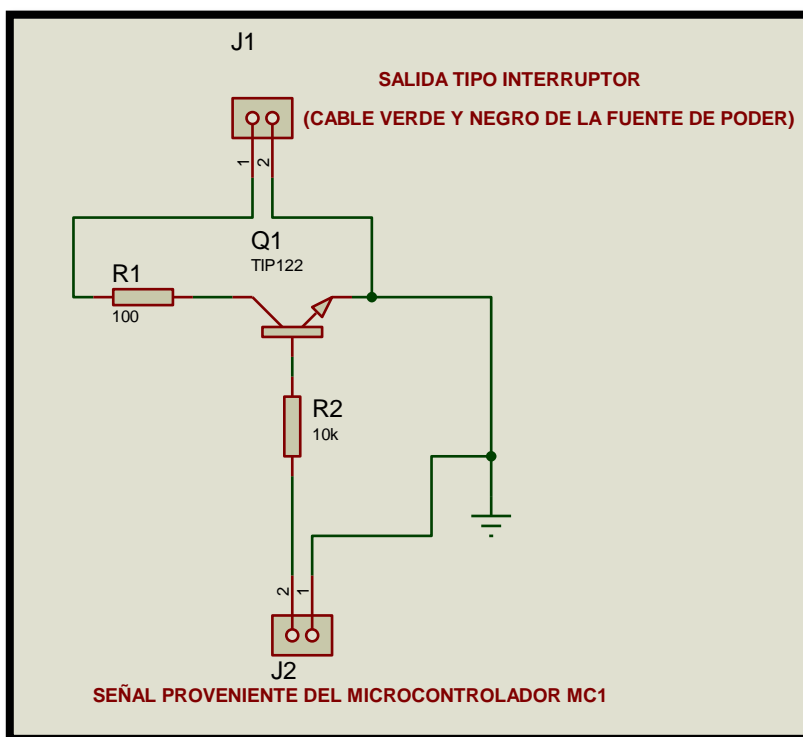


Figura 2.30 Diagrama del sistema de encendido electrónico

V1: voltaje de alimentación de 5V para sistemas de control (cables: morado y negro).

V2: voltaje de alimentación de 5V para el sistema de potencia (cables: rojo y negro).

La señal que activa el transistor es proporcionada por el PIN PB.1 del MC1. Para ver la placa diseñada e implementada remítase al Anexo A.

2.2.2 SISTEMA ELECTRÓNICO DEL ROBOT

En este apartado se detalla el diseño e implementación de los sistemas electrónicos tales como: sistema de sensado, sistema de acondicionamiento 1, panel frontal, sistema de control de servomotores y el sistema microprocesado para el control del robot (microcontrolador 1), mismos que en conjunto gobiernan el control del brazo robótico con la finalidad de cumplir con los requisitos planteados en este proyecto que radica en el control en tiempo real y control realimentado.

2.2.2.1 Sistema sensorizado

En este proyecto el sistema sensorizado tiene como objetivo fundamental medir la posición angular de cada articulación, cuya información es tratada y utilizada posteriormente para tener un sistema en lazo cerrado. Para sensar la posición angular se ha hecho uso de potenciómetros rotatorios que son sensores de desplazamiento y están directamente acoplados a los ejes de giro de cada articulación. Los servomotores empleados tienen un componente (potenciómetro) que sensa directamente el movimiento del eje del servomotor con el fin de hacer su control interno. Con el afán de evitar el uso de hardware en exceso, se hizo uso de este componente propio del servomotor, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Se ha desmontado cuidadosamente la tapa posterior del servomotor, para poder determinar los terminales del potenciómetro interno.

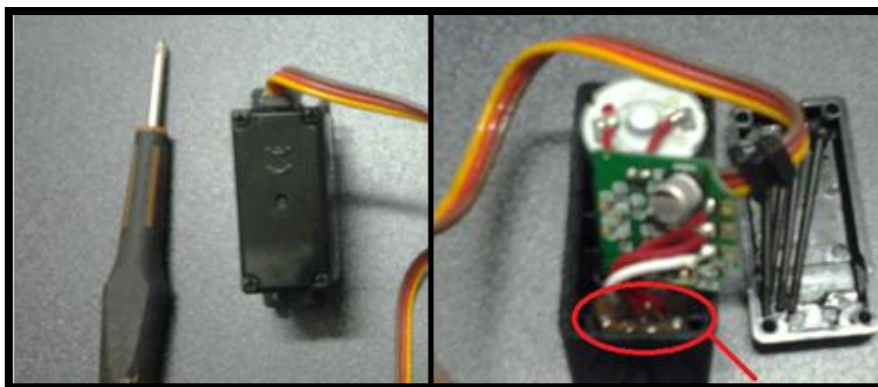


Figura 2.31 Desmontaje de tapa posterior del servomotor

- Posteriormente fue verificado el terminal donde existe la variación de voltaje por efecto de la variación del eje del servomotor, para ello se hizo uso de un multímetro digital.

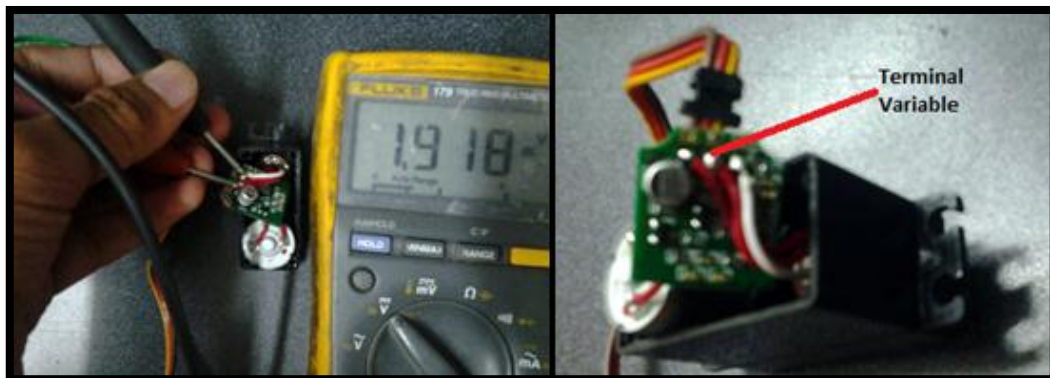


Figura 2.32 Identificación del terminal voltaje variable

- Finalmente fue soldado un cable flexible al terminal de voltaje variable que ha permitido disponer dicha señal variable para hacer uso de la misma.

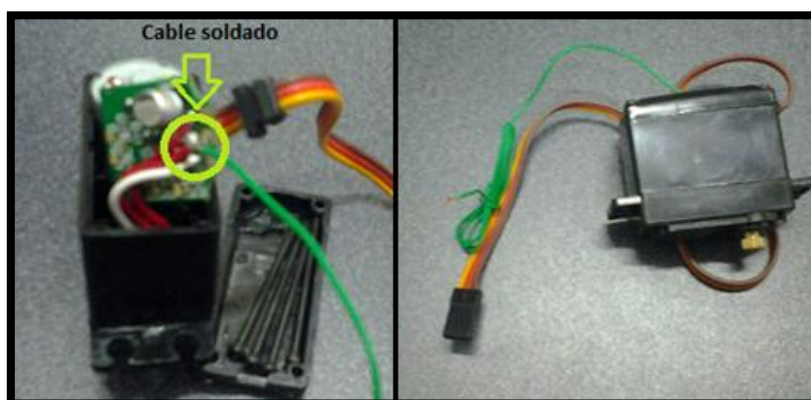


Figura 2.33 Fijación del cable al terminal

El voltaje variable es medido con respecto al terminal GND del servomotor, eso evita hacer uso de un cable adicional como referencia de dicho voltaje. Esta técnica fue aplicada a los servomotores que corresponden a las articulaciones 3, 4, 5 y 6. En las articulaciones 1 y 2 se ha utilizado potenciómetros que fueron acoplados a los ejes correspondientes. Tal como se describe a continuación:

Para medir la posición angular de la articulación 1, se ha hecho uso de un potenciómetro de 100K, material de reciclaje y una banda dentada Figura 2.34-a. El uso de la banda dentada tuvo el propósito de implementar un sistema de 2 engranes, el primer engrane consistió en adherir la banda dentada a la plataforma

móvil de la base robótica de rotación (Figura 2.34-b) y el segundo engranaje está constituido por material reciclado al cual se le fue adherido la banda dentada (Figura 2.34-c). El potenciómetro ha sido fijado en una estructura soporte hecha de material reciclado como se muestra en la Figura 2.34-d. Finalmente el engrane 2 fue ubicado en el eje del potenciómetro (Figura 2.34-e) de modo que con el movimiento de la plataforma de la base robótica se pueda medir los desplazamientos angulares.

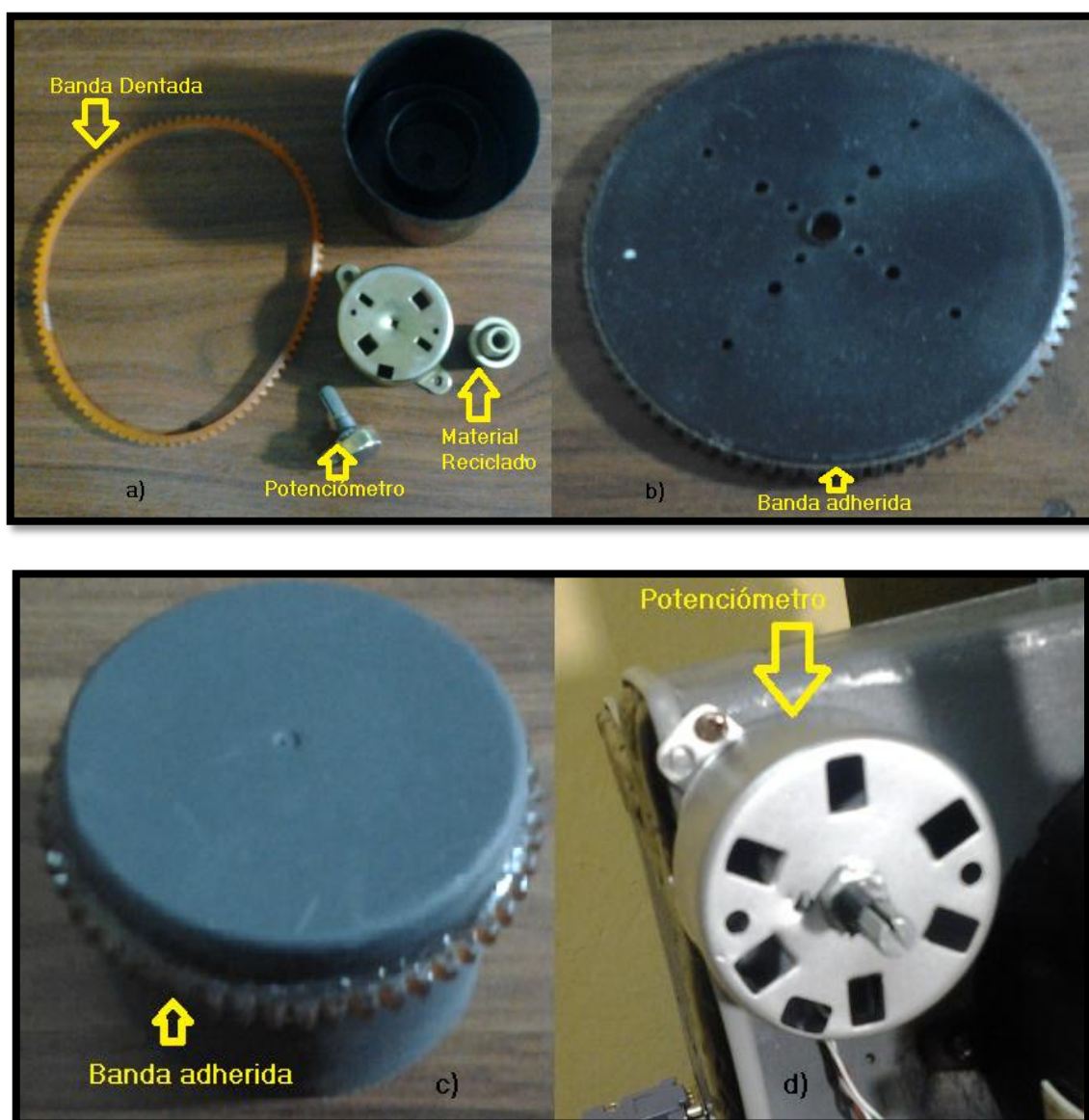


Figura 2.34 Sensor Articulación 1: a) Materiales utilizados b) Engrane 1 c) Engrane 2 d) Ubicación del potenciómetro e) Sistema de engranes

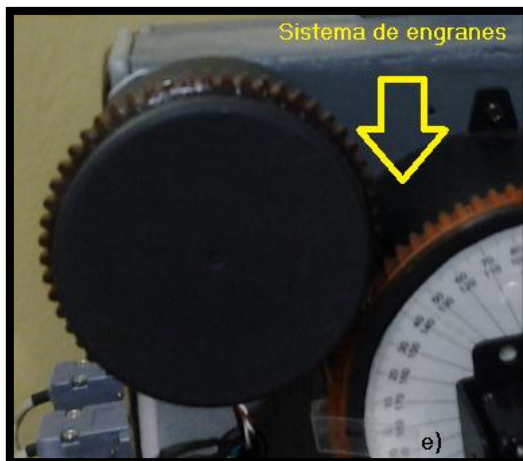


Figura 2.34 Sensor Articulación 1: a) Materiales utilizados b) Engrane 1 c) Engrane 2 d) Ubicación del potenciómetro e) Sistema de engranes (continuación)

El sensor en la articulación 2 corresponde a un potenciómetro de 100K y su respectivo soporte fabricado con grilon (Figura 2.35-a). El soporte fue fijado a la estructura móvil de dicha articulación (Figura 2.35-b), y éste a su vez alberga el potenciómetro cuyo eje fue acoplado al eje fijo de la articulación (Figura 2.35-c).

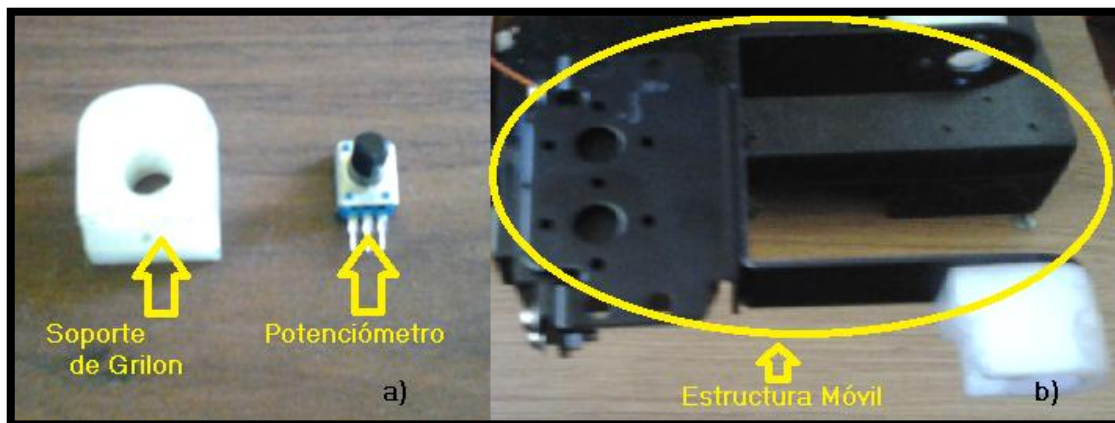


Figura 2.35 Sensor articulación 2: a) Materiales usados b) Ubicación estructura de grilon c) Ubicación potenciómetro

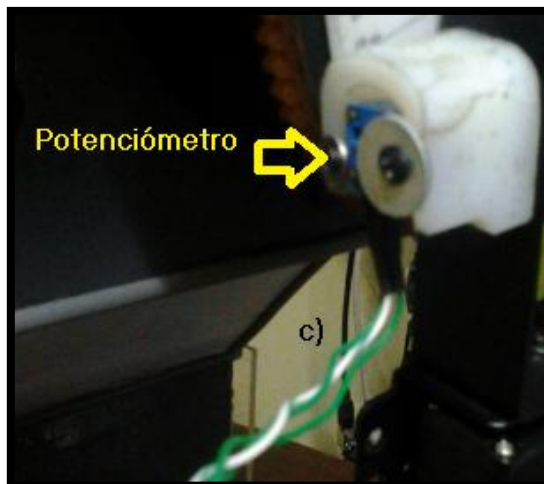


Figura 2.35 Sensor articulación 2: a) Materiales usados b) Ubicación estructura de grilon c) Ubicación potenciómetro (continuación)

Las señales obtenidas de los sensores de las articulaciones 1, 2, 3, 4, 5 y del efector final son de tipo analógico y de naturaleza eléctrica, cuya salida es un voltaje DC que varía según la posición angular del eje de cada una de las articulaciones.

2.2.2.2 Sistema de acondicionamiento 1

Se ha medido los voltajes de cada sensor con el propósito de obtener los valores superior e inferior, mismos que vienen dados por la posición angular máxima y mínima del eje del servomotor (0-180°). En la Tabla 2.13 se muestran los voltajes tanto superior e inferior de cada uno de los sensores correspondientes a las articulaciones 3, 4, 5 y el efector final.

Tabla 2.13 Voltajes límites obtenidos por los sensores.

Articulación	Voltaje Superior [V]	Voltaje Inferior [V]
3	1.79	0.29
4	2.27	0.53
5	1.80	0.39
Efector final	1.82	0.41

De acuerdo a los datos tabulados, se puede notar un buen rango de variación de voltaje, por lo que no es necesaria una etapa de amplificación. Otro aspecto que ha justificado el no usar una etapa de amplificación, viene dado por el voltaje de referencia considerado en la etapa de conversión análogo-digital, ya que el elemento microcontrolador MC1 empleado para esta etapa tiene una referencia interna de 2.56 V (programable) que fácilmente puede ser utilizada visto por el valor máximo proveniente de los sensores, logrando un sistema más compacto. Los sensores correspondientes a las articulaciones 1 y 2 (sensores 1 y 2) son potenciómetros empleados para medir la posición angular de las mismas, por lo que la variación de voltaje de estos sensores debe estar en un rango cuyo límite superior debe ser menor o igual al voltaje de referencia empleado (2.56V). Desde este punto de vista se ha añadido un divisor de voltaje basado en una resistencia de precisión variable a fin de garantizar un voltaje de alimentación para los sensores 1 y 2 igual al voltaje de referencia. El diagrama del circuito se muestra en la siguiente gráfica.

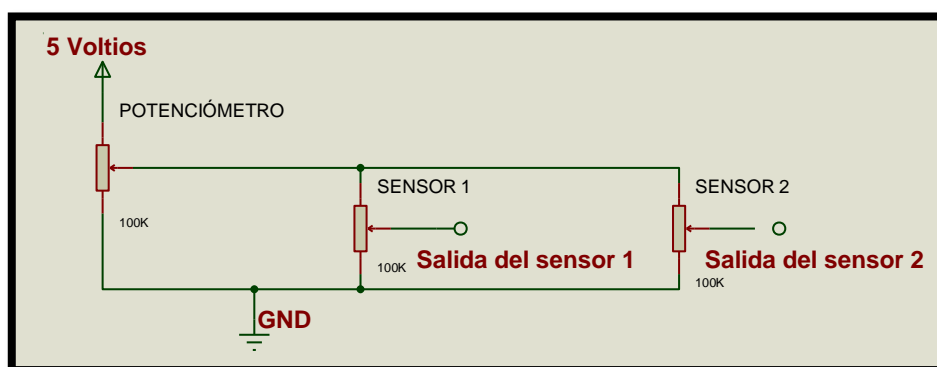


Figura 2.36 Divisor de voltaje para sensores 1 y 2

La señal de voltaje obtenida de cada uno de los sensores debe ser lo más fiable y libre de ruido eléctrico para ser digitalizada, para lo cual se ha diseñado un filtro pasa bajos pasivo para cada sensor; este filtro atenúa el ruido de frecuencias superiores a la frecuencia de corte dejando pasar las frecuencias bajo la frecuencia de corte. El filtro pasivo se caracteriza por hacer uso de componentes como: resistores, capacitores e inductores; en nuestro caso se ha diseñado un filtro pasivo de primer orden como se muestra en la Figura 2.37 [31].

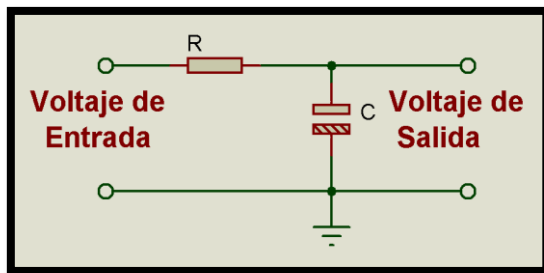


Figura 2.37 Filtro pasa bajos pasivo [31]

El voltaje de entrada al filtro es el voltaje variable obtenido de cada sensor, y a la salida se tiene el voltaje filtrado, el cual es digitalizado.

La frecuencia de corte viene dado por:

$$\omega_c = \frac{1}{R.C} \quad (2.2)$$

Para determinar la frecuencia de corte, se observó la forma de la señal de salida de uno de los sensores empleando un osciloscopio, y se pudo constatar ruido eléctrico proveniente de las señales de control de los servomotores (Figura 2.38), estas señales están en el orden los 50 Hz que es un valor típico de las señales de control de los servomotores.

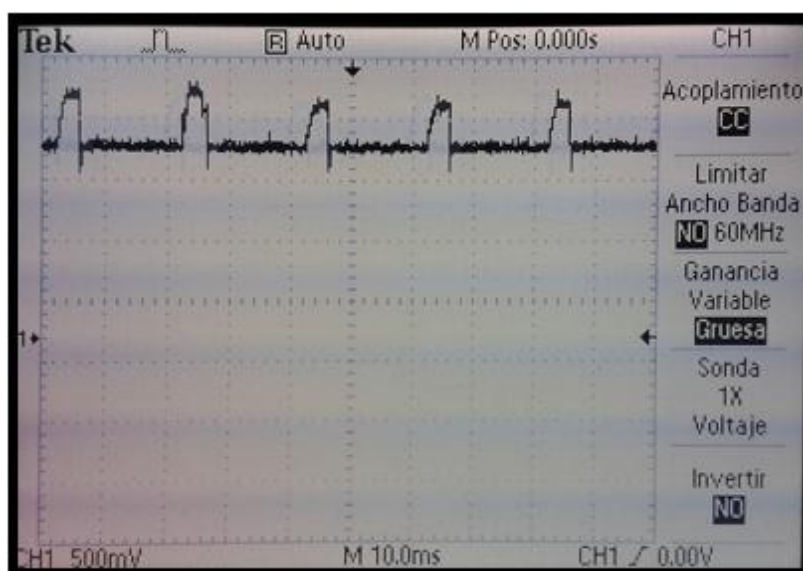


Figura 2.38 Ruido eléctrico en la señales de los sensores

De acuerdo a lo anterior, para el diseño del filtro se ha considerado una frecuencia de corte de 4 Hz a fin de garantizar la atenuación de las frecuencias de

ruido vistas en la gráfica, y dado que la respuesta del filtro no es completamente vertical.

Aplicando la ecuación 2.2 y asumiendo un valor de $C=2,2\mu F$ se tiene:

$$2\pi(4 \text{ Hz}) = \frac{1}{R \cdot (2,2 \mu F)}$$

$$R = 18,085 K\Omega$$

Empleando un valor de resistencia comercial se tiene que:

$$R = 25 K\Omega$$

En la Figura 2.39 se muestra la salida del filtro.

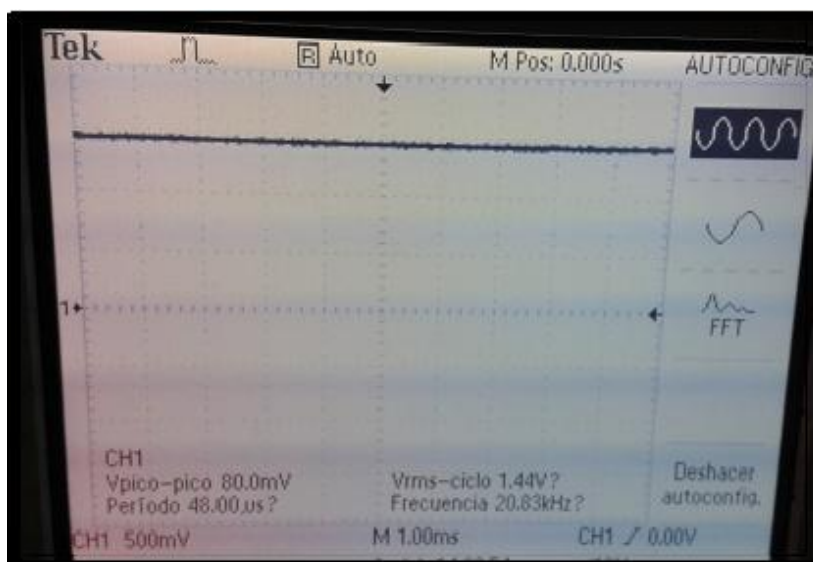


Figura 2.39 Señal libre de ruido eléctrico

La circuitería correspondiente al sistema de acondicionamiento fue implementado en la tarjeta principal con el fin de tener un sistema electrónico consistente (Figura 2.48).

2.2.2.3 Sistema de control de servomotores [32]

En este proyecto se emplean 6 servomotores que contribuyen a los 5 grados de libertad del sistema robótico y adicionalmente al movimiento de un efector final, para lo cual fue factible la utilización de un controlador de servomotores comercial, con la finalidad de tener un sistema más compacto. Es así que se hizo uso del “Micro Serial Servo Controller” del fabricante POLOLU, que es un

componente compacto para hacer el control individual de 8 servomotores desde un computador o un microcontrolador a través de comunicación serial.

Tiene la gran ventaja de controlar la mayoría de servomotores de tamaño estándar y algunos de tamaño gigante. La utilización de este controlador tiene la posibilidad de permitir una conexión en cadena para controlar hasta 128 servos.

Tabla 2.14 Especificaciones del controlador de servos, tomado de [32].

Puertos para servos	8
Resolución	0,5us (~0,05°)
Rango	250-2750 us
Frecuencia de pulso	50Hz
Voltaje de alimentación	5-16V
Voltaje datos	5V
Consumo de corriente	5mA (promedio)
Velocidad de transmisión	1200-38400 (detección automática)
Dimensiones	0,91"x0.91"

El controlador de servos empleado genera un pulso de 0.25 a 2.75ms que abarca el control de la mayoría de servos, permitiendo un rango de algo más de 180° dependiendo del fabricante del servomotor. El dato serial a ser enviado al controlador de servos es de ocho bits, sin paridad y un bit de paro.

La distribución de pines correspondiente al controlador de servos se muestra en la Figura 2.40.

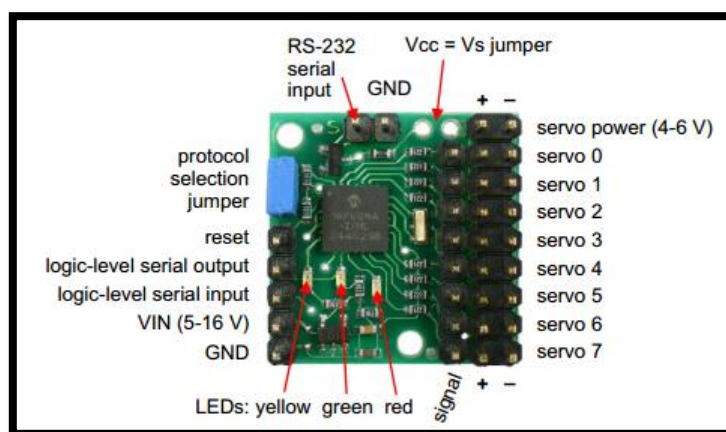


Figura 2.40 Distribución de pines del controlador de servos [32]

De acuerdo a la figura anterior se tiene dos entradas seriales: la entrada serial de nivel lógico no invertido que maneja niveles lógicos TTL (5V) y la señal serial de entrada RS232 que generalmente emplea señales de voltaje dadas por el estándar RS232 en lógica invertida. Es recomendación del fabricante hacer uso de una sola entrada serial a la vez, por lo que en este proyecto se ha utilizado la entrada serial de nivel lógico ya que los datos son enviados directamente desde un microcontrolador como se detallará posteriormente. El controlador de servos dispone de indicadores que están dados por tres diodos LED: un LED amarillo que indica advertencia, un LED verde que da aviso de actividad serial y un LED rojo que indica que se ha producido un error y el dispositivo deja de operar. Para más detalle revisar la referencia [32].

El controlador de servos emplea dos tipos de protocolos para su funcionamiento, la elección del tipo de protocolo a usarse depende del jumper de selección de protocolo mostrado en la Figura 2.40.

- **Pololu Mode:** este protocolo está activo si el jumper esta desconectado; es un protocolo usado para la utilización de múltiples dispositivos seriales y permite acceder a todas las características especiales del dispositivo tales como: configuraciones de velocidad, rangos y posición neutral.
- **Mini SSC II Mode:** este modo es activado al conectar el jumper; es un protocolo por defecto y es más simple ya que solo permite establecer la posición angular de un servo.

Para este proyecto se ha hecho uso del protocolo Mini SSC II debido a su fácil utilización. Este protocolo trabaja a velocidades de 2400 o 9600 baudios, y para el proyecto se optó por la velocidad de transmisión de 9600 baudios.

Para establecer una posición de un servo, se requiere enviar una secuencia de 3 bytes al controlador de servos, el primer byte es una valor fijo de 255 que permite la sincronización (inicio de trama) en la comunicación, el segundo byte indica el número de servo a controlar cuyo valor puede ser de 0 a 254, y el tercer byte indica la posición del servo cuyo valor puede ser de 0 a 254.

Inicio de trama 255	Número de servo 0-254	Posición servo 0-254
------------------------	--------------------------	-------------------------

El segundo byte puede generar dos tipos de movimiento, ya que dicho byte corresponde a un número de 0-16 servos; al direccionar los 8 primeros (0-7) mueve al servo en un rango de 90°, mientras que si se direcciona los 8 superiores (8-15) el rango es de 180°, puesto que en el presente proyecto se necesita un rango angular de 180°, se direcciona los 8 superiores (8-15).

Como se mencionó anteriormente los 6 servomotores empleados pueden estar funcionando al mismo tiempo, por lo que el consumo de corriente puede ser considerable, desde este punto de vista se ha diseñado una placa adicional con la finalidad de aislar la parte de potencia y la parte de control, además para proteger la integridad del controlador de servos. Esta placa es alimentada por la salida de 5 voltios provenientes de la fuente de alimentación (V2) y las señales de control provenientes de controlador de servos son proporcionadas por un bus de datos. En la Figura 2.41 se muestra un diagrama de conexiones del sistema completo para el control de los servomotores del sistema robótico.

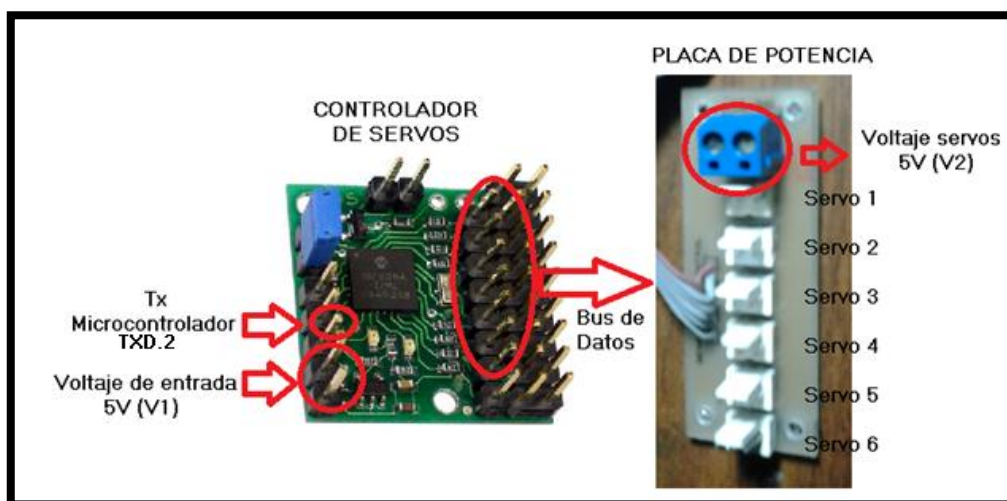


Figura 2.41 Diagrama de conexiones sistema de control servomotores

El diseño e implementación de la placa de potencia puede verse en el anexo B.

2.2.2.4 Panel frontal del robot

El panel frontal del mecanismo consta de:

- **Pantalla de cristal líquido [33][34]**

Es un módulo constituido por una pantalla que permite presentar información alfanumérica, su principio de funcionamiento radica en que cada segmento del

LCD está constituido por componentes orgánicos que actúan de acuerdo a un voltaje aplicado, de esta manera se tienen comúnmente los LCD de imagen positiva, los cuales opacan los segmentos cuando tienen un voltaje aplicado y son transparentes cuando no existe voltaje alguno, además se tiene los LCD de imagen negativa que tienen su funcionamiento opuesto al de imagen positiva. Un LCD se compone de una matriz de caracteres por ejemplo el LCD 16X2 (utilizado en este proyecto), que se trata de una pantalla de 16 columnas y dos filas, haciendo un total de 32 caracteres.

El control del módulo LCD se hace a través de un sistema microprocesado (microcontrolador, pic etc.), para lo cual la comunicación puede realizarse por un bus de 4 o 8 líneas de datos, en el presente proyecto la comunicación se hace a 4 líneas de datos con el propósito de no utilizar tantos recursos del microcontrolador (pines). La distribución de pines y las conexiones efectuadas para el LCD 16x2 se muestran en la Tabla 2.15 y Figura 2.42.

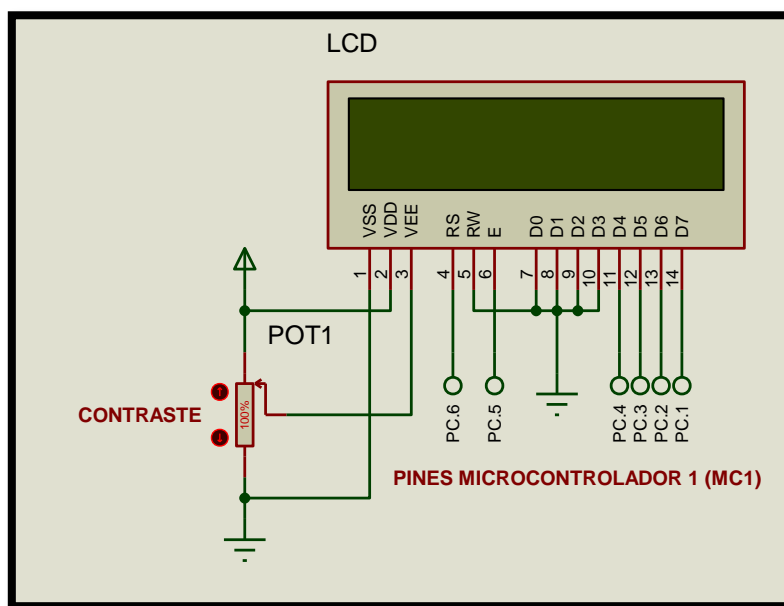


Figura 2.42 Conexiones LCD

Tabla 2.15 Distribución de pines LCD 16x2 [34].

Pin	Símbolo	Parámetro
1	Vss	GND
2	Vdd	Fuente de polarización
3	Vee	Contraste
4	RS	Selección de registro

5	R/W	Selección lectura/escritura
6	E	Señal de habilitación
7 a 10	DB0-DB3	Línea de datos (sin conexión a 4 bits)
11 a 14	DB4-DB7	Línea de datos
15	Ánodo	Terminal ánodo del LED
16	Cátodo	Terminal cátodo del LED

El potenciómetro POT1 permite la variación del contraste de la pantalla, de modo que se pueda visualizar de mejor manera los caracteres del LCD; los pines PC.1 – PC.6 corresponden a las líneas de control y de datos que el microcontrolador MC1 emplea para controlar el LCD.

- **Leds indicadores**

Como parte funcional del sistema robótico se ha requerido el uso de indicadores que de una manera dan información del estado de funcionamiento del sistema, para lo cual se hizo uso de diodos emisores de luz (LED) de 5mm.

En la actualidad existen LED comunes (bajo brillo) y de alto brillo; dependiendo de su composición interna pueden dar diferentes tipos de colores como: rojo, verde, amarillo, anaranjado, azul, blanco, entre otros. El color de un LED es muy importante dentro de la parte eléctrica ya que determina el voltaje y corriente de funcionamiento del LED (Tabla 2.16) [35].

Tabla 2.16 Voltajes y corrientes de los LED [35].

Tipo de Led	Voltaje [V]	Corriente [mA]
Rojo	1.7	20
Naranja	2	20
Amarillo	2	20
Verde	2.1	20
Rojo alto brillo	1.7	20
Blanco Brillante	3.4	12
Verde Brillante	3.4	12
Azul Brillante	4.6	10

El circuito común utilizado para el funcionamiento de un diodo LED viene dado en la Figura 2.43.

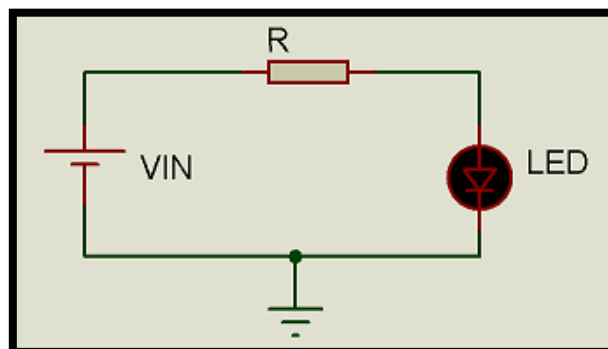


Figura 2.43 Circuito para operación de un LED

La resistencia R tiene la función de limitar la corriente y el voltaje requerido por el LED evitando la destrucción del mismo, para lo cual aplicando la ley de Ohm se puede determinar la expresión matemática para determinar dicha resistencia.

$$V = I \cdot R \text{ (Ley de Ohm) (2.3)}$$

$$R = \frac{V_{IN} - V_{LED}}{I_{LED}} \text{ (2.4)}$$

$$P = \frac{I^2}{R} \text{ (2.5)}$$

En este proyecto se ha hecho uso de indicadores LED's de alto y bajo brillo, mismos que con sus resistencias limitadoras van conectados a los pines del microcontrolador 1, tomando en consideración que la salida de voltaje de cada pin del microcontrolador es de 5V, se dimensionaron las resistencias limitadoras tanto para un LED de alto como de bajo brillo.

a) **Bajo brillo:** 1.7V, 20mA; empleando la expresión 2.4 se tiene:

$$R = \frac{(5 - 1.7)V}{20 \text{ mA}} = 165\Omega$$

Para garantizar que el LED no se deteriore:

R=300Ω (Valor comercial)

Potencia disipada empleando la ecuación 2.5:

$$P_R = \frac{(V_{IN} - V_{LED})^2}{R} \rightarrow P_R = \frac{(5 - 1.7)^2}{300} = 36.3mW$$

b) **Alto brillo:** 4V, 12mA; de la expresión 2.4 se tiene:

$$R = \frac{(5 - 4)V}{12 mA} = 83,3\Omega$$

Para garantizar que el LED no se deteriore:

R=100Ω (Valor comercial)

Potencia disipada empleando la ecuación 2.5:

$$P_R = \frac{(V_{IN} - V_{LED})^2}{R} \rightarrow P_R = \frac{(5-4)^2}{100} = 10mW$$

En el panel frontal se han empleado indicadores de bajo brillo, cuyos colores y detalle funcional se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.17 Indicadores Panel Frontal.

Código	LED	Funcionalidad
IND1	Verde	Envío de datos al computador.
IND2	Naranja	Recepción de datos del computador.
IND3	Verde	Envío de datos al controlador de servos.
IND4	Amarillo	Enlace del Sistema con el computador.
IND5	Amarillo	Sistema robótico en ejecución.
IND6	Rojo	Error (pierde comunicación con el computador).

- Sistema de pulsadores

Para este proyecto se ha hecho uso de tres pulsadores con la finalidad de que el sistema sea más interactivo y fácil de usar haciendo de su funcionamiento más simplificado. Un pulsador P1 es usado para encender y apagar el funcionamiento del sistema robótico mismo que a la vez activa la fuente de poder, un segundo pulsador P3 se usa para enlazar el sistema robótico con el computador, finalmente el tercer pulsador P2 se usa para ejecutar una secuencias de movimientos predefinidos por parte del brazo robótico. El esquema eléctrico empleado para el sistema de pulsadores se muestra en la siguiente gráfica:

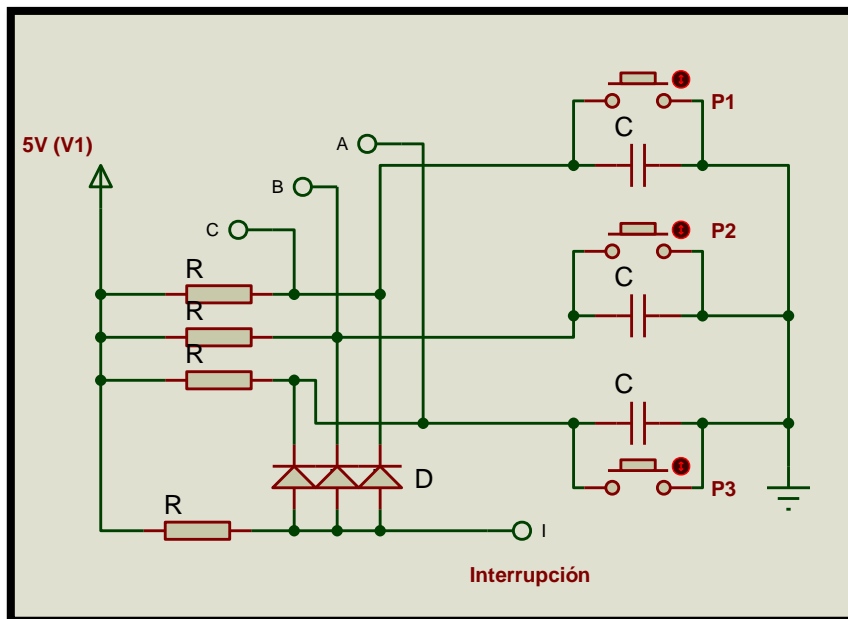


Figura 2.44 Esquema eléctrico para el sistema de pulsadores

De donde:

- **P1, P2, P3:** pulsadores.
- **R:** resistencia de pull-up cuyo valor recomendado es 10K Ω .
- **D:** diodo 1N4007 genera la señal de interrupción para el microcontrolador 1.
- **C:** capacitor de 0.1 μ F valor recomendado para reducir los rebotes eléctricos producidos por los pulsadores.
- **I:** señal conectada a una interrupción interna del microcontrolador 1, indicando se ha accionado un pulsador.
- **A, B, C:** entradas de datos al microcontrolador, que indican el accionamiento del pulsador 1, 2 y 3 respectivamente.

Los componentes del LCD, indicadores y los pulsadores han sido ubicados en un solo esquema (Figura 2.45) a fin de tener una tarjeta compacta, misma que se comunicará con el sistema principal (MC1) a través de 4 buses de datos. La tarjeta electrónica implementada es ubicada en una estructura de madera, que a su vez fue montada en la parte superior de la estructura soporte del sistema robótico. Cabe recalcar que la circuitería correspondiente a los pulsadores e indicadores se encuentra en la tarjeta principal de control como se mencionará más adelante.

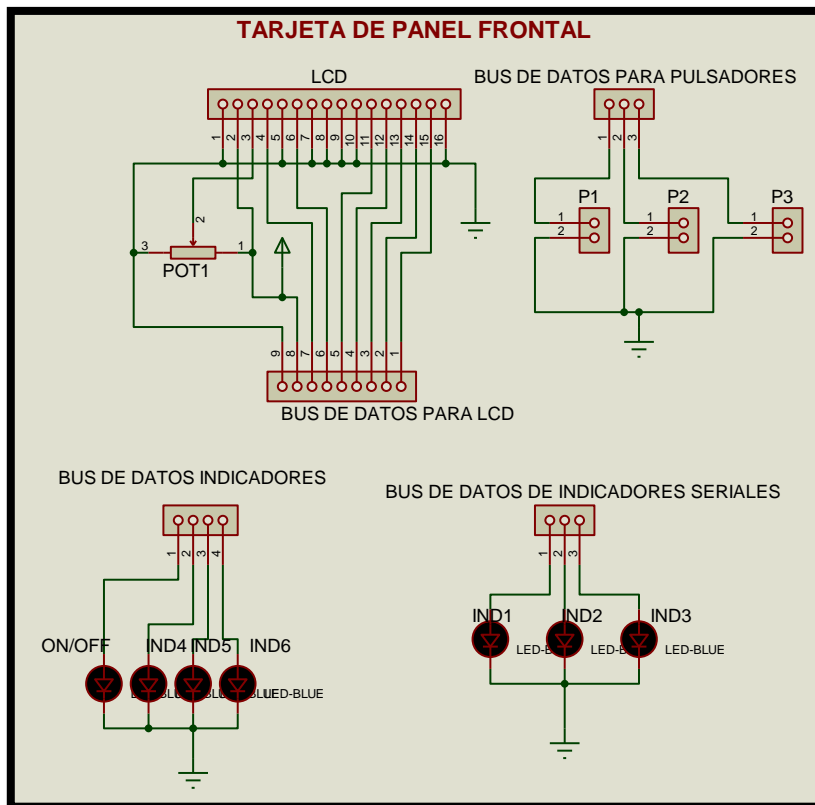


Figura 2.45 Esquema Eléctrico del Panel Frontal

Para ver la placa diseñada e implementada remítase al Anexo C.

2.2.2.5 Sistema de control del robot [36]

El sistema encargado del control del robot está basado en un microcontrolador ATmega164p de la familia AVR CMOS de 8 bits de bajo consumo, mismo que es fabricado por el fabricante ATMEL.

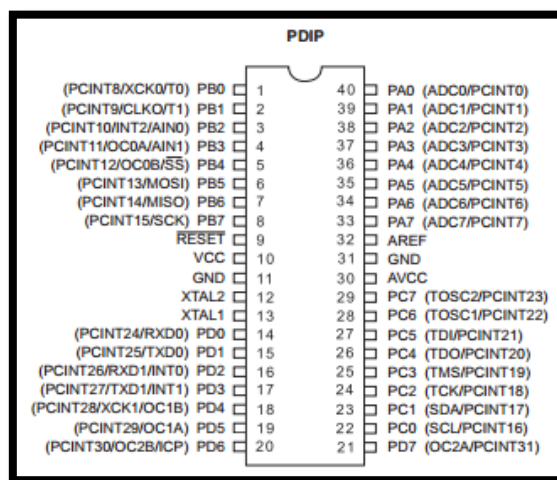


Figura 2.46 Distribución de pines ATmega164P [36]

Las características más relevantes son mostradas en la Tabla 2.18, así mismo en la Figura 2.46 se presenta la distribución de pines correspondiente.

Tabla 2.18 Características ATmega164P [36].

Arquitectura RISC avanzada de 131 instrucciones potentes.
32 registros de trabajo de 8 bits.
16Kb de memoria FLASH.
512B de memoria EEPROM.
1B de SRAM interna.
Interface JTAG para programar flash, EEPROM, fusibles y bits de bloqueo.
2 Temporizador/contador de 8 bit con prescaladores separados y modo comparativo.
1 Temporizador/contador de 8 bit con prescaladores separados, modo comparativo y modo de captura.
Contador de tiempo real con oscilador separado.
Cuatro puertos E/S de 8 bits (A, B, C, y D).
Seis canales de pwm.
Ocho canales de 10 bits ADC (modo diferencia con ganancias seleccionables 1x, 10x o 200x).
Dos puertos seriales UART programables.
Interface serial SPI maestro/esclavo.
Interface serie de dos hilos.
Interrupciones por cambio en el pin.
Watchdog Timer programable con un oscilador independiente.
40 pines con 32 pines de entrada/salida programables.
Voltaje de operación 1.8 - 5.5V
Consumo de corriente 8mA en modo activo y 2.4mA en modo inactivo (8Mhz)

Se han usados adicionalmente indicadores LED de 5mm alto brillo, mismos que han sido ubicados en la estructura soporte con el afán de dar un aspecto más atractivo a la funcionalidad del sistema robótico.

El color de cada indicador usado para la estructura soporte está dado en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19 Descripción de colores para indicadores de la estructura soporte.

Código	LED	Detalle
IND7	Azul brillante	Sistema robótico encendido.
IND8	Rojo brillante	Sistema apagado.
IND9	Blanco brillante	Inicialización del sistema.
IND10	Azul brillante	Ejecución de un sistema de control.

De lo explicado para evitar quemar los indicadores LED, es importante hacer uso de una resistencia limitadora de corriente que es conectada en serie con el diodo LED (Figura 2.43), por esa razón considerando el diseño ya expuesto se hace uso de una resistencia limitadora de 100Ω dado que son diodos de alto brillo.

En cuanto al conversor AD del ATmega164P, se ha hecho uso de la referencia de voltaje interna de 2.56V, y por recomendación del fabricante se hizo uso de un filtro pasa bajos LC ($L=10\mu\text{H}$; $C=100\text{nF}$) en el pin (30) AVCC (Figura 2.47), con el objetivo de reducir las pequeñas variaciones en el voltaje de alimentación generadas por ruido eléctrico.

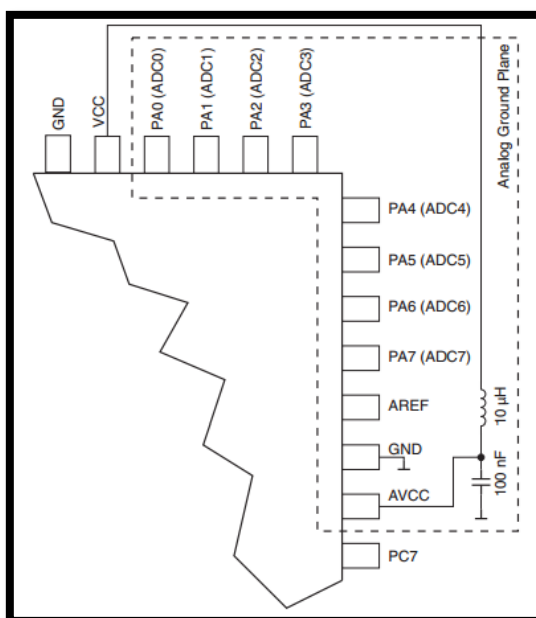


Figura 2.47 Filtro Pasa Bajos LC para el PIN AVCC [36]

El microcontrolador ATmega164p es el elemento fundamental de la tarjeta principal del sistema electrónico del robot, que además incorpora los sistemas

eléctricos antes expuestos (pulsadores e indicadores), y su esquema electrónico en conjunto se muestra en la Figura 2.48.

Adicionalmente se ha hecho uso de un oscilador externo de cuarzo de 8MHz que ha permitido una buena velocidad de procesamiento en el microcontrolador, y por recomendación del fabricante se usaron los capacitores C11 y C12 de 22pF junto al oscilador para filtrar las posibles señales de ruido.

Para visualizar el diseño e implementación de la placa correspondiente a la tarjeta principal, remítase al Anexo D.

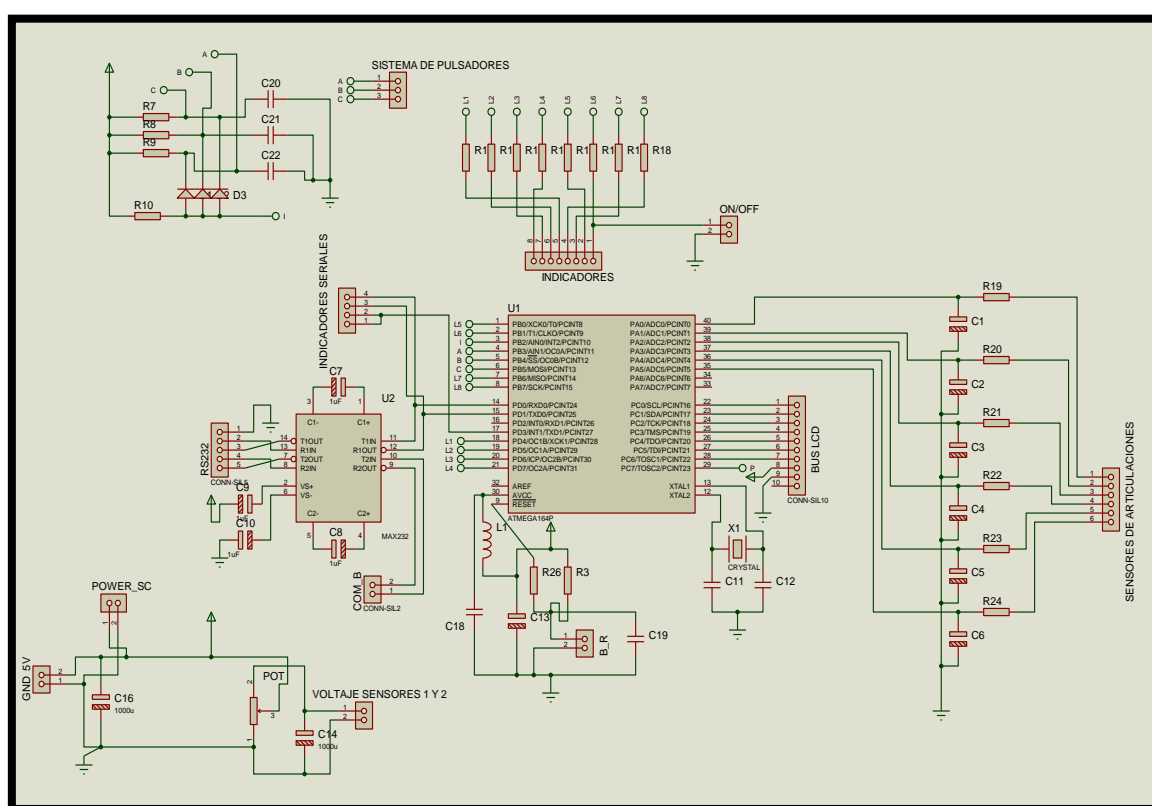


Figura 2.48 Esquema eléctrico de la Tarjeta principal

2.2.3 SISTEMA ELECTRÓNICO DE BRAZALES

Uno de los alcances principales de este proyecto es la emulación del movimiento del brazo humano empleando sensores ópticos y sensores inerciales (IMU), es por eso que en este apartado se detalla las consideraciones más relevantes empleadas para el diseño de la electrónica del sistema de brazales; puntualizando que el sistema de brazales se ubicará en la extremidad superior de un usuario con

el fin de sensor las posiciones angulares de cada articulación y emplearlas como señales de control.

2.2.3.1 Brazal mano (guante)

Para detectar la posición angular tanto de la articulación de la muñeca como del movimiento de apertura y cierre de la mano, se ha diseñado un dispositivo sensor para cada movimiento. Para lo cual fueron empleados dos sensores de presencia basados en la reflexión (QRD1114) mismos que fueron descritos en la parte teórica correspondiente.

Cada uno de estos sensores ha sido ubicado en un ducto de plástico sólido, en el cual un cuerpo geométrico en forma de cilindro (estructura de un capacitor electrolítico) pueda desplazarse dentro del ducto, con el fin de reflejar la luz emitida por el sensor y a su vez variar la señal de salida del receptor de luz. El cilindro a su vez en un extremo es fijado un cable de acero flexible que permite el desplazamiento del mismo dentro del ducto por acción externa (Figura 2.49).

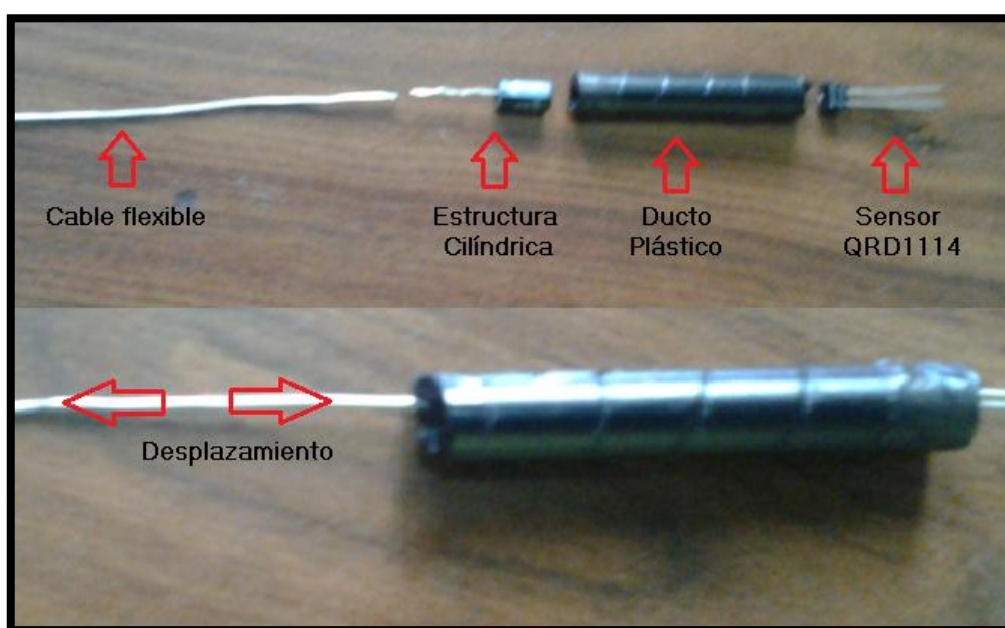


Figura 2.49 Dispositivo sensor

El color negro del ducto ayuda a reducir interferencias provocadas por la luz del entorno. Cada uno de los dispositivos implementados ha sido ubicado en un brazal tipo guante, que fue confeccionado con la finalidad de alojar dichos dispositivos. La ubicación adecuada de cada dispositivo sensor en el guante ha

sido analizada de tal manera que se pueda detectar un gran rango angular de los movimientos inmiscuidos (Figura 2.50).

El esquema eléctrico empleado para el sensor QRD114 se muestra en la Figura 2.51 Donde R1 es la resistencia limitadora de corriente para el diodo emisor de luz infrarroja y R2 es la resistencia limitadora de corriente para el transistor.

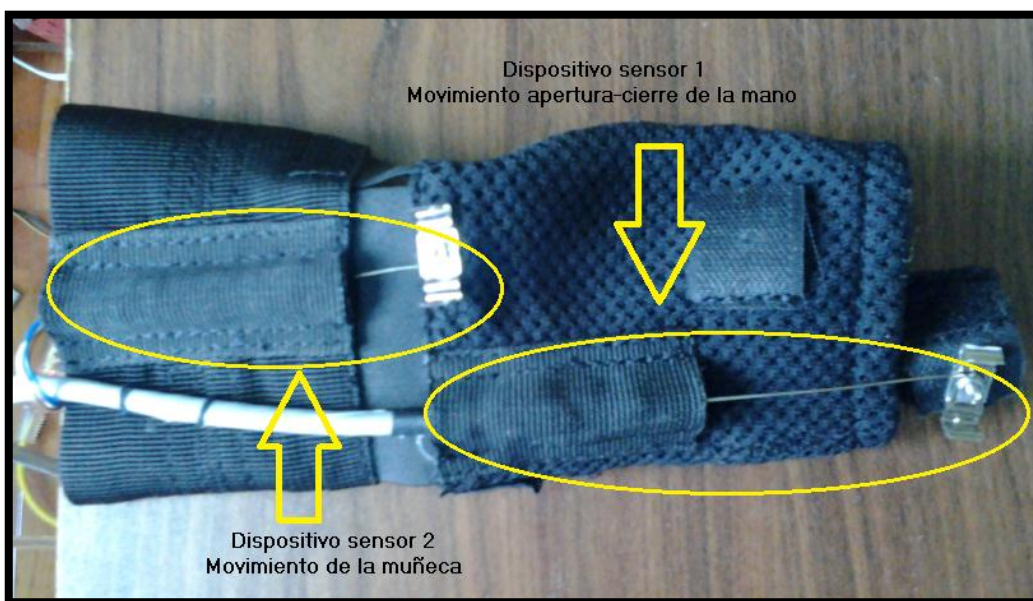


Figura 2.50 Brazal Tipo Guante

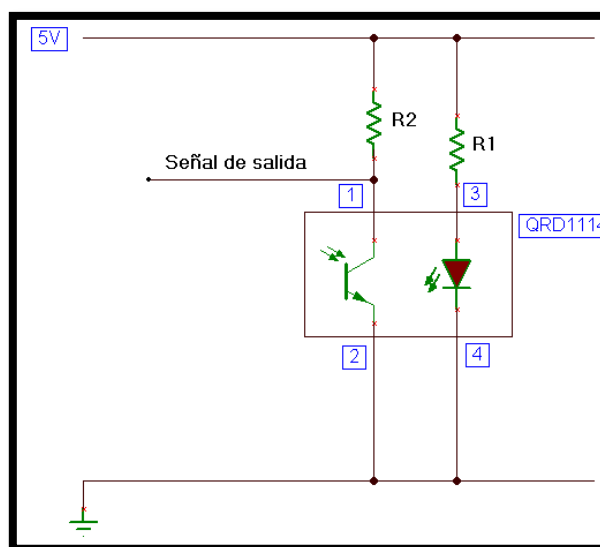


Figura 2.51 Esquema eléctrico para el sensor QRD114

En el diagrama de la Figura 2.51 se considera un voltaje de alimentación de 5V que es el voltaje utilizado para los sistemas de control; el voltaje de alimentación y

las especificaciones dadas por el fabricante permiten el diseño de R1 empleando la ecuación 2.4.

$$R1 = \frac{V_{IN} - V_{LED}}{I_{LED}}$$

Dónde:

$$V_{IN} = 5V; V_{LED} = 1.5V; I_{LED} = 50mA$$

$$R1 = \frac{(5 - 1.5)V}{50mA} = 70\Omega$$

Tomando un valor comercial superior, garantiza el funcionamiento del led infrarrojo:

$$R1=120\Omega$$

Potencia disipada empleando la ecuación 2.5:

$$P_R = \frac{(V_{IN}-V_{LED})^2}{R} \rightarrow P_R = \frac{(5-1.5)^2}{120} = 102mW$$

El valor de R2 se toma como 10K Ω debido a que es una resistencia limitadora de la corriente de colector, que permite garantizar un bajo consumo de corriente, puesto que necesitamos una salida en voltaje. Este diseño ha sido aplicado a los dos dispositivos sensores del guante.

2.2.3.2 Sistema de acondicionamiento 2

De igual manera las señales obtenidas de los sensores ópticos deben ser digitalizadas con la finalidad de ser usadas por el sistema de control como señales de punto de ajuste. Por lo se ha hecho uso del filtro diseñado en el sistema de acondicionamiento 1 ya que también se pudo constatar pequeñas interferencias producidas por las señales de control de los servomotores.

2.2.3.3 Brazales brazo y antebrazo

Con la finalidad de sensar los movimientos realizados por el hombro se ha confeccionado un brazal, el cual es ubicado en el brazo de la extremidad superior, este brazal aloja un sensor IMU CHR-UM6 (IMU1). Así mismo para la detección

de los movimientos del codo se ha construido un brazal que es ubicado en el antebrazo y aloja de igual forma un sensor IMU CHR-UM6 (IMU2).

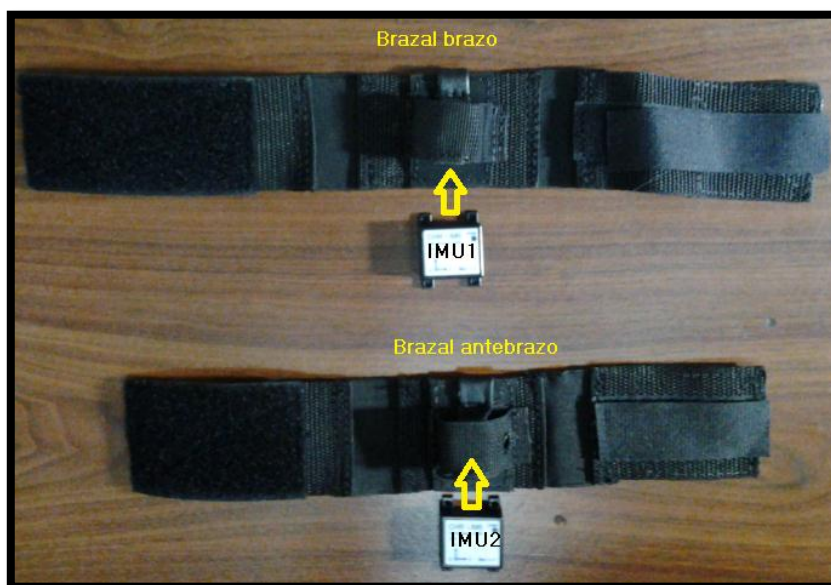


Figura 2.52 Sistema de brazales

Los sensores son alimentados mediante el voltaje de la fuente de 5V (V1) y la comunicación con el microcontrolador 2 es vía un bus serial de dos líneas.

2.2.3.4 Sistema de control de brazales

Este sistema emplea un microcontrolador ATmega164P como medio de control al igual que en el sistema robótico, éste elemento ha sido empleado para digitalizar las señales obtenidas de los sensores ópticos, y mediante indicadores da a conocer el modo de operación del sistema; además es el encargado de enviar comando a los sensores IMU. Ya que se requiere de dos salidas seriales debido al uso de dos sensores IMU, se ha hecho uso de un multiplexor digital 74LS151 cuyas características y distribución de pines se dan en la Tabla 2.20 y Figura 2.53 respectivamente.

Tabla 2.20 Características HD74LS151 [37].

Voltaje de alimentación	5V
Potencia de disipación máxima	400mW
Rango de temperatura de trabajo	-20 a 75°C
Corriente de alimentación	10mA

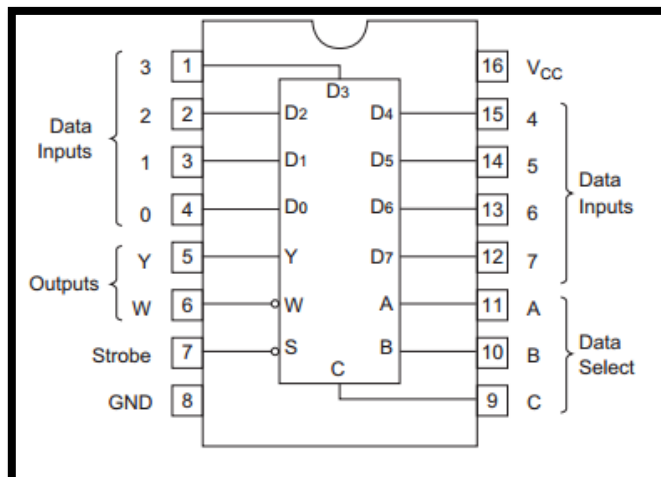


Figura 2.53 Distribución de pines HD74LS151 [37]

El microcontrolador es el encargado de seleccionar a través de las líneas de control del multiplexor si es que el propio microcontrolador (TXD.0) o uno de los sensores IMU pueden acceder a la línea de transmisión para enviar los datos requeridos por el computador. Puesto que el computador hace constantes peticiones de datos, el microcontrolador debe ser capaz de identificar que datos son requeridos por el computador; si son datos de los sensores inerciales, enviará un comando a la IMU correspondiente por medio del otro puerto serial (TXD.2) y habilitará en la línea correspondiente para que se transmitan los datos desde el sensor IMU. Los comandos enviados por el computador son receptados en la línea RXD.0 del microcontrolador.

Dado que la variación del voltaje de los sensores ópticos está en todo el rango del voltaje de alimentación, se ha hecho uso del pin AVCC a 5V como referencia de voltaje para el conversor AD, y por recomendación del fabricante se utiliza un filtro pasa bajo LC cuyos valores de L y C son 10uH y 0,1uF respectivamente, esto con el fin de eliminar el posible ruido eléctrico. De la misma manera se ha empleado un cristal de 8MHz, que ofrece una buena velocidad de trabajo para las actividades que realiza el microcontrolador 2. En la Figura 2.54 se muestra el esquemático correspondiente al sistema electrónico de brazos, donde se ha considerado un pulsador que permite el enlace de comunicación del sistema de brazos con el computador, y también se ha hecho uso de indicadores LED de 5mm que indican el funcionamiento del sistema; la resistencia limitadora de los indicadores es de 300Ω cuyo diseño ya fue expuesto anteriormente.

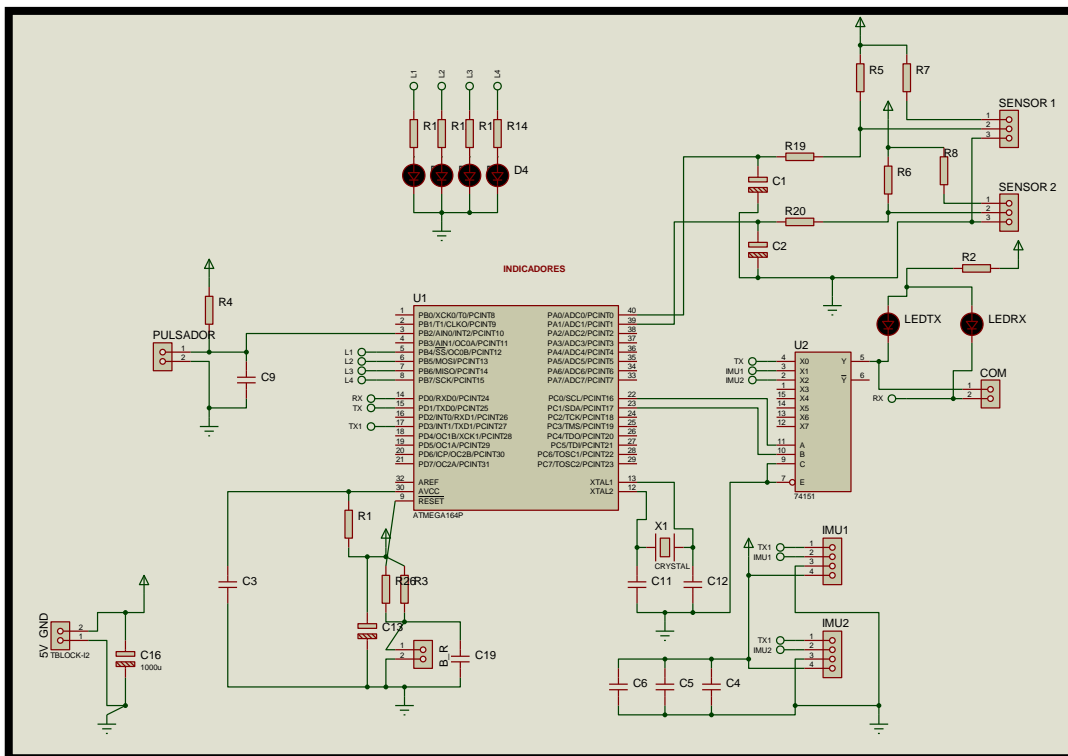


Figura 2.54 Esquema eléctrico del sistema electrónico de brazos (Tarjeta Principal)

La tarjeta electrónica implementada ha sido ubicada en una caja plástica para protección de la misma. Puesto que los brazos son ubicados en la extremidad superior de un individuo, el sistema de control de brazos debe estar de alguna forma ubicada en el mismo individuo permitiendo que este pueda movilizarse sin problemas, por este hecho se confeccionó un sujetador de correas que fija la caja plástica del sistema de control al individuo como se muestra en la Figura 2.55.



Figura 2.55 Sujetador de la caja plástica de control

La alimentación de voltaje y la comunicación para el sistema se han logrado con el uso de un cable de 4 hilos, de los cuales dos hilos corresponden a 5V y GND, mientras que dos hilos adicionales corresponde al bus serial (TX y RX) para comunicación con el computador. Este cable de 4 hilos tiene conexión a la parte posterior de la estructura robótica, en la cual internamente se alimenta las líneas de voltaje por parte de la fuente V1, y de la misma manera conecta el bus serial al sistema de acoplamiento de niveles TTL a RS232 para la comunicación con el computador. Para visualizar el diseño e implementación de la placa del sistema microprocesado del sistema de brazos remítase al Anexo E.

2.2.4 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN SERIAL

Puesto que los dos sistemas electrónicos antes detallados (Robot y Brazales) trabajan con niveles de voltaje TTL (5V), ha sido necesario realizar una conversión de niveles de voltajes a fin de tener compatibilidad con el estándar RS-232 empleado por los computadores, es por eso que se ha utilizado el circuito integrado MAX232CPE cuyas especificaciones y conexiones están dadas en la Tabla 2.21 y Figura 2.56 respectivamente.

Tabla 2.21 Especificaciones MAX232CPE [38].

Voltaje de alimentación	5V
Temperatura de trabajo	0-70°C
Corriente de alimentación	8mA

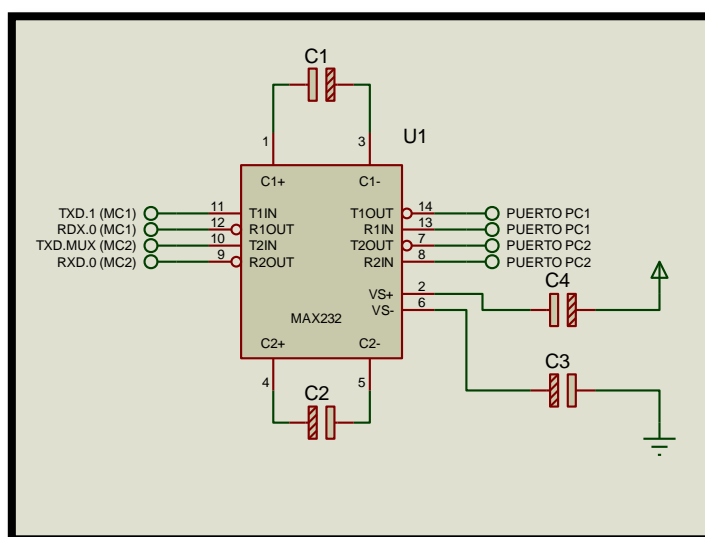


Figura 2.56 Diagrama de conexiones MAX232CPE [38]

- **TXD.1 (MC1):** línea de transmisión de datos del MC1 al computador.
- **RDX.0 (MC1):** línea de recepción de datos del MC1 desde el computador.
- **TXD.MUX (MC2):** línea de transmisión de datos del MC2 (salida multiplexor) al computador.
- **RDX.0 (MC2):** línea de recepción de datos del MC2 desde el computador.
- **Puerto PC1:** puerto de comunicación 1 del computador.
- **Puerto PC2:** puerto de comunicación 2 del computador.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

En este capítulo se presentan los aspectos referentes al desarrollo de los programas de control tanto para el sistema robótico como para el sistema de brazos; además se detalla el diseño y funcionamiento del HMI (Interfaz hombre-máquina) de control. El desarrollo de los sistemas de control y el HMI permiten que el usuario pueda interactuar con el brazo robótico en un modo manual y en un modo automático (brazos), obteniéndose un sistema funcionalmente muy práctico y de fácil comprensión. En adición se ha buscado que el sistema presente funciones atractivas en su operación como por ejemplo la animación del robot para que efectúe movimientos predefinidos comunes de un brazo humano y como parte de estética visual se ha añadido un sistema de indicadores tipo LED que resaltan el funcionamiento del sistema robótico.

Para el desarrollo del HMI se ha empleado el software LABVIEW 2011, y la programación de los microcontroladores (MC1 y MC2) ha sido realizada empleando el software BASCOM-AVR.

El HMI incluye un indicador gráfico que permite mostrar en tiempo real las señales de punto de ajuste (setpoint) y de realimentación, de esta manera se puede apreciar la acción de control y compensación por parte del controlador PID utilizado.

Se ha implementado una etapa de enlace entre el sistema robótico-computador y sistema de brazos-computador con la finalidad de garantizar la comunicación física entre ellos, y evitar un funcionamiento erróneo del brazo robótico; en este mismo contexto se detectará si existe un error de comunicación de uno de los dos sistemas con el computador inhabilitando la ejecución del control como protección del sistema.

Para el envío y recepción de datos entre los sistemas robótico-brazos y el computador se ha trabajado con tramas y comandos que ayudan a la sincronización de los datos y que éstos sean almacenados correctamente.

En los siguientes ítems se detalla todas las funcionalidades y consideraciones tomadas en el diseño de los programas de control, con el fin de alcanzar los objetivos propuestos por el proyecto.

3.1 PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SISTEMA ROBÓTICO

Básicamente el funcionamiento del sistema robótico está dominado por un microcontrolador ATMEGA164P (MC1), el cual se encarga de la adquisición de los datos provenientes de los sensores de cada articulación y posteriormente los envía al computador siempre y cuando éste haya solicitado dichos datos; además el microcontrolador MC1 recibe desde el computador los datos codificados correspondientes a las posiciones angulares que deben tomar los servomotores del robot, posteriormente dichos datos son reenviados al controlador de servos en las tramas establecidas. Una peculiaridad del sistema robótico se manifiesta en el panel frontal disponible, mismo que presenta textualmente en un LCD el estado funcional del robot; también se tiene acceso a pulsadores que intervienen en el funcionamiento del sistema robótico, uno de los cuales ejecuta de una serie de movimientos preestablecidos para que el sistema robótico realice 4 actividades muy comunes de un brazo humano, estos y otros aspectos de funcionamiento se detallan a continuación.

3.1.1 PROGRAMA PRINCIPAL

Una vez que el sistema microprocesado ha sido energizado, inicia su ejecución configurando: puertos de entrada y salida, definición e inicialización de variables, puertos de comunicación serial, control del LCD, interrupción empleada para el sistema de pulsadores, salidas PWM de los temporizadores 1 y 2, finalmente el conversor análogo-digital. Seguido a la configuración de los recursos a utilizarse, el sistema microprocesado envía una serie de tramas de datos al controlador de servos a través del UART1 (COM2) para ubicar al brazo robótico en la posición referencial una vez que se encienda el sistema de potencia. Luego de que el sistema se ha inicializado, pasa a un estado de inactividad, es decir no ejecuta ninguna acción programada y el sistema de potencia permanece apagado (IND 8 encendido). El diagrama correspondiente al programa principal se presenta a continuación:

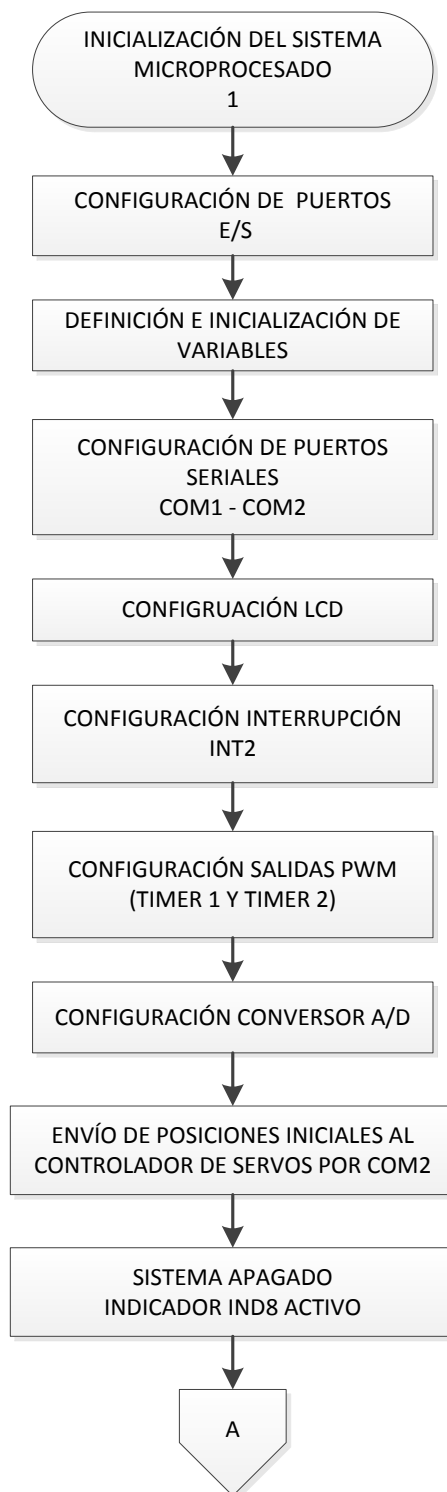


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa principal (MC1)

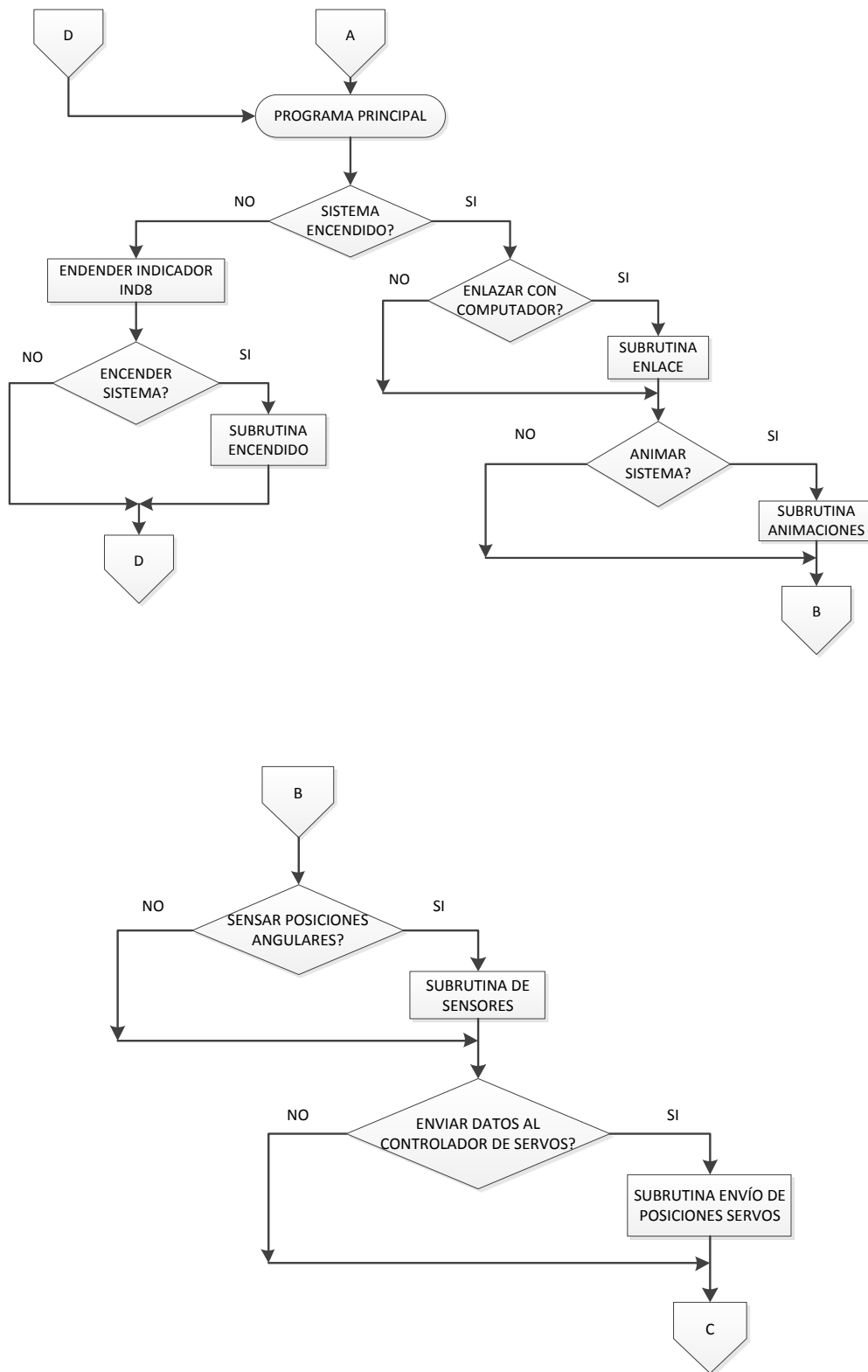


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa principal (MC1) (continuación)

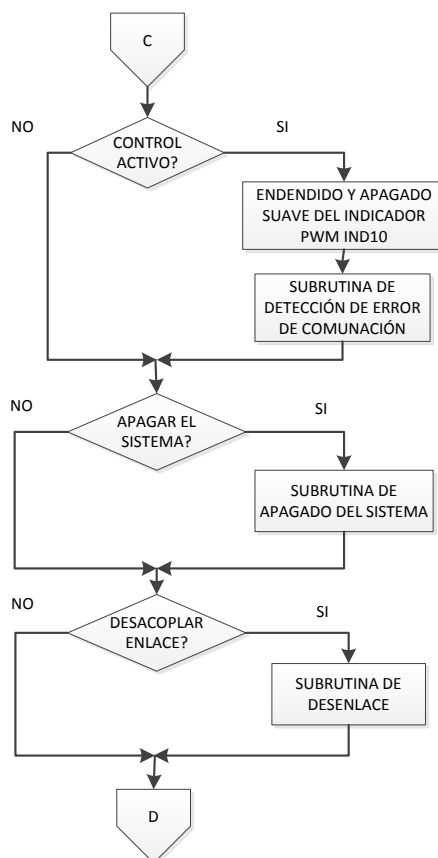


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa principal (MC1) (continuación)

3.1.2 SUBROUTINA DE ENCENDIDO DEL SISTEMA ROBÓTICO

Dentro de la funcionalidad del sistema robótico se ha diseñado un sistema de encendido cuyo objetivo fue que el sistema robótico arranque siempre desde un estado inicial, para ello posterior a la energización e inicialización del sistema microprocesado MC1, es necesario mantener presionado por tres segundos el pulsador 1 (P1) permitiendo que el sistema arranque la fuente de poder para energizar los servomotores a través de la tarjeta de encendido electrónico implementada (indicador LED IND7 se enciende), seguidamente el LCD muestra la presentación textual del proyecto, y junto con los indicadores tipo LED (IND9) animan el encendido del sistema robótico efectuando un encendido y apagado suave de dichos indicadores, esto es obtenido con el uso de una salida PWM del temporizador 1. Una vez que el sistema ya se ha encendido pasa a un estado activo en el cual está apto para enlazarse con el computador tal como se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

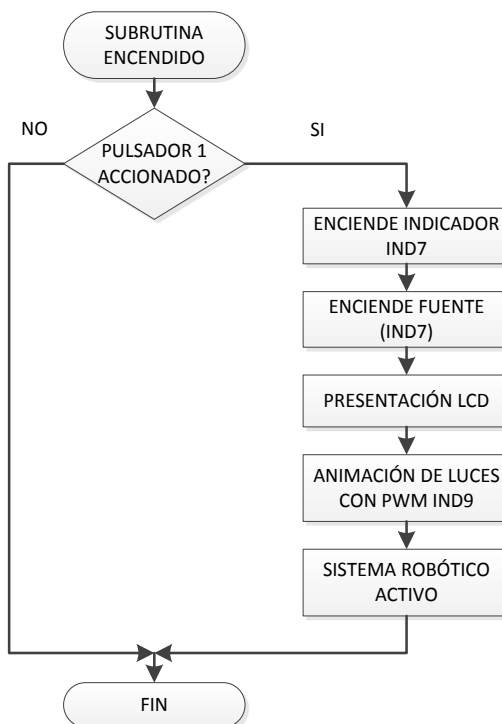


Figura 3.2 Diagrama de flujo del encendido del sistema

3.1.3 SUBROUTINA DE EJECUCIÓN DE MOVIMIENTOS PREDEFINIDOS

Para dar mayor realce de la movilidad del sistema robótico, ha sido programado una serie de movimientos predefinidos muy comunes de un brazo humano, tales como:

- **Movimiento predefinido de saludo:** el robot extiende el brazo para dar un cordial saludo, algo que es muy común en el vivir a diario de las personas.
- **Movimiento predefinido de pensativo:** actividad en la cual el robot realiza un movimiento que da la impresión del estado pensativo de una persona.
- **Movimiento predefinido de ejercitando:** el robot emula el movimiento para ejercitar la extremidad superior de un individuo.
- **Movimiento predefinido de despedida:** el brazo robótico es animado para imitar la acción que un individuo realiza al despedirse.

Para ejecutar los movimientos antes mencionados, se debe presionar el pulsador P2, que por medio de la interrupción se decodifica la acción para efectuar la subrutina correspondiente. Dentro de esta subrutina las animaciones del robot son

realizadas en el orden en el que fueron descritas; cada que finaliza la ejecución de un movimiento el indicador LED IND10 se enciende para dar paso al siguiente movimiento, y adicionalmente el LCD presenta el movimiento en ejecución. El indicador LED IND 5 permanece encendido si el brazo robótico está en el modo de animación, y únicamente se apaga cuando todas las animaciones se han ejecutado, finalizando la subrutina. De lo descrito se tiene el siguiente diagrama de bloques:

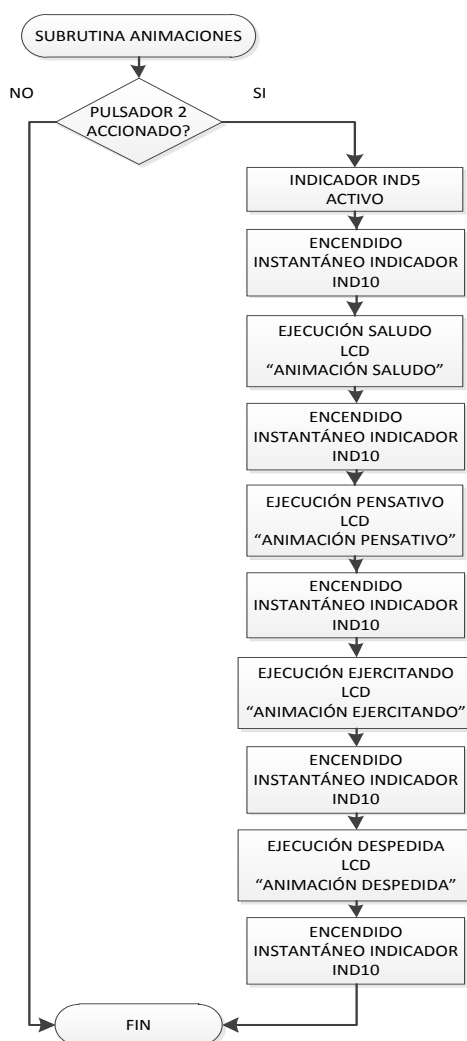


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la subrutina de animación

3.1.4 SUBROUTINA DEL ENLACE SISTEMA ROBÓTICO - PC

La comunicación del sistema robótico con el computador es primordial para el funcionamiento del mismo, es por eso que se ha implementado una etapa de enlace con el computador con el propósito de evitar comportamientos erróneos del sistema y asegurar una comunicación física. Una vez que se haya encendido

el robot y esté presto a un enlace con el computador, puede ser accionado el pulsador 3 (P3) que por medio de la interrupción 2, el sistema microprocesado (MC1) decodifica la acción y ejecuta una subrutina de enlace en la cual se envía periódicamente un comando de un byte (200) al computador por el UART0 (COM1) solicitando el enlace; el indicador LED IND4 parpadea mientras se mantiene en la subrutina y además en el LCD se muestra textualmente que el sistema pretende enlazarse con el PC. En el momento que el computador confirma la comunicación física, éste responde con un comando de un byte (253) al microcontrolador que a su vez muestra en el LCD que el sistema se ha enlazado con el computador y el indicador IND4 permanece activo. Luego de constatar la existencia de un enlace de comunicación, el sistema microprocesado pasa a un estado de pausa y presto a la ejecución de un control por parte del HMI. Una característica de la subrutina de enlace, por parte del sistema microprocesado reside en la permanencia de un minuto en solicitar enlace, pasado este tiempo y al no haber confirmado la comunicación con el computador, el LCD muestra textualmente que no se pudo conectar y que debe ser revisada la conexión serial para una posterior solicitud de enlace con el PC.

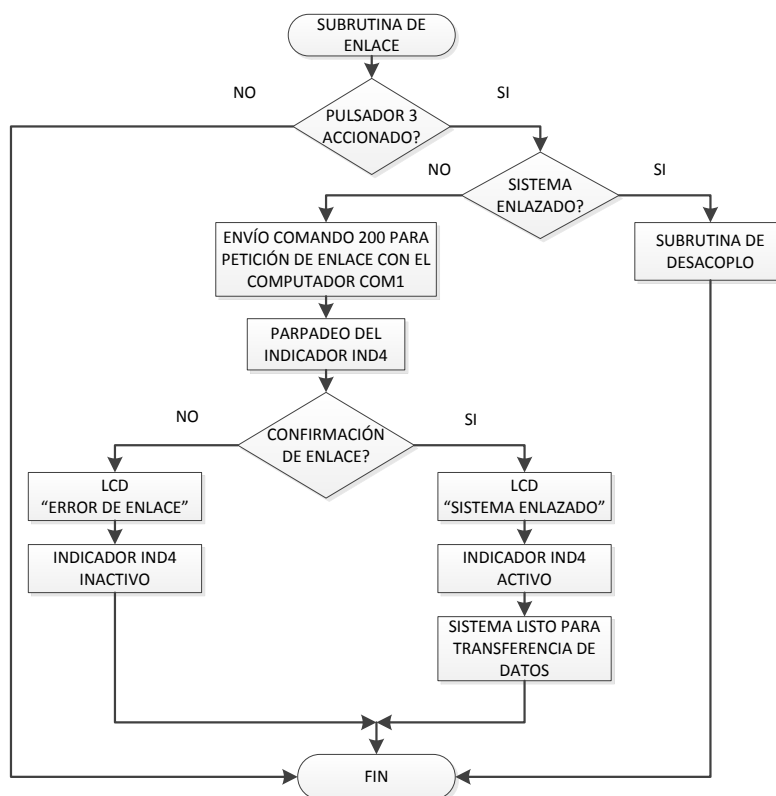


Figura 3.4 Diagrama de flujo del enlace sistema robótico-computador

3.1.5 SUBROUTINA PARA EL SISTEMA DE SENSORES DEL BRAZO ROBÓTICO

Durante la ejecución en el HMI de un modo de control, se tiene un envío continuo de un comando de un byte (255) al sistema robótico estableciendo una petición de los datos de los sensores de cada articulación del robot, por lo que una vez que se haya receptado el comando, el sistema microprocesado ejecuta una subrutina dentro de la cual por medio del conversor A/D se adquieren 5 datos de cada sensor para ser promediados y así filtrar digitalmente las señales; posterior a la adquisición de datos se ejecuta una transmisión por medio del bus serial UART0 (COM1) de una trama de 8 bytes, donde se tiene un byte de inicio, bytes de datos de los sensores (6 bytes) y un byte de fin de trama; los bytes de inicio y fin permiten que los datos sean decodificados correctamente por el HMI embebido en el computador, es decir permiten una sincronización.

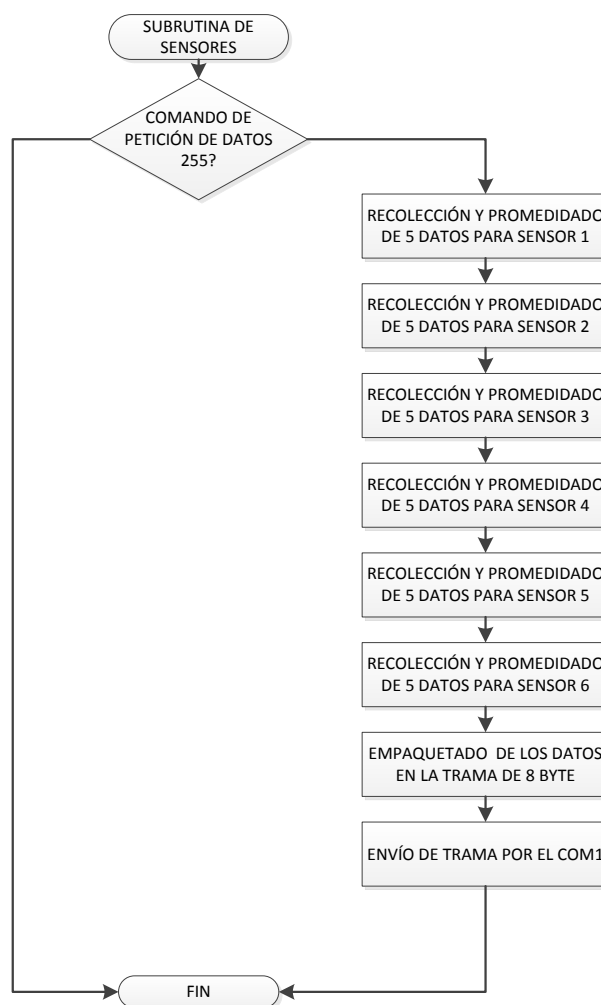


Figura 3.5 Diagrama de flujo de subrutina del sistema de sensores

Tabla 3.1. Trama de envío de datos del sistema sensorizado.

Byte Inicio	Dato Sensor	Dato Sensor	Dato Sensor	Dato Sensor	Dato Sensor	Dato Sensor	Byte Fin
252	1	2	3	4	5	6	253

3.1.6 SUBROUTINA DE ENVÍO DE DATOS AL CONTROLADOR DE SERVOS

Una vez que los datos de los sensores son decodificados y empleados por los controladores (PID) implementados en el HMI, los datos de salida (datos codificados para los servomotores) son almacenados en variables que posteriormente serán empaquetadas en una trama de 7 bytes, y a su vez enviadas a través del bus serial, posteriormente es receptada por el sistema microprocesado (MC1); esta trama contiene un byte 254 que inicializa la recepción de datos para que sean almacenados ordenadamente en las variables correspondientes a la posición angular de los 6 servomotores, posteriormente estos datos se empaquetan en 6 tramas en el protocolo “mini SSC II” para ser enviadas por un bus serial (UART1) al controlador de servos.

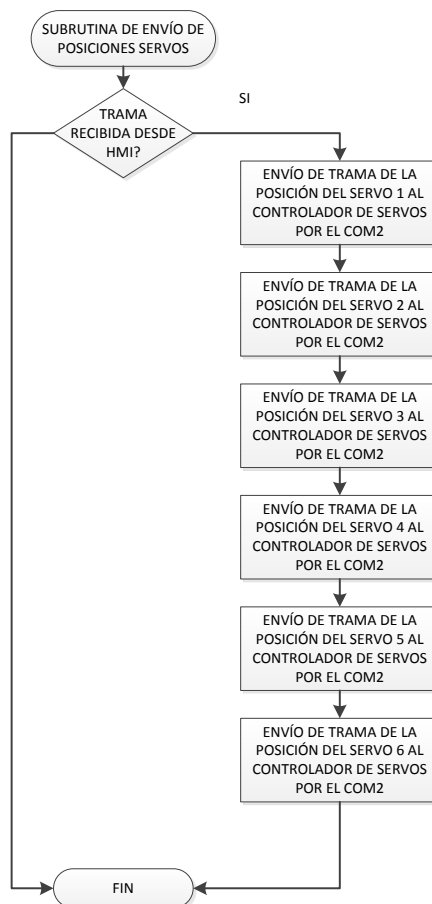


Figura 3.6 Diagrama de flujo de la subrutina de envío de tramas al controlador de servos

Tabla 3.2. Trama recibida desde el computador.

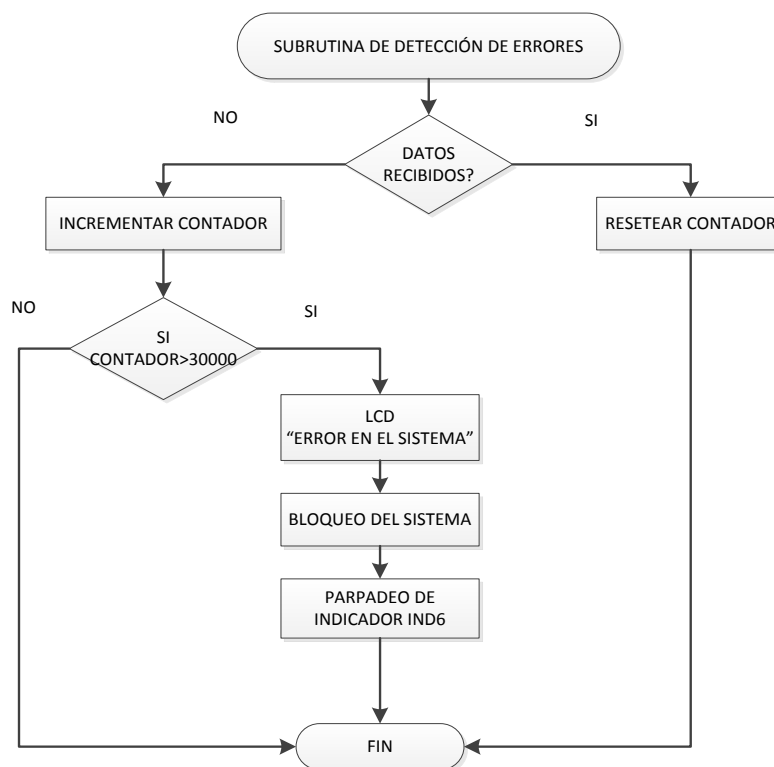
Inicio de Trama 255	Posición Servo 1	Posición Servo 2	Posición Servo 3	Posición Servo 4	Posición Servo 5	Posición Servo 6
------------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

Tabla 3.3. Trama enviada al controlador de servos.

Inicio de trama 255	Número de servo 0-254	Posición servo 0-254
------------------------	--------------------------	-------------------------

3.1.7 SUBROUTINA DE DETECCIÓN DE ERROR EN LA COMUNICACIÓN

Mientras es ejecutado un control en el HMI, el sistema microprocesado se encuentra enviando y recibiendo datos constantemente, por lo que un contador de error es encendido cada vez que se recibe un dato desde el computador constatando la permanencia de comunicación; si por problema de desconexión del cable o falla en el HMI, el sistema deja de recibir datos, dicho contador empieza a incrementar cuyo valor tiene un límite con el cual el sistema microprocesador entiende que se ha perdido comunicación con el computador mostrando en el LCD el error encontrado en la comunicación, y haciendo parpadear el LED IND6.

**Figura 3.7 Diagrama de flujo de subrutina de detección de error**

3.1.8 SUBROUTINA DE DESCONEXIÓN SISTEMA ROBÓTICO-PC

Cuando el sistema está enlazado con el computador y si no se está ejecutando algún control (sistema pausado), es posible desconectar el sistema del pc presionando nuevamente el pulsador P3 que mediante la interrupción el sistema lo decodifica como una acción de desconexión, originando que el microcontrolador vuelva al estado inicial posterior a su encendido desactivando el indicador IND4.

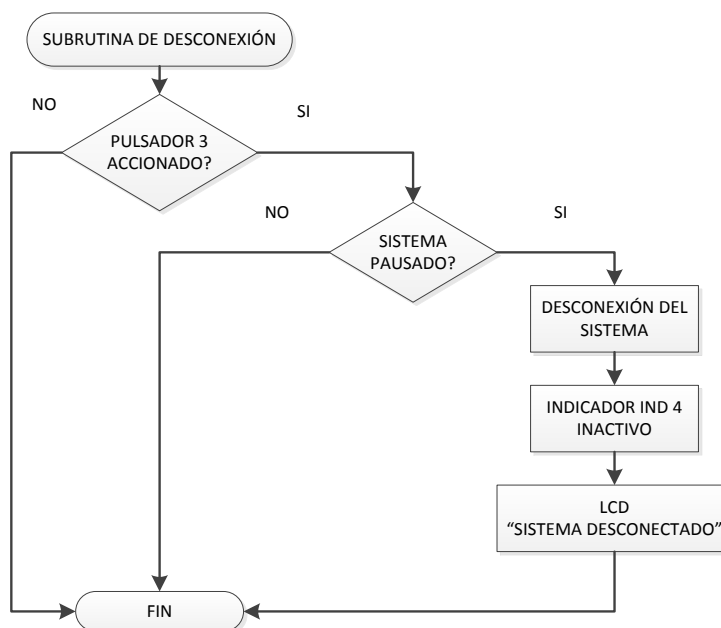


Figura 3.8 Diagrama de flujo de desconexión del sistema

3.1.9 SUBROUTINA DE APAGADO DEL SISTEMA

Con la intención de no hacer desuso de energía por parte del sistema robótico cuando no está siendo usado, se ha programado una función que permite apagar el sistema, dando procedencia a dos modos, los cuales son:

- **Modo manual:** manteniendo accionado el pulsador 1 durante 3 segundos, el sistema microprocesado decodificará la acción para apagar el sistema robótico; mediante el LCD se presenta la información pertinente del apagando el sistema y posterior a ello se apagan la fuente de alimentación y los indicadores activos, encendiendo únicamente el LED IND 8 que advierte que el sistema robótico está en modo apagado. La acción del apagado solo es iniciada si el sistema está en modo de pausa, es decir que

no esté operando un control sobre el sistema robótico, caso contrario por medio del LCD se da la alerta de que no se puede apagar el sistema robótico, esto con el propósito de eludir errores en el funcionamiento del sistema de control.

- **Modo automático:** se ha implementado un apagado automático basándose en el uso de un contador, mismo que se incrementa mientras el sistema no está en uso; si después de 3 minutos no se hace uso del mismo, éste procede a ejecutar la subrutina de apagado antes explicada. Si se ejecuta un control sobre el sistema antes de los 3 minutos, el sistema reiniciará el contador.

El diagrama de flujo correspondiente a la subrutina del apagado del sistema se muestra a continuación:

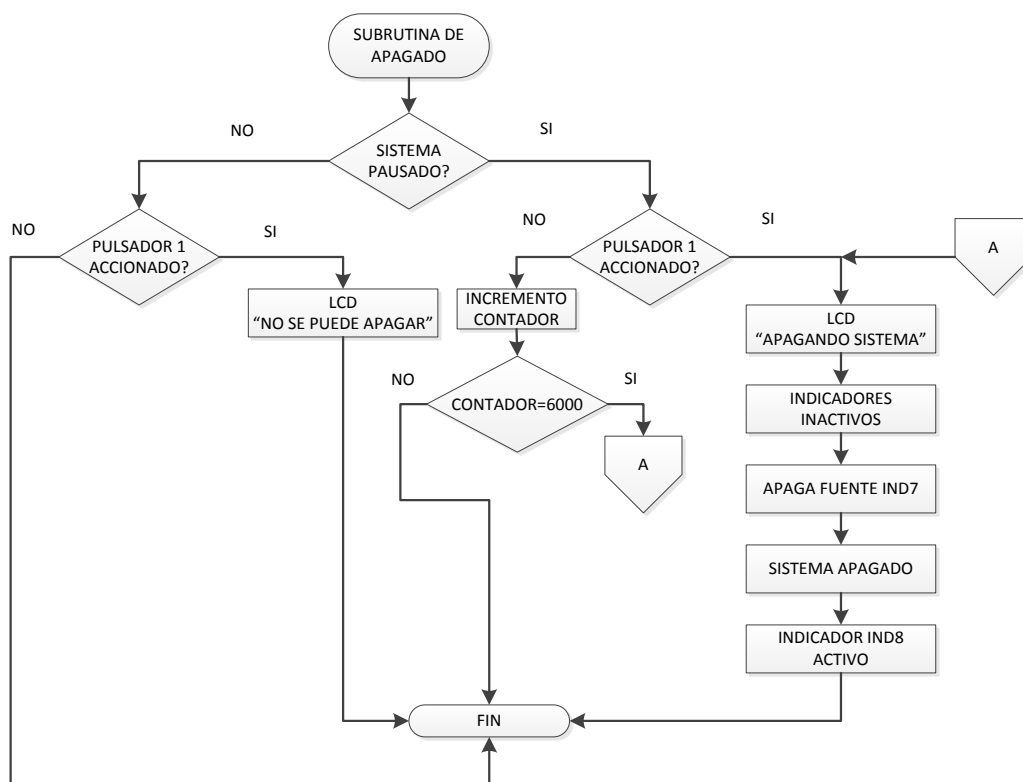


Figura 3.9 Diagrama de flujo de apagado del sistema

3.1.10 COMANDOS DE CONTROL

Una vez que el sistema robótico haya constatado la comunicación con el computador, es posible la admisión de comandos en el sistema microprocesado

con la finalidad de tomar modos de operación de acuerdo al comando específico enviado desde el HMI.

3.1.10.1 Comando de control manual

Una vez que en el HMI se ha seleccionado la opción de control manual, y que se inicie la ejecución del mismo, procede a enviar un comando de dos bytes; el primer byte 250 indica al sistema robótico que se realizará un control manual, y el segundo byte 251 advierte al sistema para que esté activo y apto para admitir datos seriales. Una vez que el sistema microprocesado recibe los comandos especificados, el LCD muestra textualmente que el control manual está en operación, además enciende el LED IND5.

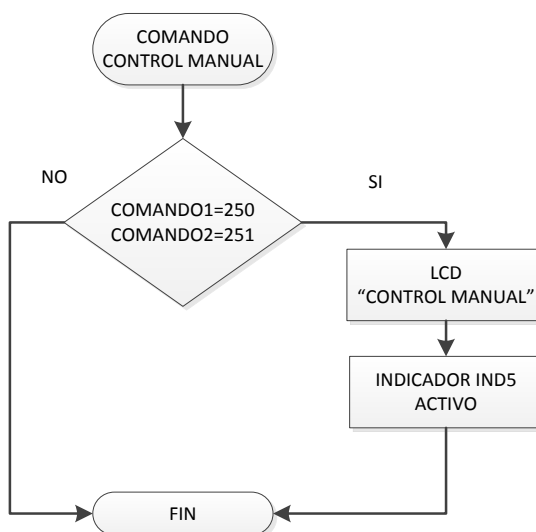


Figura 3.10 Diagrama de flujo del comando de control manual.

3.1.10.2 Comando de control con brazos

De igual manera una vez que en el HMI se ha seleccionado la opción de control con brazos, y se dé inicio a la ejecución del mismo, el HMI emite un comando de dos bytes; el primer byte 249 advierte al sistema robótico que se ejecutará un control con brazos, y el segundo byte 251 advierte al sistema para que pase a un estado activo y presto a recibir datos. El microprocesador por medio del LCD muestra que se está corriendo un control con brazos, y también el indicador IND5 se enciende.

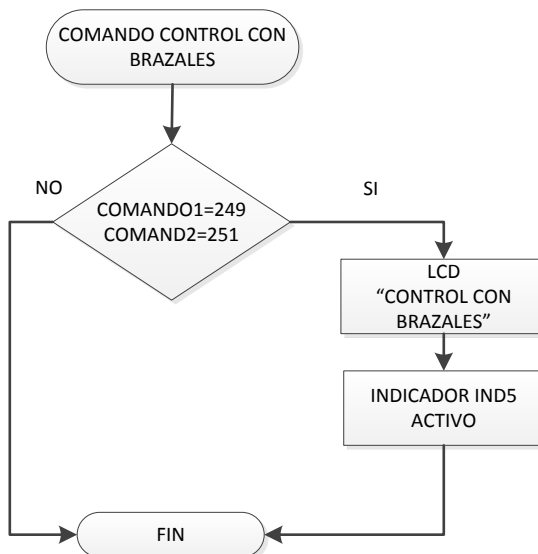


Figura 3.11 Diagrama de flujo del comando de control con brazales

3.1.10.3 Comando de fin de control

Una vez que en el HMI se detiene el sistema de control en ejecución, éste envía un comando de un byte 252 al sistema microprocesado por medio del bus serial COM1; este comando es decodificado para emprender una subrutina, en la cual el sistema pasa al estado de pausa hasta una nueva ejecución de un sistema de control en el HMI, además se desactiva el incremento del contador de error, Figura 3.12.

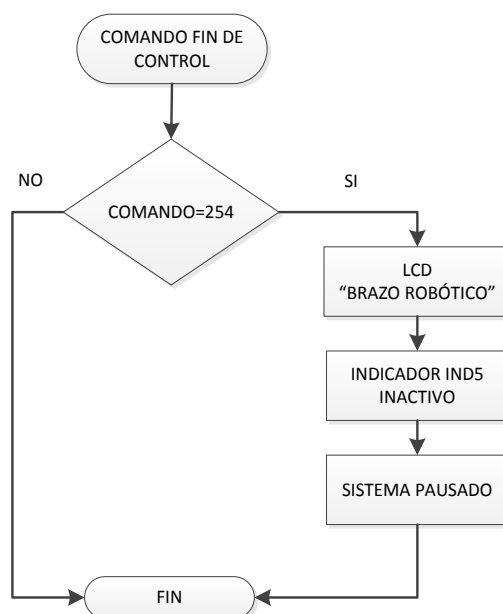


Figura 3.12 Diagrama de flujo del comando de fin de control

3.1.11 INTERRUPCIONES

Para la decodificación de los pulsadores empleados en el panel frontal, se empleó una codificación por hardware empleando una interrupción (INT2). Por lo cual cuando el sistema microprocesado detecta una interrupción al accionar cualquier pulsador, ejecuta una subrutina en la cual se leen los pines correspondientes a los pulsadores P1, P2, y P3, y de acuerdo PIN en nivel bajo (pulsador accionado) procederá a ejecutar la respectiva acción programada (detalladas en puntos anteriores).

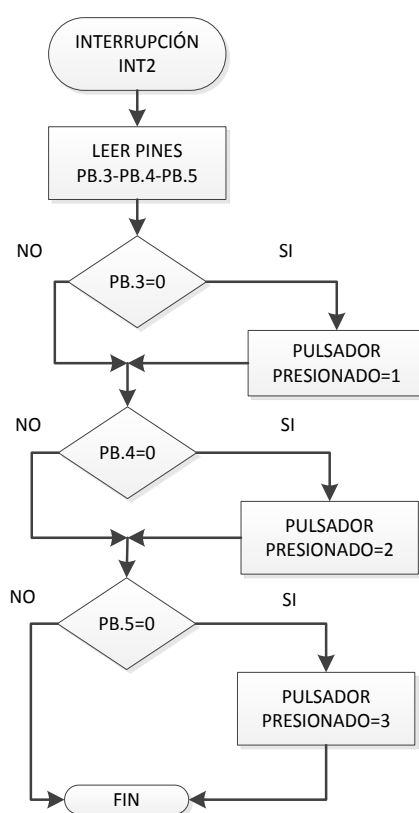


Figura 3.13 Diagrama de flujo de la interrupción

3.2 PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE BRAZALES

El funcionamiento del sistema de brazales depende principalmente de un microcontrolador ATMEGA164P (MC2), mismo que se encarga de la adquisición de las señales de los sensores ópticos de la muñeca y mano para posteriormente enviarlas al computador cuando éste solicita datos; además realiza los

requerimientos de datos a los sensores IMU a través del envío de comandos, para que a su vez envíen los datos correspondientes al PC.

3.2.1 PROGRAMA PRINCIPAL

Seguido de la energización del sistema microprocesado, se emprende la configuración de: puertos de entrada y salida, definición e inicialización de variables, puertos de comunicación serial, interrupción empleada para el pulsador 1, conversor análogo-digital.

Después de la configuración de los recursos a utilizarse, el sistema microprocesado transmite un comando a través del UART1 (COM2) para encerrar los giroscopios de los sensores IMU, y el led IND1 da la señal visual de la acción en mención. Finalmente el sistema permanece en un estado de inactividad y presto a establecer el enlace de comunicación con el computador.

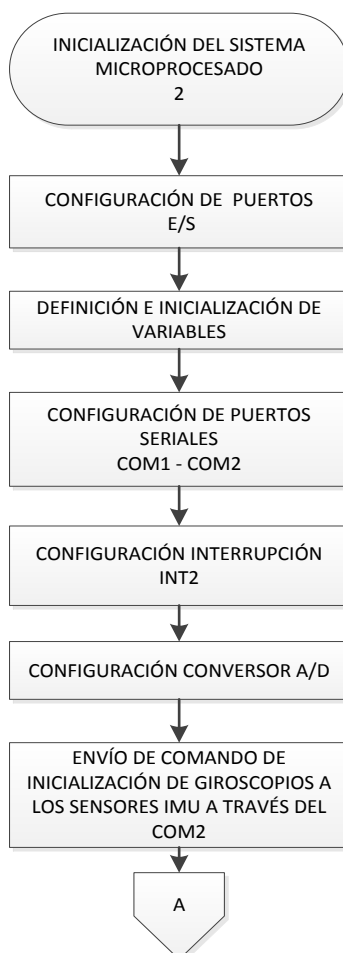


Figura 3.14 Diagrama de flujo del programa principal (MC2)

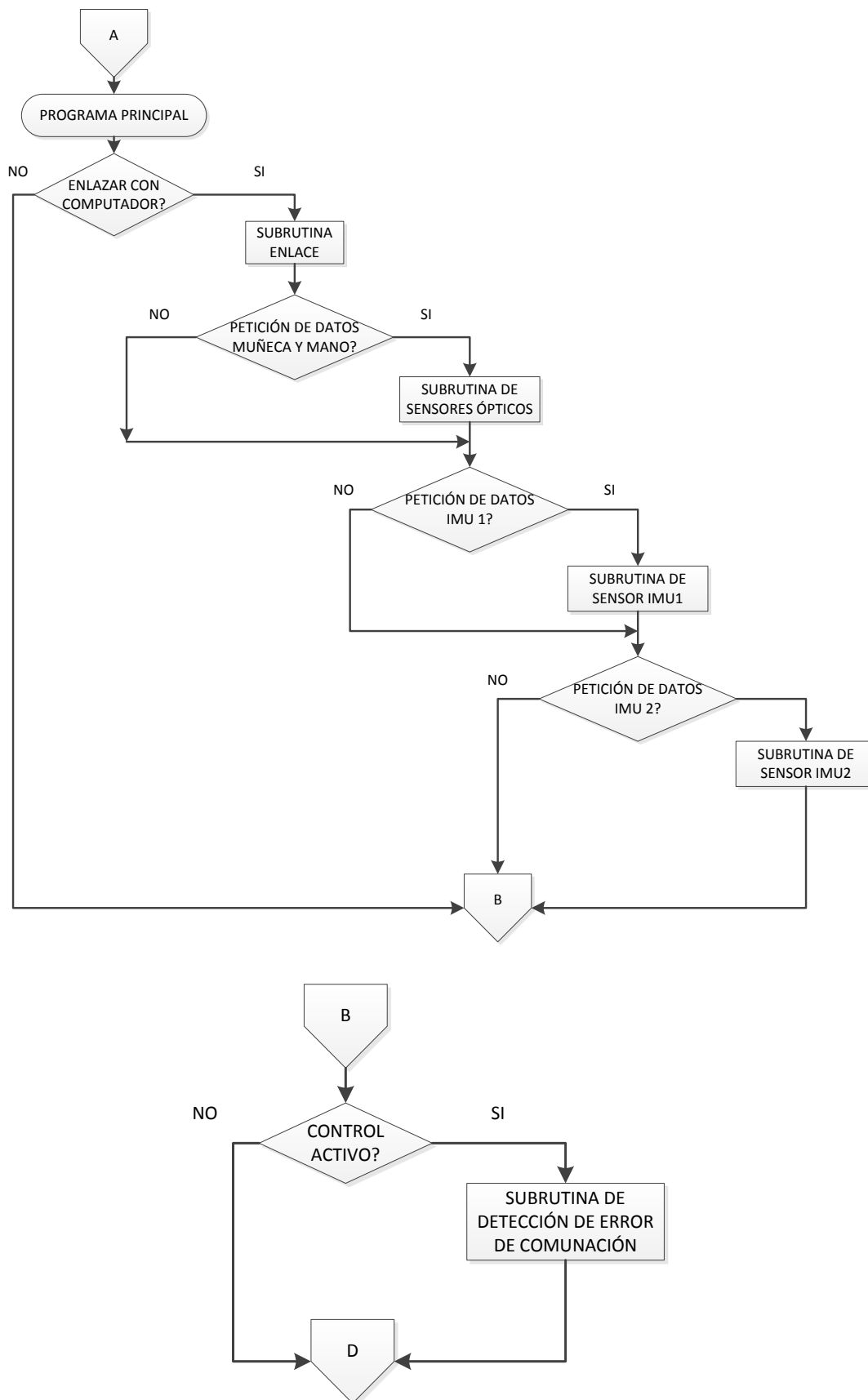


Figura 3.14 Diagrama de flujo del programa principal (MC2) (continuación)

3.2.2 SUBROUTINA DEL ENLACE SISTEMA DE BRAZALES – PC

La comunicación entre el sistema de brazales con el computador es indispensable para un buen funcionamiento, de esta manera se desarrolló una etapa de enlace la misma que puede ser ejecutada luego de que el sistema microprocesado (MC2) se haya inicializado y además se accione el pulsador 1 (P1), que por medio de la interrupción 2 se decodifique la acción como un inicio de conexión con el computador, de esta forma en el programa principal se ejecuta una subrutina en la cual se envía un comando de un byte (201) al computador solicitando una respuesta; el indicador tipo LED IND3 parpadea mientras el sistema intenta establecer la comunicación.

Una vez que el computador responde con un comando de un byte (200) automáticamente el sistema reafirma la comunicación física haciendo que el indicador IND3 este activo y el sistema pase a un modo de pausa presto a la ejecución de control desde el HMI.

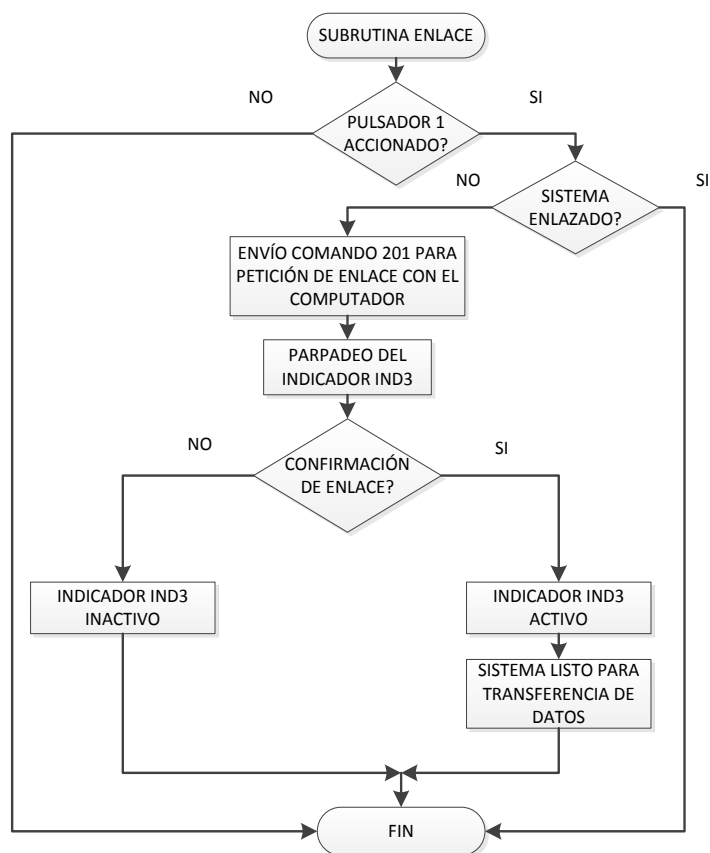


Figura 3.15 Diagrama de flujo de enlace sistema-computador

3.2.3 SUBROUTINA DEL SISTEMA DE SENSORES ÓPTICOS

Durante la ejecución del control con brazales en el HMI, el computador envía continuamente un comando de un byte 203 el cual es decodificado por el sistema de brazales como solicitud de los datos de los sensores de la muñeca y la mano. Luego de la decodificación del comando respectivo se da inicio a una subrutina en la cual por medio del conversor A/D se adquiere 5 datos de cada sensor promediándolos para filtrar digitalmente dichas señales; posterior a la recolección de datos, éstos son compactados en una trama de 4 bytes dentro de los cuales se tiene un byte de inicio y otro de fin, esta trama es enviada al PC por el bus serial. Para la transmisión de los datos al PC, el sistema microprocesado controla un multiplexor con el propósito de seleccionar si el propio microprocesador o los uno de los dos sensores IMU está habilitado para usar la línea de transmisión de datos al PC; en este caso donde el computador hace petición de los datos de los sensores ópticos, el microprocesador domina la línea de transmisión serial de datos (habilita línea 1).

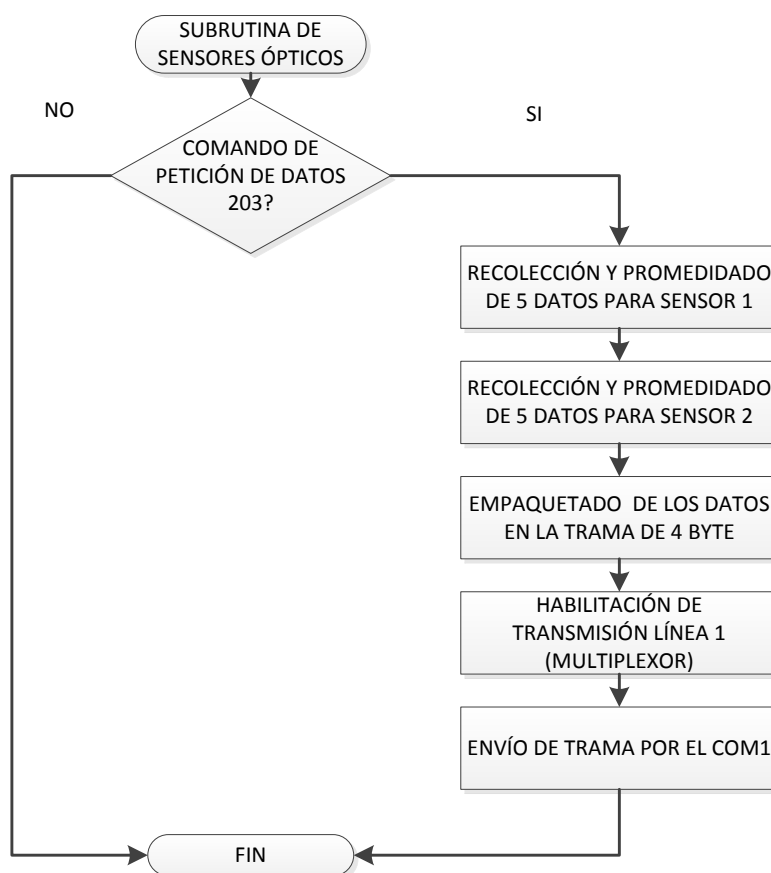


Figura 3.16 Diagrama de flujo de subrutina de sensores

Tabla 3.4 Trama de envío de datos de los sensores ópticos.

Byte Inicio	Dato Sensor	Dato Sensor	Byte Fin
250	1	2	251

3.2.4 SUBROUTINA DE LOS SENSORES IMU CHR-UM6

Cuando se ejecuta el control con brazales, el HMI solicita continuamente datos de los ángulos de Euler a los sensores IMU (CHR-UM6) por medio del microcontrolador, ya que éste efectúa una función de puente. En el presente proyecto se ha hecho uso de la salida de los ángulos de Euler proporcionados por el sensor IMU CHR-UM6, mismo que internamente hace uso de un filtro extendido de KALMAN EKF que brinda una buena estimación de dichos ángulos, facilitando el uso de los mismo para el control del brazo robótico. De acuerdo al manual del sensor CHR-UM6, los ángulos de Euler se encuentran en dos registros de datos, en un primer registro de 32 bits se encuentran los ángulos pitch (cabeceo-16bits) y roll (balanceo-16bits), y en el segundo registro de 32 bits se encuentra el ángulo yaw (orientación-16bits). Para poder acceder a estos registros de datos es necesario enviar un comando 7 bytes, cuyas tramas son:

Tabla 3.5 Trama para ángulos pitch y roll (trama IMU-1).

's'	'n'	'p'	Tipo de paquete	Dirección	Chequeo de suma 1	Chequeo de suma 0
115	110	112	0	98	1	179

Tabla 3.6 Trama para el ángulo yaw (trama IMU-2).

's'	'n'	'p'	Tipo de paquete	Dirección	Chequeo de suma 1	Chequeo de suma 0
115	110	112	0	99	1	180

- Los primeros 3 bytes (s, n, p) indican el inicio de un nuevo paquete de datos.
- El byte de tipo de paquete describe la función y longitud del paquete, como se va a leer los datos de registros, este byte toma el valor de 0.
- El byte de dirección especifica el registro a ser leído.
- Los dos bytes finales (chequeo de suma 0 y 1) verifica los bytes con la finalidad de detectar errores posibles en la lectura o escritura de registros.

Como se va a leer 2 registros de datos de los dos sensores IMU empleados, fue necesario trabajar cuatro comandos los cuales son enviados desde el HMI al sistema microprocesado, estos comandos son:

- **Comando 204:** solicita datos de ángulos pitch y roll de la IMU1 (trama IMU-1).
- **Comando 205:** solicita dato del ángulo yaw de la IMU1 (trama IMU-2).
- **Comando 206:** solicita datos de ángulos pitch y roll de la IMU2 (trama IMU-1).
- **Comando 207:** solicita dato del ángulo yaw de la IMU2 (trama IMU-2).

Una vez que el sistema microprocesado ha recibido un comando solicitando datos, procede a ejecutar una subrutina en la cual se decodifica el comando y según sea el caso, se selecciona el dispositivo que toma la línea serial para la transmisión de datos (IMU 1: línea 2; IMU 2: línea 3).

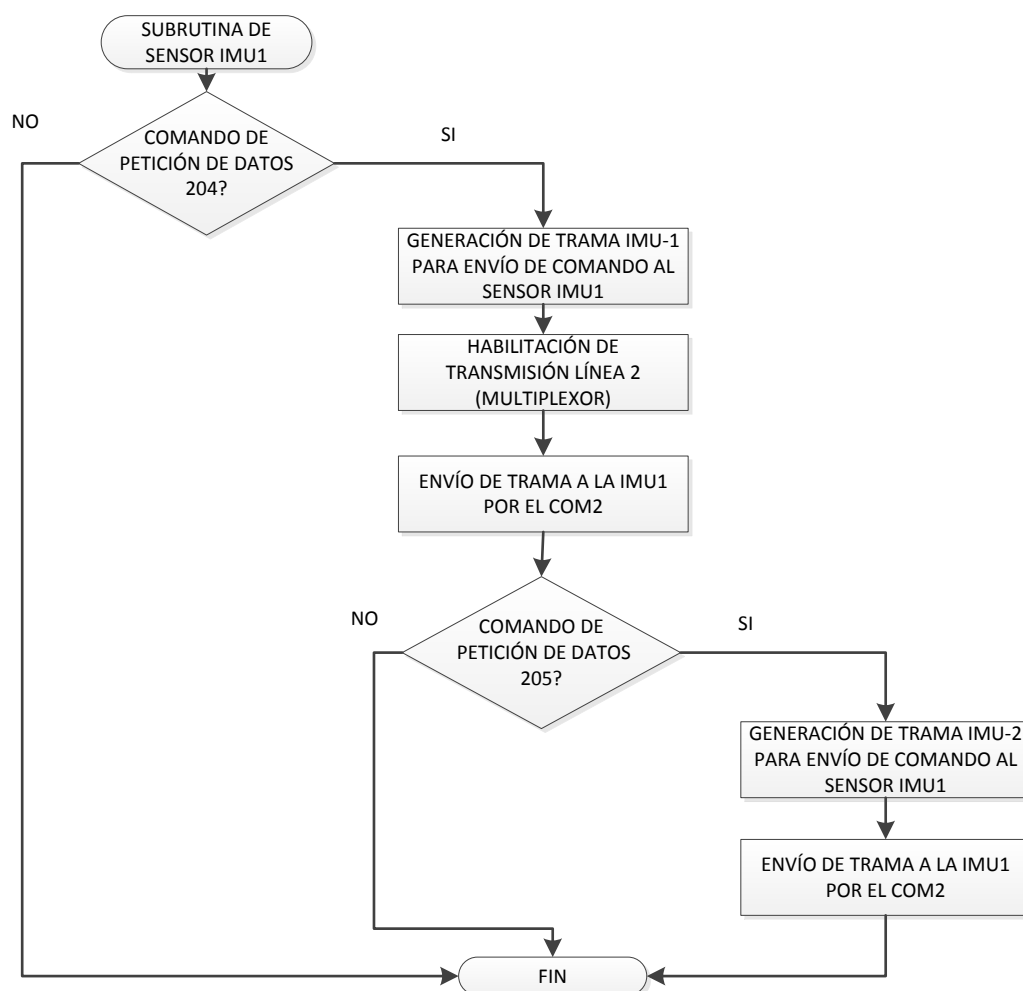


Figura 3.17 Diagrama de flujo de subrutina de IMU1

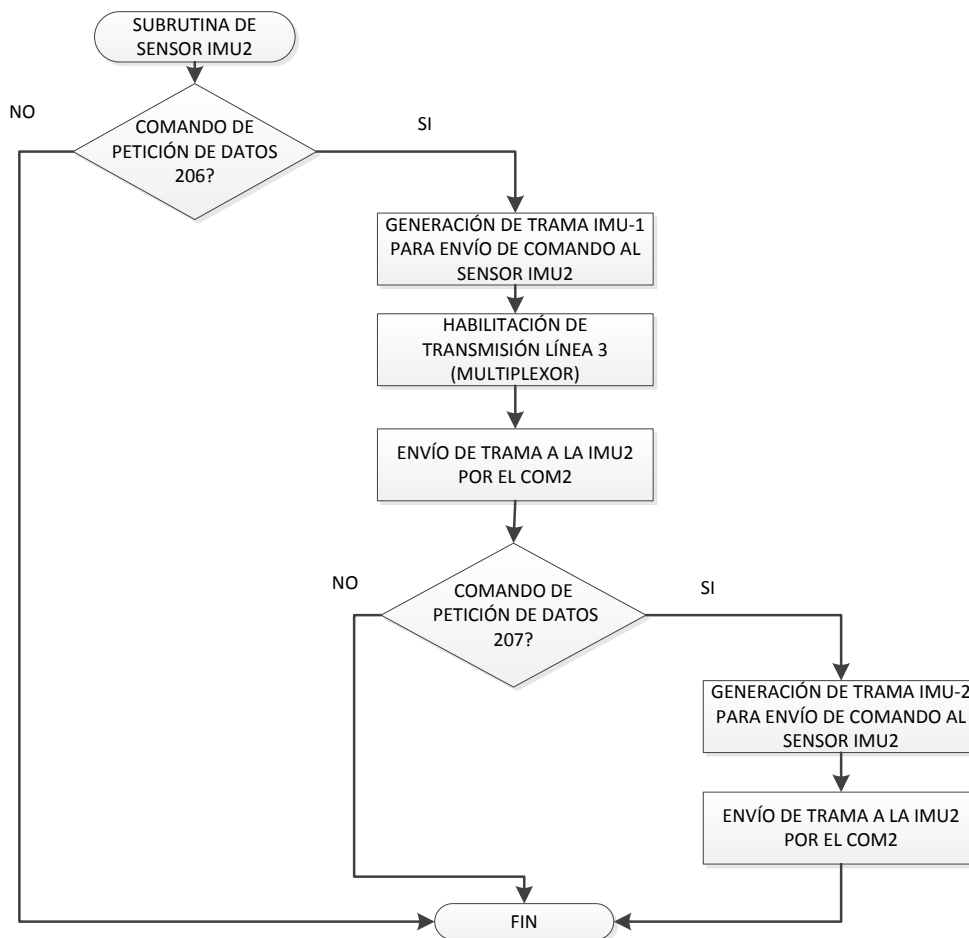


Figura 3.18 Diagrama de flujo de subrutina de IMU2

3.2.5 SUBROUTINA DE DETECCIÓN DE ERROR EN LA COMUNICACIÓN

La función empleada para la detección de errores implementado en el sistema microprocesado del robot es usada de igual forma por el sistema de brazos, enfocándose en el mismo objetivo de evitar funcionamientos erróneos del sistema cuando existe falla en el HMI o desconexión del cable de comunicación.

Desde esta perspectiva se ha trabajado con un contador, mismo que es reiniciado cada vez que el sistema recibe un dato desde el HMI; en el caso de no detectar datos seriales, el valor del contador incrementará progresivamente y al llegar al límite establecido, el sistema entiende que se perdió comunicación por lo que su funcionamiento es bloqueado y el indicador IND1 parpadea indicando que se generó un error de comunicación.

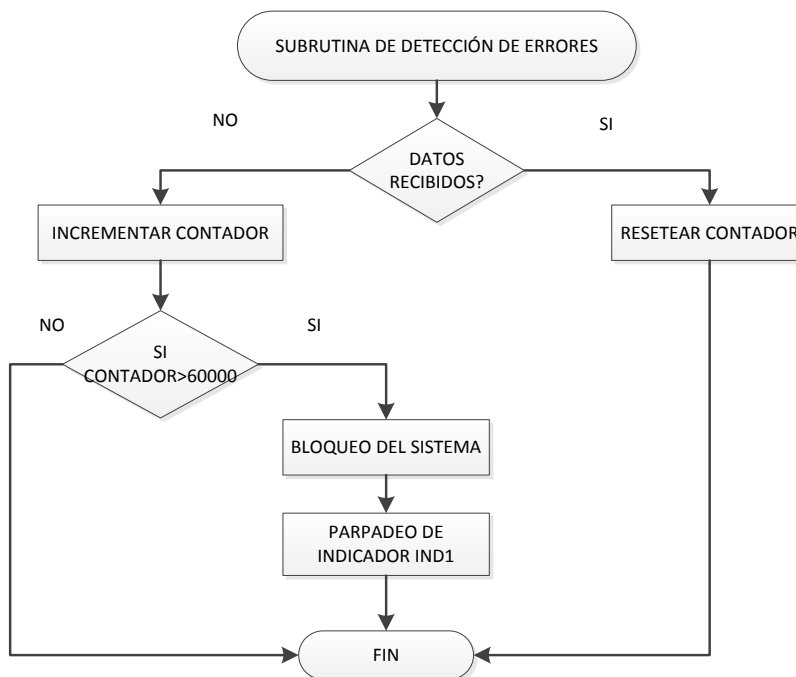


Figura 3.19 Diagrama de flujo de subrutina de detección de error

3.2.6 COMANDOS DE CONTROL

Los comandos son enviados desde el HMI para controlar el modo de operación del sistema de brazos.

3.2.6.1 Comando de control activo

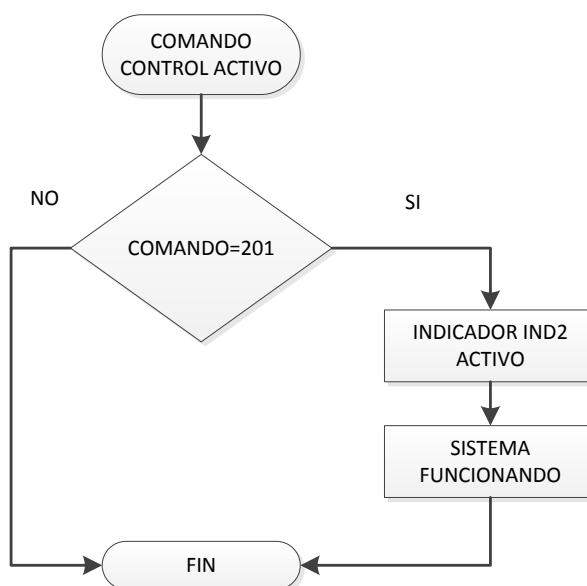
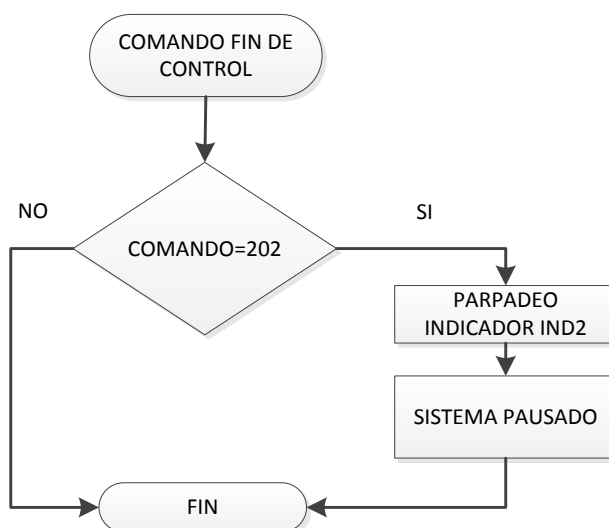


Figura 3.20 Diagrama de flujo de subrutina de control activo

Cuando se selecciona y se ejecuta el control de brazales en el HMI, se transmite un comando de un byte 201 que permite que el sistema microprocesado pase a un estado de funcionamiento (IND2 activo) y esté presto a recibir los comandos respectivos para el control (Figura 3.20).

3.2.6.2 Comando de fin de control

Cuando se finaliza la ejecución del control en el HMI, éste emite un comando de un byte 202 al sistema microprocesado (MC2) donde se decodifica y pone al mismo en un estado de pausa hasta una posterior ejecución de control en el HMI; adicionalmente el microcontrolador hace parpadear el indicador IND2 dando a entender que el sistema se encuentra en modo de pausa.



. **Figura 3.21 Diagrama de flujo de subrutina de finalización del control**

3.2.6.3 Comando para el encendido de los giroscopios del sensor IMU CHR-UM6

Un aspecto muy importante a considerar dentro del funcionamiento del sensor CHR-UM6, es el encendido de los giroscopios debido a que son sensibles a las variaciones de temperatura, y por recomendación del fabricante los giroscopios deben ser inicializados cada vez que se energiza el sensor y periódicamente mediante un comando especificado en el manual de usuario, cuya trama se muestra en la Tabla 3.7; de acuerdo a lo dicho se implementó un comando de un byte 210 que es emitido desde el HMI al sistema microprocesado, para que éste a su vez envíe la trama de 7 bytes por el UART1 (COM2) a los dos sensores IMU.

Tabla 3.7 Trama para el encerado de los giroscopios (IMU-3).

's'	'n'	'p'	Tipo de paquete	Dirección	Chequeo de suma 1	Chequeo de suma 0
115	110	112	0	172	1	253

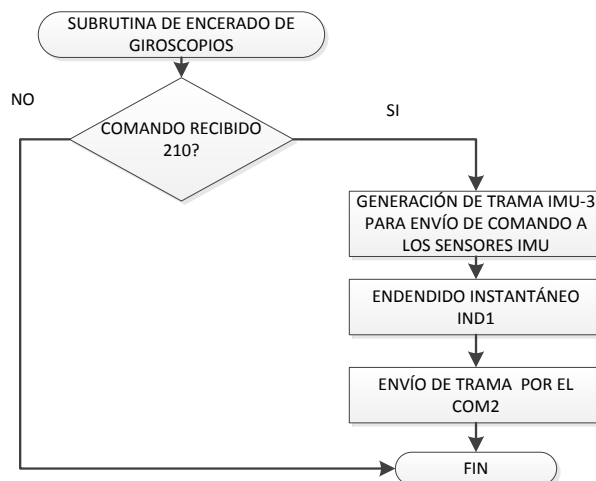


Figura 3.22 Diagrama de flujo de subrutina de encerado de los giroscopios

3.2.7 INTERRUPCIONES

Para la detección del accionamiento del pulsador de inicio de enlace se empleó la interrupción INT2, que al tener un nivel bajo en el PIN PB.1 se ejecuta la subrutina respectiva, misma que se muestra en la Figura 3.23.

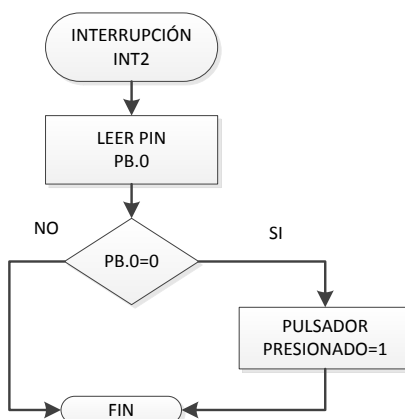


Figura 3.23 Diagrama de flujo de la interrupción

3.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

El HMI para el control del sistema robótico fue desarrollado en el programa LabVIEW 2011, ya que por su gran versatilidad en la programación gráfica, fue factible su uso en el presente proyecto.

El HMI desarrollado permite hacer el control del brazo robótico en dos modos: el primero es un control manual, en el cual el usuario puede tener acceso a controles de cada articulación del robot para constatar el movimiento de todo el sistema robótico; un segundo modo es el control con brazales en el cual el HMI está netamente ligado a los datos adquiridos del sistema de brazales, a partir de los cuales se controlan los movimientos del robot logrando la emulación de los movimientos realizados por el brazo humano.

Para que la interfaz sea lo más interactiva se han añadido indicadores de funcionamiento, indicadores de alertas del sistema, indicadores de los valores de los ángulos de cada articulación en tiempo real y además un sistema de controles para la configuración de funcionamiento y control del sistema.

Finalmente se tiene un indicador gráfico en el cual se puede ver como el controlador actúa sobre cada articulación frente a cambios en el punto de ajuste, con el afán de que el usuario pueda constatar la compensación del sistema de control.

El HMI emplea un controlador PID para cada articulación con el fin de obtener movimientos suaves por parte de la estructura robótica y eliminar el error en estado estable. Dentro del HMI se tiene un panel frontal y un panel de control que permiten un mejor ordenamiento de indicadores y controles del sistema; estos son detallados en los siguientes puntos.

3.3.1 PANEL PRINCIPAL

El panel principal ha sido diseñado con la finalidad de que el usuario pueda intuir el funcionamiento del sistema y también pueda configurar el modo de operación (tipo de control), en la Figura 3.24 se presenta el panel principal, dentro del cual se ha separado alfabéticamente indicadores y controles para ser detallados posteriormente.



Figura 3.24 Panel principal del HMI

- a. En este panel se pueden configurar los puertos de comunicación a utilizarse tanto para el sistema robótico como para el sistema de brazos, los cuales deben ser identificados para evitar errores en la comunicación. Adicionalmente se puede configurar el modo de control sobre el sistema robótico (manual o con brazos) tal como se muestra en la Figura 3.25.



Figura 3.25 Panel a: configuración puertos seriales y configuración del modo de control

- b. En este panel el usuario podrá ejecutar el modo de control que se haya establecido en el panel del literal (a), para ello se debe accionar el botón

“INICIAR” y posteriormente el HMI iniciará la ejecución del control enviando los comandos correspondientes al sistema robótico.

Únicamente se podrá ejecutar el sistema de control si el HMI ha confirmado la comunicación con los sistemas: robótico y brazos. Para detener el modo de control en operación se debe accionar el botón “DETENER” con lo cual el HMI emitirá los comandos correspondientes al sistema robótico para que entre en el modo de pausa y además el brazo robótico será ubicado en su posición inicial.



Figura 3.26 Panel b: inicio y fin de la ejecución del control

- c. Este panel contiene tres indicadores que advierten el estado operacional del sistema en conjunto. El indicador 1 se enciende una vez que el HMI haya verificado la comunicación física con los sistemas: robótico y brazos; el indicador 2 es activado únicamente cuando un modo de control está siendo ejecutado; finalmente el indicador 3 se activa cuando existe error en la comunicación con alguno de los sistemas (robótico y brazos).



Figura 3.27 Panel c: indicadores del estado operacional del sistema en conjunto

- d. En este pequeño panel se tiene un control tipo botón que al accionarlo permite enviar el comando correspondiente al sistema microprocesado MC2 (brazales) con el propósito de encerrar los giroscopios de los sensores IMU 1 y 2.



Figura 3.28 Panel d: envío de comando para encendido de los giroscopios de los sensores IMU 1 y 2

- e. Aquí se dispone de un control que posibilita detener la ejecución del HMI.



Figura 3.29 Panel e: fin de la ejecución del HMI

- f. Se tiene un indicador que por medio de una pluma y la escala graduada permiten al usuario ubicarse, de modo que la orientación del sensor IMU1 (ángulo yaw) esté en la zona válida de la escala, con la intención de establecer la posición inicial a partir de la cual el usuario pueda efectuar movimientos de su brazo.



Figura 3.30 Panel f: posición inicial válida del sensor IMU1

- g. En este panel se tienen 6 indicadores que se van encendiendo progresivamente conforme el usuario ubique cada articulación de su brazo en la posición anatómica inicial, de esta manera el HMI pueda ejecutar el modo de control con brazales desde una posición referencial.



Figura 3.31 Panel g: posición inicial del brazo humano para inicio del control

- h. Este panel dispone de dos indicadores textuales (avisos), de los cuales el primer cuadro presenta la información general del funcionamiento del HMI, el segundo cuadro muestra textualmente sugerencias que incluyen los posibles errores de comunicación con los sistemas: robótico y brazales.

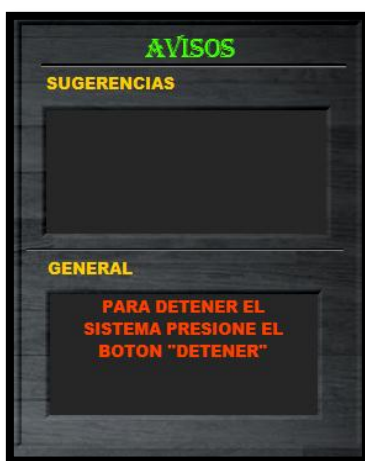


Figura 3.32 Panel h: indicadores textuales del sistema (sugerencias-general)

3.3.2 PANEL DE CONTROL

El panel de control ha sido diseñado para que el usuario pueda hacer uso de los controles que posibilitan la movilidad del brazo robótico en el caso del control manual; además de acceder a varios indicadores que serán detallados más adelante.

En la Figura 3.33 se presenta el panel de control donde sus componentes han sido alfabetizados para ser aclarados posteriormente.



Figura 3.33 Panel de control del HMI

- a. En este panel se disponen de 12 indicadores, de los cuales 6 muestran el valor del punto de ajuste de cada articulación del robot, los 6 indicadores restantes muestran el valor de las señales procesadas de los sensores del robot (señales de realimentación).



Figura 3.34 Panel a: indicadores de punto de ajuste y señales de realimentación

- b. Se dispone de un submenú desplegable que posibilita la selección de la articulación en particular, para visualizar gráficamente la compensación y acción de control del PID.



Figura 3.35 Panel b: selección de la visualización del control de una articulación en particular

- c. En este panel se dispone de 3 indicadores de los cuales se tiene: un indicador que señala de que el sistema de control está en operación, un segundo indicador que se activa cuando existe error en la comunicación con los sistemas (robótico y/o brazales), y un indicador que nos permite saber si estamos en una zona válida de orientación para el sensor IMU1 (ángulo yaw).

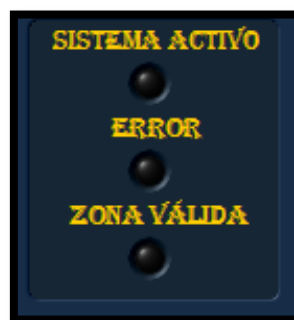


Figura 3.36 Panel c: indicadores

- d. Se dispone de un indicador gráfico en el cual se muestra la señal de punto de ajuste y la señal de realimentación de una articulación seleccionada, esto con la finalidad de ver la funcionalidad del control PID para mantener fija la posición de cada articulación de acuerdo al punto de ajuste, además permite constatar la compensación a errores existentes debido a perturbaciones internas o externas al sistema.



Figura 3.37 Panel d: indicador gráfico de control

- e. Se tiene un indicador de texto, en el cual se muestra el modo de control en ejecución, es decir si se hace un control manual, o un control con brazales.



Figura 3.38 Panel b: indicador textual del modo de control en ejecución

- f. En este panel se puede acceder a 6 controles tipo deslizadores, que permiten controlar el movimiento angular de cada una de las articulaciones del robot solo si el control manual está siendo ejecutando.



Figura 3.39 Panel f: deslizadores para el control del sistema robótico

- g. En este panel se dispone de un indicador de dos plumas y una escala graduada, que de igual manera permiten visualizar la compensación y el control realizado con el PID; la primera pluma (azul) indica el valor de punto de ajuste y la segunda pluma (roja) indica el valor de realimentación.



Figura 3.40 Panel g: indicador de control mediante plumas

- h. Se dispone de un indicador tipo brújula, en la cual una pluma (roja) indica la orientación del sensor IMU1 por medio del valor del ángulo yaw, además señala si el usuario está en la zona válida de operación.



Figura 3.41 Panel h: indicador tipo brújula

- i. Finalmente se dispone de un indicador textual, el cual parpadea y muestra que la ubicación del brazo humano junto con los sensores inerciales están en una posición restringida bloqueando ciertos movimientos.

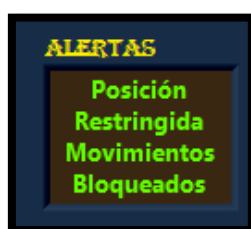


Figura 3.42 Panel h: indicador tipo brújula

3.3.3 DIAGRAMA DE BLOQUES

3.3.3.1 Programación del enlace sistema robótico/brazales con el computador

Una característica importante dentro del sistema HMI radica en establecer y constatar el enlace de comunicación con el sistema robótico y con el sistema de brazos, por lo que se ha utilizado una estructura WHILE dentro de la cual se hace una constante lectura del puerto serial para identificar si se ha transmitido el comando de petición de enlace desde de los sistemas microprocesados (robótico y brazos). Una particularidad de la programación en este lazo, es que una vez que pasan 30 segundos y no se recibe el comando, automáticamente se genera un error al establecer la comunicación.

Una vez que se recibe el comando, en otro lazo WHILE se procede a emitir el comando de confirmación de comunicación a los sistemas robótico y de brazos.

Esta modalidad de programación se utilizó tanto para el enlace del PC-sistema robótico como para el enlace PC-sistema de brazos.

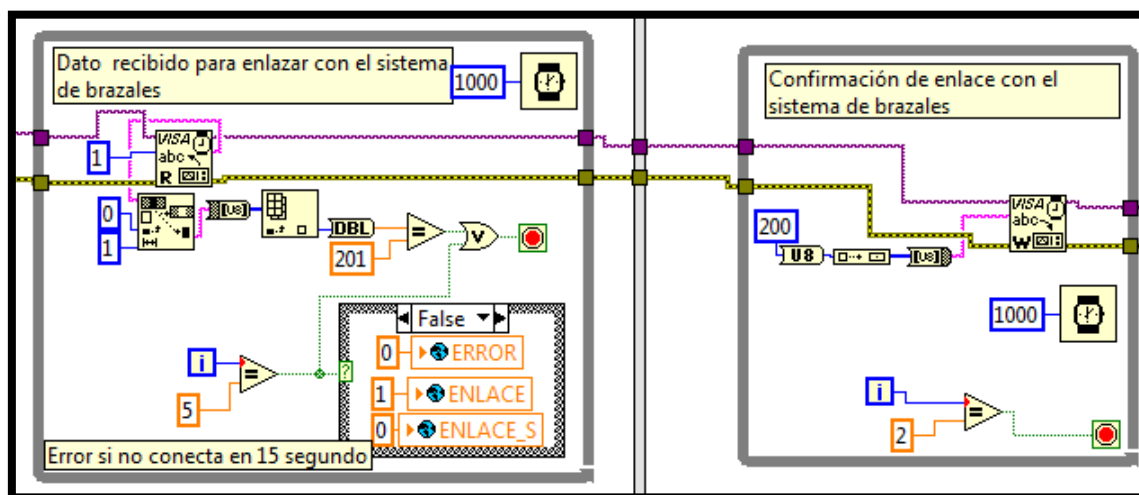


Figura 3.43 Diagrama de bloques del sistema de enlace

3.3.3.2 Programación para la recepción de datos del sistema robótico

Para efectuar la recepción de datos de los sensores del sistema robótico se ha trabajado con un SUB VI, en el cual se envía por el bus serial el comando para la petición de los datos al microprocesador y éste a su vez responde con la trama de 8 bytes que se mencionó con anterioridad.

A continuación el SUB VI procede a identificar si los bytes de inicio y de fin corresponden a la trama esperada, si es así los datos son almacenados en las respectivas variables globales (D1, D2, D3, D4, D5 y D6), tal como se muestra en el siguiente diagrama:

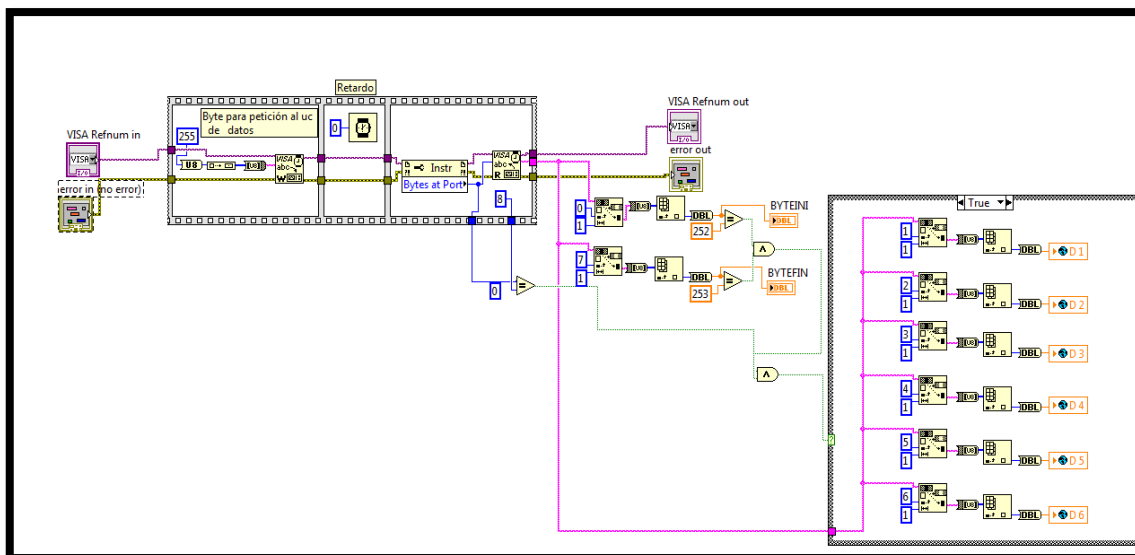


Figura 3.44 Diagrama de bloques del sistema de enlace

Esta forma de recibir los datos provenientes de los sensores, ha sido aplicada de igual forma para obtener los datos de los sensores ópticos e IMU's del sistema de brazos, para lo cual se emplea un SUB VI que inicialmente envía el comando respectivo para la petición de datos al sistema de brazos y éste a su vez enviará la trama que es captada por el SUB VI a fin de identificar los bytes de la trama para posteriormente almacenar los datos en las variables globales pertinentes.

3.3.3.3 Acondicionamiento de datos de los sensores del sistema robótico

Los datos adquiridos del sistema robótico deben ser acondicionados de modo que la información obtenida esté en grados sexagesimales, para lo cual se han registrado datos cada 10° con la ayuda de transportadores ubicados en cada articulación de la estructura robótica; de esta manera se ha buscado determinar una ecuación de transformación que permita obtener los datos de los sensores en grados sexagesimales.

Sensor de la articulación 1:

Tabla 3.8 Datos adquiridos de la articulación 1.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	249
10	235
20	219
30	204
40	191
50	176
60	163
70	149
80	136
90	122
100	107
110	92
120	76
130	60
140	43
150	25
160	9
170	0

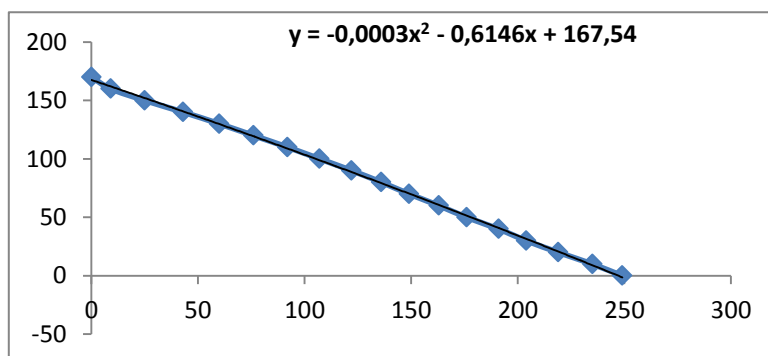


Figura 3.45 Estimación de la ecuación para la articulación 1

Sensor de la articulación 2:

Tabla 3.9 Datos adquiridos de la articulación 2.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	69
10	79
20	89

30	100
40	110
50	121
60	131
70	142
80	153
90	165
100	178
110	191
120	202
130	216

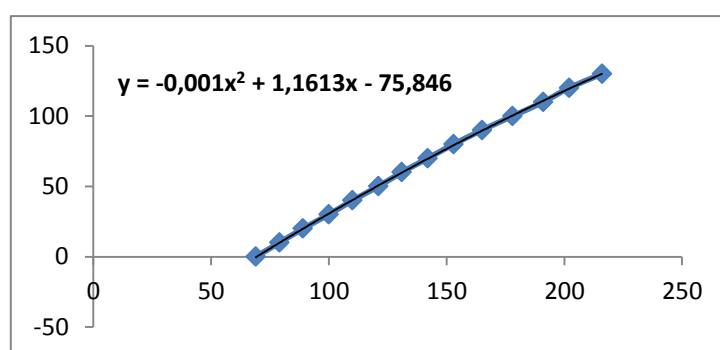


Figura 3.46 Estimación de la ecuación para la articulación2

Sensor de la articulación 3:

Tabla 3.10 Datos adquiridos de la articulación 3.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	185
10	175
20	165
30	155
40	146
50	137
60	127
70	118
80	109
90	100
100	90
110	81
120	74
130	65
140	57
150	48

160	40
170	28
180	20

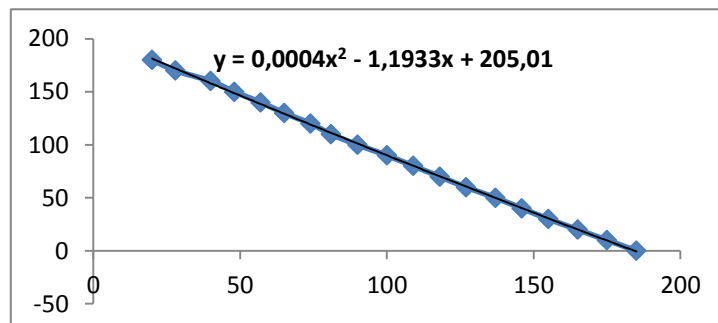


Figura 3.47 Estimación de la ecuación para la articulación 3

Sensor de la articulación 4:

Tabla 3.11 Datos adquiridos de la articulación 4.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	97
10	108
20	120
30	131
40	144
50	157
60	171
70	182
80	194
90	209
100	222
110	235
120	251

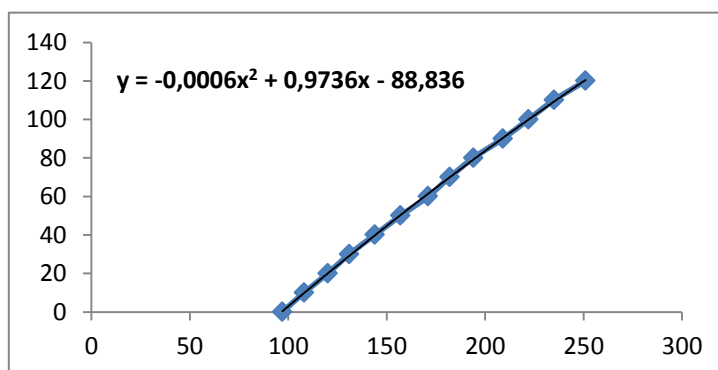


Figura 3.48 Estimación de la ecuación para la articulación 4

Sensor de la articulación 5:

Tabla 3.12 Datos adquiridos de la articulación 5.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	47
10	55
20	63
30	72
40	81
50	88
60	96
70	103
80	112
90	121
100	131
110	140
120	148
130	157

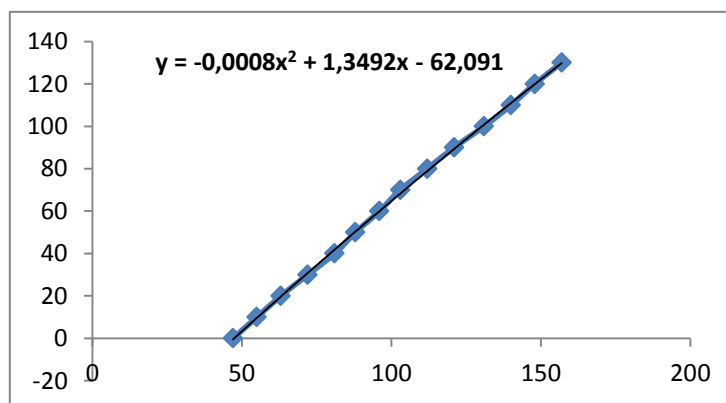


Figura 3.49 Estimación de la ecuación para la articulación 5

Sensor articulación 6:

Tabla 3.13 Datos adquiridos de la articulación 6.

ÁNGULO	DATO SENSOR
0	54
10	63
20	70
30	78
40	86
50	93

60	101
70	109
80	117
90	125
100	133
110	142
120	151

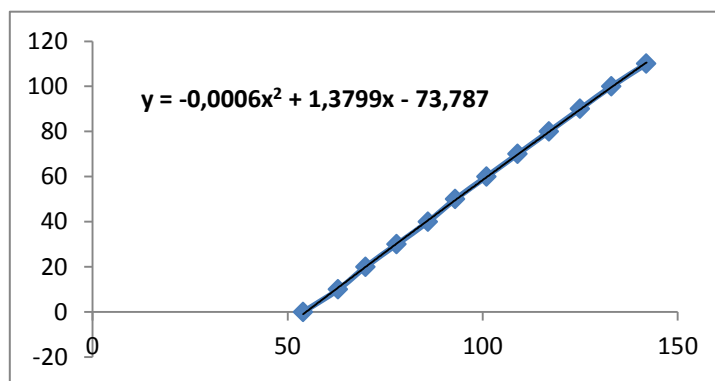


Figura 3.50 Estimación de la ecuación para la articulación 6

De acuerdo a las gráficas obtenidas de los datos de los sensores, se puede apreciar que existe una relación aproximadamente lineal entre el desplazamiento angular y la salida del sensor de una articulación en particular.

Para ello se ha estimado una ecuación de segundo orden con la finalidad de tener mayor exactitud; cada una de las ecuaciones determinadas fue implementada en el bloque "FORMULA NODE", el cual permite el manejo de expresiones matemáticas. Cada uno de estos bloques tiene una entrada y una salida, el dato de entrada es el valor almacenado en la variable correspondiente al dato obtenido de uno de los sensores (D1, D2, D3, D4, D5, D6).

La salida de este bloque genera un valor del ángulo de una articulación en grados sexagesimales, mismo que será usado como señal de realimentación para el controlador (R1, R2, R3, R4, R5, R6). En la Figura 3.50 se puede observar el acondicionamiento de las señales obtenidas de los sensores del sistema robótico.

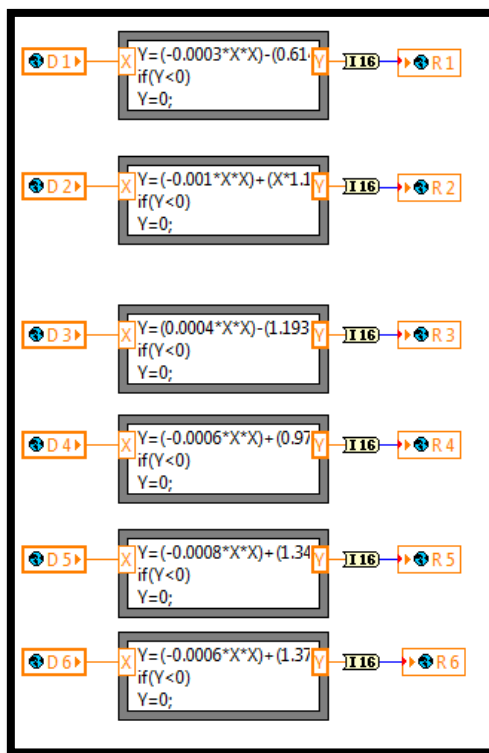


Figura 3.51 Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento para los datos de los sensores del robot

3.3.3.4 Acondicionamiento de datos de los sensores del sistema de brazos

Los datos obtenidos de los sensores ópticos son almacenados en las variables globales SB1 y SB2, que corresponden a los datos de la muñeca y la mano respectivamente. Estos datos son acondicionados haciendo una estimación lineal debido a la dificultad en la medición los movimientos angulares de la mano humana. En el caso de la muñeca se tomaron los valores mínimo, máximo, y el valor en el cual la muñeca está en la posición inicial es decir extendida completamente (posición media). Estos datos fueron relacionados con los valores límites de desplazamiento angular de la muñeca en la estructura robótica.

Tabla 3.14 Datos del sensor óptico 1.

	Máximo	Medio	Mínimo
Dato sensor	190	80	11
Ángulo muñeca	95°	15°	0°

Haciendo uso de los datos tabulados se obtienen ecuaciones que son de igual manera implementadas en un bloque "FORMULA NODE"; la necesidad de usar dos ecuaciones radica en la no linealidad de respuesta del sensor, por lo que se

emplea una ecuación para el movimiento de extensión y otra para el movimiento de flexión de la mano tomando como punto neutro cuando la muñeca ubica a la mano en la posición cero. Para el uso de las 2 ecuaciones se usó un “CASE STRUCTURE”.

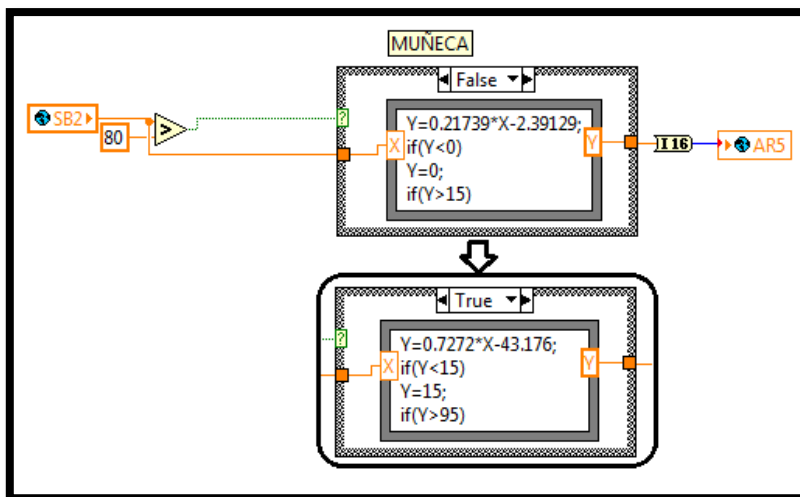


Figura 3.52 Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento para el dato del sensor óptico de la muñeca

Para el acondicionamiento del sensor de la mano orientado a la detección del movimiento de apertura y cierre de la mano, se ha considerado los valores máximo y mínimo con el fin de determinar una ecuación lineal que permita relacionar con el movimiento angular del efector final de la estructura robótica, puesto que la salida del sensor no es lineal, no fue crítico hacer la estimación lineal ya que el sensor solo permite dar la acción de agarre al efector final del robot y no es considerado como articulación.

Tabla 3.15 Datos del sensor óptico 2.

	Máximo	Mínimo
Dato sensor	13	153
Ángulo efector final	120°	0°

De acuerdo con los datos, la ecuación resultante fue implementada en un bloque “FORMULA NODE”, como se presenta a continuación:

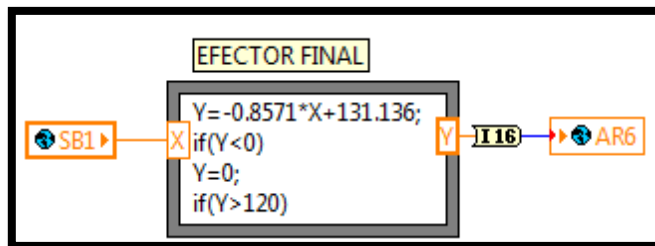


Figura 3.53 Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento para el dato del sensor óptico de la mano

Los datos almacenados en las variables globales correspondientes a los sensores IMU están codificados en enteros en complemento a 2 (little-endian), por lo que de acuerdo al manual del sensor sugiere multiplicar el valor entero de 16 bits por el factor de escala 0.0109863 para obtener el valor en grados sexagesimales. Dado que el valor de los ángulos pitch, roll y yaw están almacenados en 2 variables de 8 Bits cada uno, se ha procedido a empaquetarlos en enteros con signo de 16 bits y estos valores se multiplican por el factor de escala tal como se muestra en el siguiente diagrama de bloques compactado en un SUB-VI.

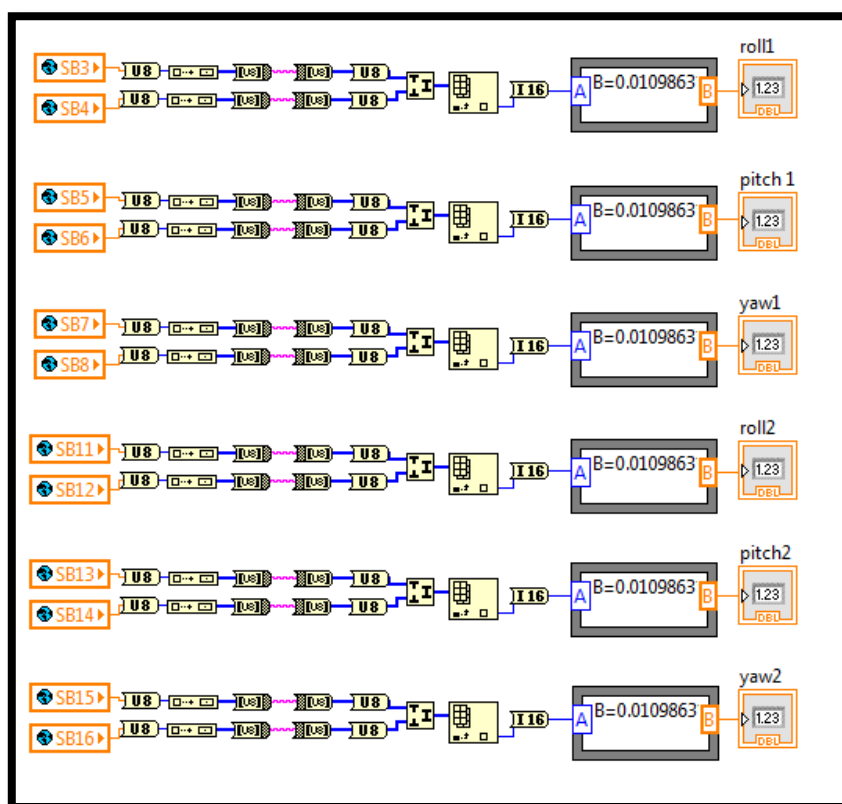


Figura 3.54 Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento para los datos de los sensores IMU (pitch, roll, yaw).

Los datos de los ángulos de Euler son usados como señales de punto de ajuste del controlador, para ello se hace la siguiente descripción:

- **Ángulo pitch sensor IMU1:** controla el movimiento de la articulación 1.
- **Ángulo roll sensor IMU1:** controla el movimiento de la articulación 3.
- **Ángulo yaw sensor IMU1:** controla el movimiento de la articulación 2.
- **Ángulo roll sensor IMU2:** controla el movimiento de la articulación 4.

3.3.3.5 Programación del controlador PID

En este proyecto se ha hecho uso de un controlador PID, que fue ideal para satisfacer los requerimientos de control en tiempo real, y lograr atenuar el error de posición producido por perturbaciones, sin afectar la estabilidad del sistema.

3.3.3.5.1 Controlador PID

Un controlador PID es ampliamente usado en varios campos debido a los favorables resultados que se pueden obtener con el uso del mismo. Dentro de un controlador PID se tienen tres acciones de control: acción proporcional, acción integral y acción derivativa; de allí las siglas del nombre del controlador PID [39] [40]. El funcionamiento de este controlador está ligado al error (diferencia) existente entre el punto de ajuste (setpoint) y el valor de la variable controlada (realimentación), es decir que el uso de este controlador compone un sistema en lazo cerrado tal como se muestra en el siguiente diagrama de bloques, donde $G(s)$ está dado por la función de transferencia de la planta a controlar [39] [40].

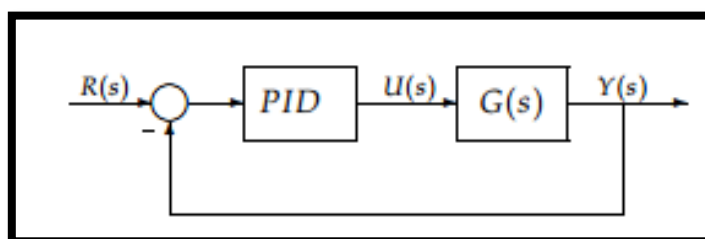


Figura 3.55 Diagrama de bloques controlador PID

- **Acción proporcional (P):** genera una salida que es directamente proporcional al error existente.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \qquad U(s) = K_p \qquad (3.1)$$

K_p es una constante de ganancia proporcional. Esta acción de control reduce pero no elimina por completo el error en estado estable [39] [40].

- **Acción Integral (I):** genera una señal de salida que es proporcional al error acumulado, es decir integra el error en el tiempo.

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt \quad U(s) = \frac{K_i}{s} \quad (3.2)$$

K_i es una constante de tiempo integral. Con esta acción de control se logra eliminar el error en estado estable [39] [40].

- **Acción derivativa (D):** la salida del controlador es proporcional a la derivada de la variación del error en el tiempo, cuyo propósito es estabilizar el sistema de una manera rápida teniendo un aspecto predictivo [39] [40].

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad U(s) = K_d \cdot s \quad (3.3)$$

Empleando una combinación de las acciones de control antes descritas, se pueden obtener controladores cuyos beneficios están dados por el tipo de acción de control que estos emplean. Entre los cuales se tienen:

- **Proporcional-integral (PI):** es un controlador que combina la acción proporcional y acción integral con el fin de eliminar el error en estado estable. Con este controlador se tiene una acción creciente si el error es positivo, y se tiene una acción decreciente si el error es negativo, de esta manera se justifica la eliminación del error en estado estable [39] [40].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt$$

$$U(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3.4)$$

T_i es una constante de tiempo integral, y domina el ajuste de la acción integral.

- **Proporcional-derivativa (PD):** es un controlador de combina la acción proporcional y acción derivativa; tiene un carácter predictivo que hace del controlador genere una respuesta correctiva rápida frente a una variación del error, evitando que la magnitud del error sea muy grande [39] [40].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = K_p + K_p \cdot T_d \cdot s \quad (3.5)$$

T_d es una constante de tiempo derivativo.

- **Proporcional-integral-derivativa (PID):** es un controlador que combina las tres acciones de control para obtener las ventajas de las mismas en un solo controlador, su finalidad radica en la atenuación del error en estado estable manteniendo la estabilidad del sistema, y de igual manera atenuar los errores producidos por perturbaciones externas o internas al sistema [39] [40].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.6)$$

El sistema a ser controlador en este proyecto, está constituido por 6 entradas y 6 salidas, que corresponden al control de las seis articulaciones del sistema robótico, por lo que en conjunto se tiene un sistema de control MIMO (Multiple-input Multiple-output) de varias entradas y salidas.

A pesar de constituirse un sistema MIMO, se ha optado por trabajar por sistemas independientes de una sola entrada y una sola salida (SISO single-input single-output), ya que la funcionalidad de cada articulación es independiente de las restantes. En este contexto la variable controlada viene a ser la posición angular de la articulación en particular. El diagrama de bloques del sistema de control para una articulación está dado en la siguiente gráfica:

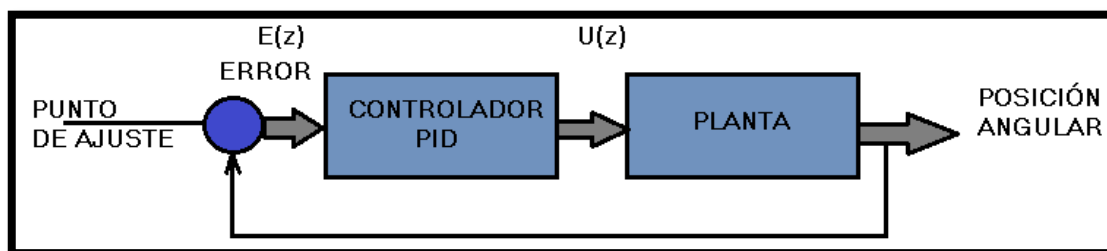


Figura 3.56 Diagrama de bloques del sistema de control de una articulación

Puesto que se trabajó con componentes digitales, fue necesario trabajar con un sistema de control en tiempo discreto, para lo cual se diseñó un PID digital partiendo de la función de transferencia del PID en el dominio de “S”.

$$PID = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (3.7)$$

Para transformar la ecuación de tiempo continuo a tiempo discreto se aplica el método de Tustin y el método de integración hacia adelante a la función de transferencia del PID en el plano “S” [41].

$$PID = K_p + K_i \cdot \left(\frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \right) + K_d \cdot \left(\frac{z-1}{Tz} \right) \quad (3.8)$$

$$PID = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{2} \cdot T + \frac{K_d}{T} \right) \cdot z^2 + \left(\frac{K_i}{2} \cdot T - K_p - 2 \cdot \frac{K_d}{T} \right) \cdot z + \frac{K_d}{T}}{z(z-1)}$$

$$U(z) \cdot [z^2 - z] = \left(K_p + \frac{K_i}{2} \cdot T + \frac{K_d}{T} \right) \cdot z^2 \cdot E(z) + \left(\frac{K_i}{2} \cdot T - K_p - 2 \cdot \frac{K_d}{T} \right) \cdot z \cdot E(z) + \frac{K_d}{T} \cdot E(z)$$

Aplicando la ley de control se tiene:

$$U[n] = U[n-1] + E[n] \left(K_p + \frac{K_i}{2} \cdot T + \frac{K_d}{T} \right) + E[n-1] \left(\frac{K_i}{2} \cdot T - K_p - 2 \cdot \frac{K_d}{T} \right) + E[n-2] \frac{K_d}{T} \quad (3.9)$$

La ecuación obtenida puede ser empleada en componentes digitales como: computadores, microcontroladores, FPGA, entre otros.

Para el presente proyecto la ecuación del PID en tiempo discreto se ha implementado en un bloque “FORMULA NODE”; con la finalidad de tener un control individual, sobre cada articulación se implementó el controlador en un SUB_VI independiente.

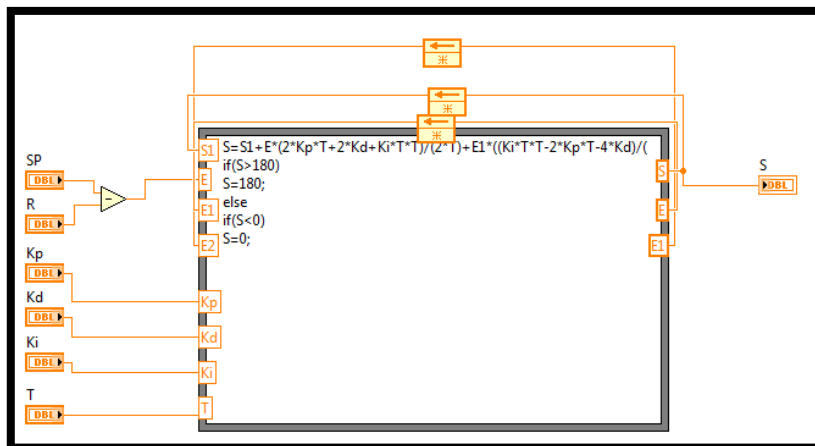


Figura 3.57 Diagrama de bloques del controlador PID

3.3.3.6 Datos de salida del controlador

El valor de las salidas de cada uno de los controladores PID está en grados sexagesimales, por lo que fue necesario convertir dichos datos a valores codificados adecuados para el posicionamiento angular de cada uno de los servomotores. Para ello se ha registrado medidas de los valores enviados a los servomotores y los ángulos correspondientes empleando transportadores, estos datos fueron tabulados y graficados con la finalidad de estimar la ecuación de transformación.

Servomotor 1:

Tabla 3.16 Datos tomados del servomotor 1.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	220
10	206
20	193
30	180
40	168
50	155
60	143
70	131
80	119
90	107
100	95
110	82
120	70
130	57

140	46
150	35
160	23
170	11

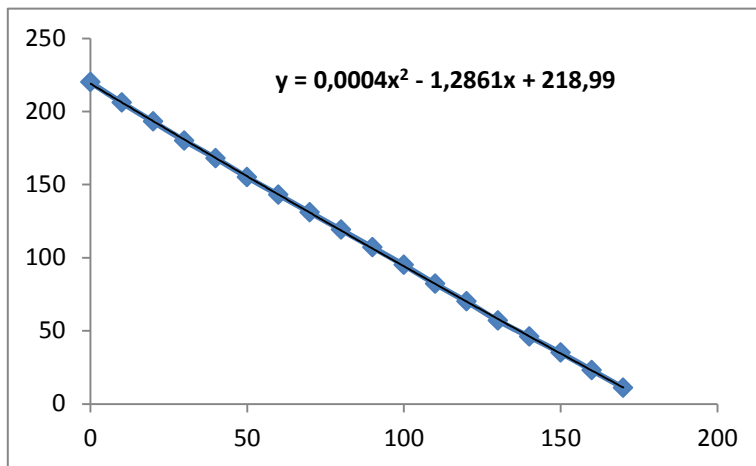


Figura 3.58 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación 1

Servomotor 2:

Tabla 3.17 Datos tomados del servomotor 2.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	20
10	31
20	44
30	59
40	73
50	89
60	106
70	123
80	140
90	158
100	178
110	197
120	215
130	235

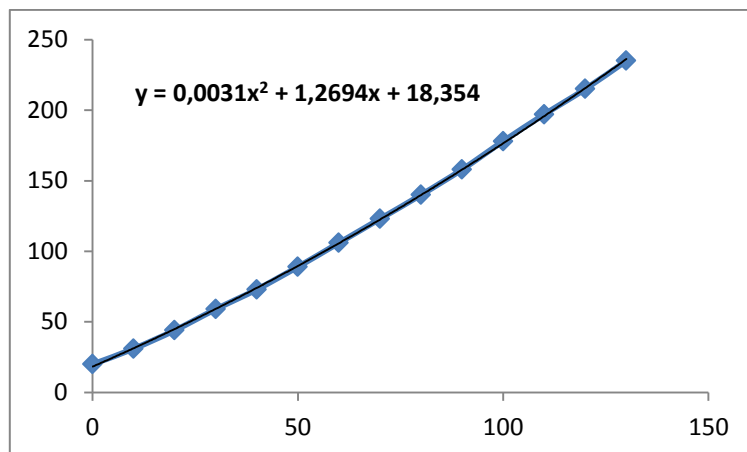


Figura 3.59 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación 2

Servomotor 3:

Tabla 3.18 Datos tomados del servomotor 3.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	240
10	226
20	211
30	197
40	184
50	171
60	156
70	143
80	129
90	116
100	102
110	89
120	78
130	66
140	54
150	41
160	29
170	11
180	0

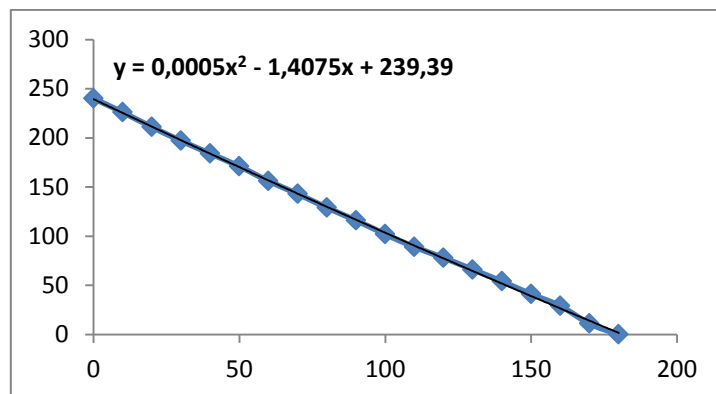


Figura 3.60 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación 3

Servomotor 4:

Tabla 3.19 Datos tomados del servomotor 4.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	47
10	60
20	73
30	85
40	100
50	114
60	128
70	142
80	156
90	170
100	186
110	201
120	220

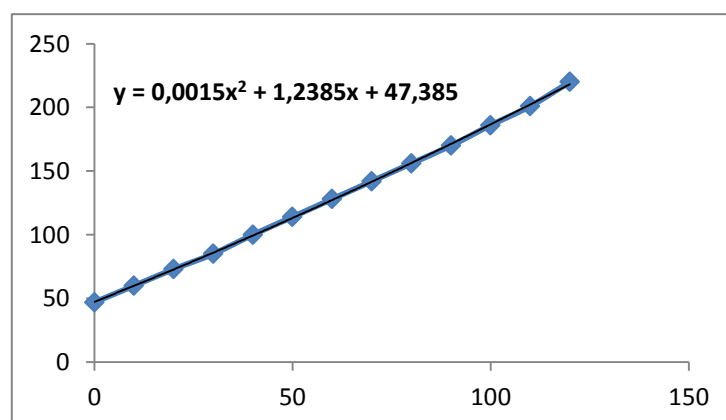


Figura 3.61 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación

Servomotor 5:

Tabla 3.20 Datos tomados del servomotor 5.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	12
10	24
20	36
30	48
40	61
50	72
60	83
70	94
80	106
90	119
100	132
110	145
120	157
130	170

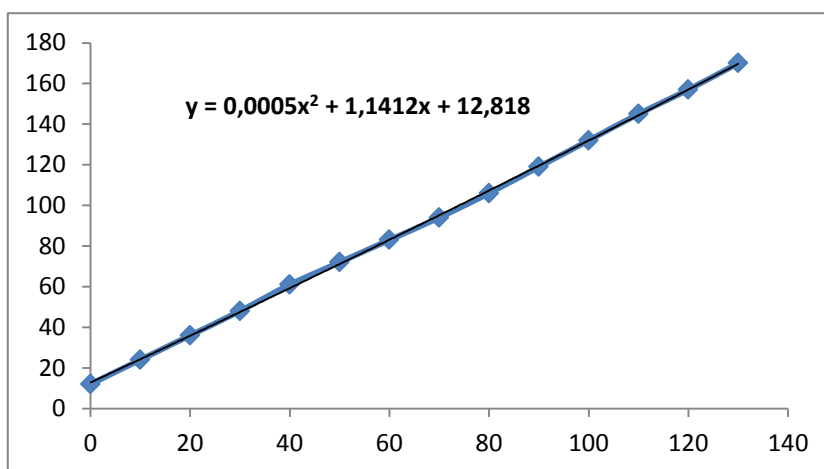


Figura 3.62 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación 5

Servomotor 6:

Tabla 3.21 Datos tomados del servomotor 6.

ÁNGULO	DATO SERVO
0	21
10	34
20	45

30	57
40	67
50	78
60	89
70	100
80	112
90	124
100	136
110	149
120	162

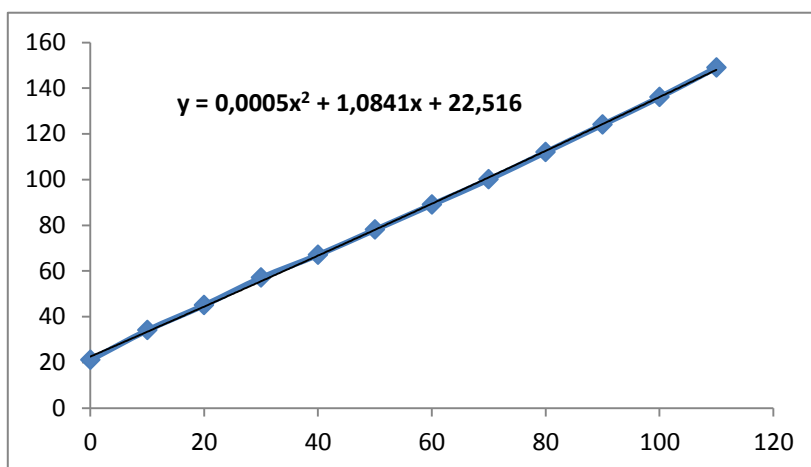


Figura 3.63 Estimación de la ecuación de transformación para la articulación 6

Las gráficas obtenidas permiten apreciar una relación lineal entre el desplazamiento angular y el valor enviado al controlador de servos, para lo cual se efectuó la estimación de una ecuación de transformación de segundo orden para mantener una buena exactitud en los resultados, cada ecuación ha sido implementada en un bloque “FORMULA NODE” en el cual se tiene una entrada cuyo valor depende de la salida de un controlador PID, y una salida que se almacenará en la variable global correspondiente a los valores codificados de cada uno de los servomotores (S1, S2, S3, S4, S5 y S6).

3.3.3.7 Programación de envío de datos para los servomotores

Una vez obtenidos los valores que codifican la posición angular de cada servomotor del robot, se procede a enviarlos al sistema robótico en una trama de 7 bytes en donde el primer byte equivalente a 254 ayuda a la sincronización con el microprocesador correspondiente. Esta trama ha sido implementada en un

SUB-VI el cual es ejecutado una vez que los datos de salida de los PID son almacenados en las variables correspondientes (S1, S2, S3, S4, S5 y S6).

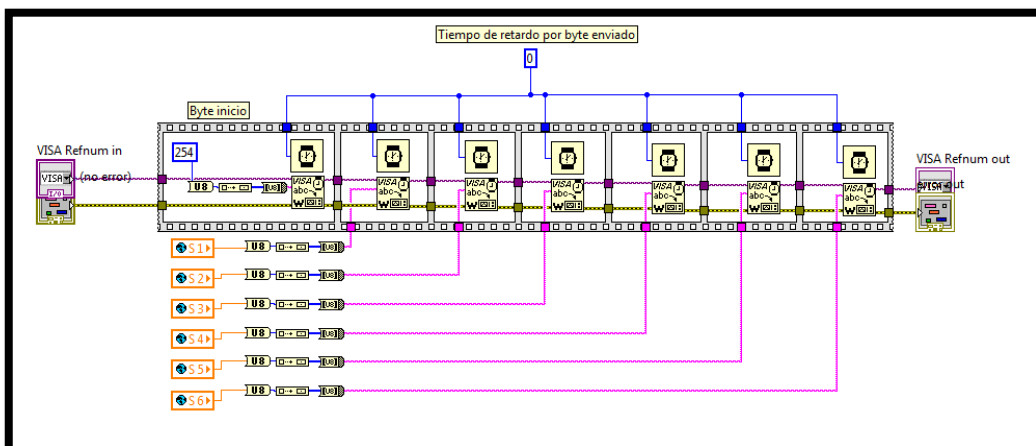


Figura 3.64 SUB-VI para envío de las posiciones codificadas de los servomotores

3.3.3.8 Programación para el posicionamiento inicial del robot

Con la finalidad de evitar movimientos bruscos al momento de ejecutar cualquiera de los dos modos de control, se ha programado al brazo para que parta de una posición inicial, es por eso que cuando se detiene la ejecución de un modo de control por parte del HMI, se procede a ejecutar un programa que permite posicionarlo en la posición de inicio.

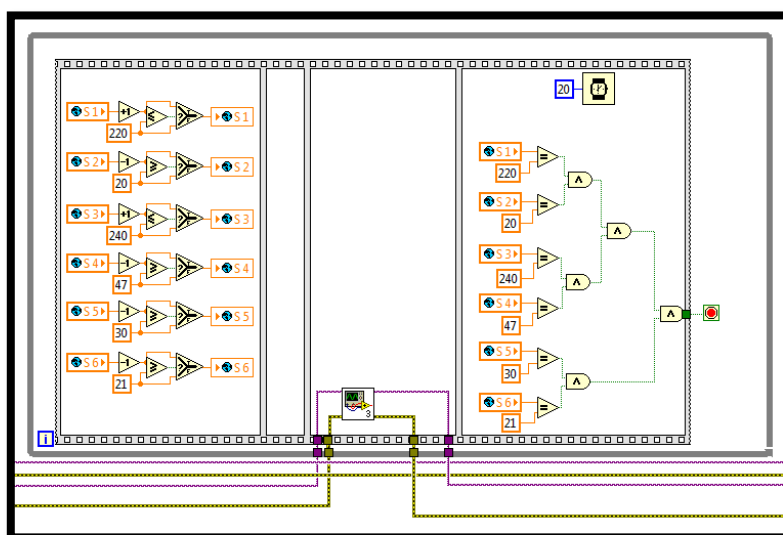


Figura 3.65 Posicionamiento inicial del robot

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran las pruebas correspondientes al funcionamiento del sistema robótico con la finalidad de constatar el cumplimiento de los objetivos y alcances establecidos para este proyecto de titulación.

4.1 CONSIDERACIONES INICIALES

Con el afán de obtener un buen funcionamiento, y de evitar comportamientos erróneos por parte del sistema robótico al no tener una referencia de movilidad, se ha tomado en consideración una postura inicial del robot que se asemeja a la posición anatómica del brazo humano. Basándose en lo mencionado en la Figura 4.1 se muestra la postura inicial del robot, en la cual las articulaciones han sido enumeradas para una mejor comprensión de la movilidad que posteriormente se detallará.

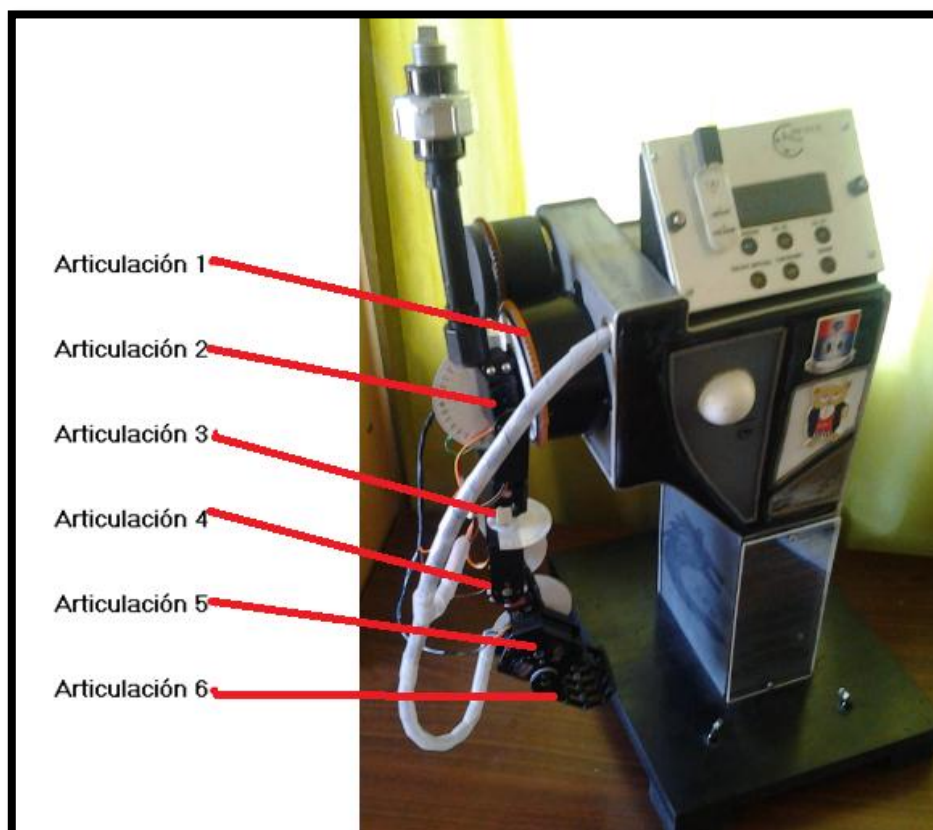


Figura 4.1 Posición inicial del sistema robótico

- Articulación 1: articulación glenohumeral.
- Articulación 2: articulación glenohumeral.
- Articulación 3: articulación glenohumeral.
- Articulación 4: articulación del codo.
- Articulación 5: articulación de la muñeca.
- Articulación 6: apertura y cierre de la mano robótica.

De la Figura 4.1 el brazo robótico inicialmente es ubicado en una posición verticalmente extendida, con la garra orientada al lado lateral de la estructura soporte. El valor angular de cada articulación en la postura inicial es de cero grados sexagesimales, y los desplazamientos angulares de cada articulación son referenciados a partir de dicha posición del robot.

Un factor muy importante para la comprensión del funcionamiento del sistema robótico radica en ubicar visualmente todos los indicadores y pulsadores que permiten interactuar con el mismo tal como se expone en las Figura 4.2 y 4.3; la descripción fue dada en la Tabla 2.17 y Tabla 2.19 del Capítulo 2.

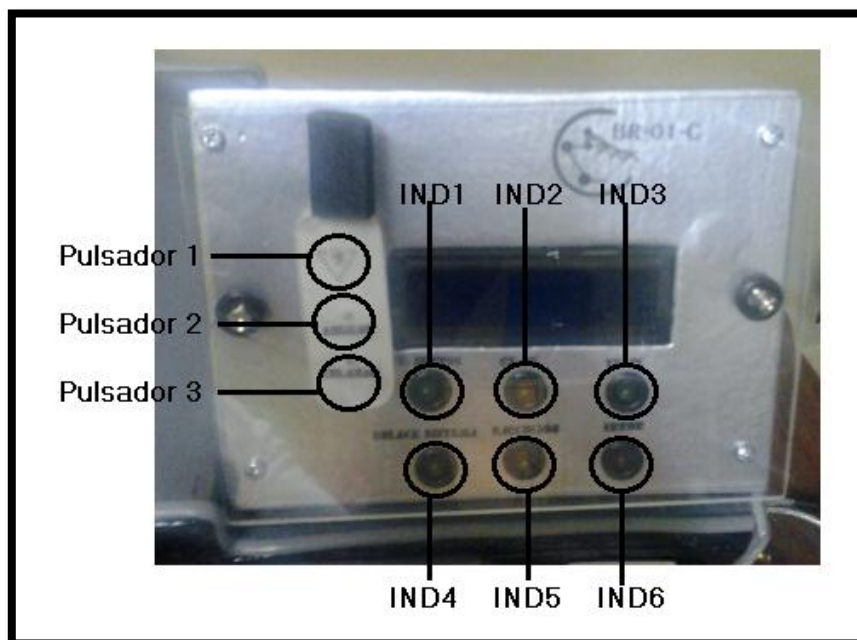


Figura 4.2 Estructura del Panel Frontal

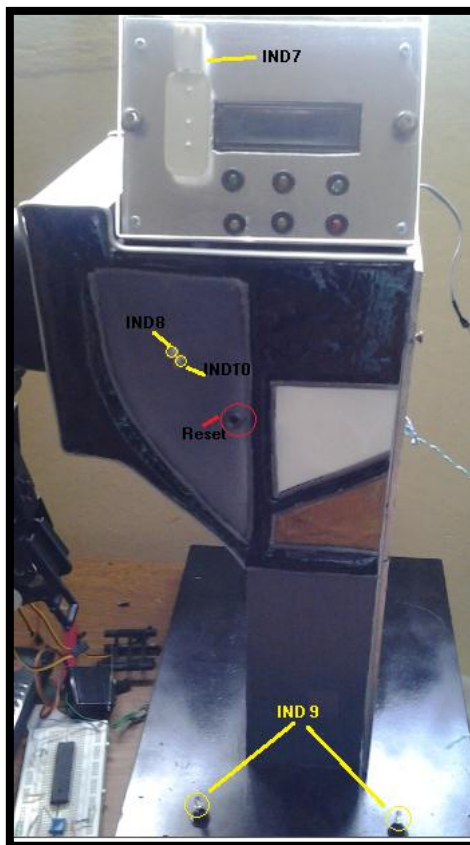


Figura 4.3 Indicadores Estructura Soporte

La ubicación de las tarjetas electrónicas diseñadas dentro de la estructura soporte está dada de la siguiente manera:

- La placa de la fuente de poder fue ubicada en la parte inferior de la estructura para ayudar a su ventilación por medio de los orificios existentes (Figura 4.4).
- Las placas correspondientes al sistema electrónico del robot, sistema de control de servomotores y sistema de encendido electrónico fueron ubicadas en la parte superior interna de la estructura, ya que se disponía de un espacio amplio para su ubicación (Figura 4.4).
- El ventilador de la fuente de poder se ubicó en la perforación hecha en la tapa desmontable de la estructura soporte (Figura 4.4), con el afán de extraer hacia el exterior el calor producido por los circuitos electrónicos internos.



Figura 4.4 Ubicación de placas en la estructura soporte

4.2 PRUEBAS DE LA ESTRUCTURA ROBÓTICA

4.2.1 RANGO ANGULAR DE LOS ACTUADORES

Para esta prueba se ha hecho uso del HMI, con el cual se procedió a efectuar el envío de datos (tramas) al controlador de servos, para que éste a su vez establezca la posición angular de cada uno de los servomotores del robot, y así poder verificar los límites de movilidad del sistema, además de establecer el rango angular fijo de cada articulación del brazo robótico en base a los movimientos anatómicos de un brazo humano.

En la Tabla 4.1 se presentan los rangos obtenidos, aclarándose que éstos son referenciados desde la postura inicial del robot.

Tabla 4.1 Rangos angulares correspondientes a las articulaciones del sistema robótico.

	Rango angular [°]
Articulación 1	0-170
Articulación 2	0-120
Articulación 3	0-180
Articulación 4	0-120
Articulación 5	0-100
Articulación 6	0-110

Los datos tabulados garantizan que los movimientos de cada eslabón del robot estén referenciados y limitados, para que posteriormente se pueda intuir de una forma indirecta la posición de cada eslabón conforme se tenga un desplazamiento angular de alguna articulación en particular, esto de una manera visual.

4.2.2 PRUEBAS DE MOVILIDAD DEL SISTEMA ROBÓTICO

Empleando el HMI se ha verificado que el movimiento angular de cada una de las articulaciones esté dentro del rango establecido en la Tabla 4.1, para ello se ha dominado el movimiento de cada articulación con los controles respectivos en el HMI, de esta forma se puede constatar un movimiento continuo e instantáneo por parte del sistema robótico, con lo que además se pretendía verificar el buen funcionamiento de los actuadores.

Conforme se efectuaban las pruebas correspondientes en un tiempo prolongado de actividad, se pudo apreciar que el actuador de la articulación 1 empezaba a tener dificultades para efectuar el movimiento de flexión del brazo robótico presentando movimientos con carácter débil, es decir que se perdía velocidad en el movimiento de dicho actuador. Este problema es ocasionado por el hecho de que el actuador debe ser capaz de soportar el peso de todo el sistema robótico y también las vibraciones mecánicas existentes por la movilidad del mismo, dando como resultado en lo posterior a disminuir la vida útil del servomotor. Partiendo de este problema, se ha pensado en un sistema de contrapeso, el cual consistió en añadir al robot un componente físico (Figura 4.5) cuyo objetivo fundamental es compensar el peso del brazo robótico y equilibrar el sistema.



Figura 4.5 Sistema de contrapeso adherido al sistema robótico

El componente físico tiene un peso aproximado de 220g que está concentrado en la parte superior del mismo, de esta manera se ha logrado compensar el peso del brazo robótico reflejándose en un mejor rendimiento de movilidad del servomotor.

4.3 PRUEBAS ELECTRÓNICAS

4.3.1 PRUEBA DE ENLACE DE LOS SISTEMAS ROBÓTICO/BRAZALES CON EL COMPUTADOR

En esta prueba se ha comprobado la operación de la etapa de enlace entre los sistemas robótico-brazales con el computador para garantizar la comunicación y evitar comportamientos inadecuados por el sistema en conjunto.

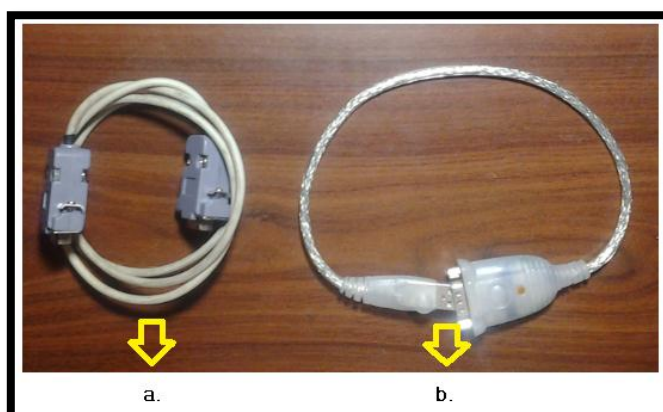


Figura 4.6 a) Cable DB9 cruzado b) Convertidor USB-RS232

Para ello, es importante en un inicio identificar los puertos de comunicación serial para cada sistema (brazales y robótico), mismos que son especificados en el HMI

(panel principal), seguidamente se efectúan las conexiones físicas haciendo uso de cables DB9 (cruzado) y los adaptadores de USB-RS232 (Figura 4.6).

Los puertos de comunicación se encuentran en la parte posterior de la estructura soporte Figura 4.7.



Figura 4.7 Puertos parte posterior de la estructura soporte.

Una vez garantizada la conexión física y que el sistema robótico esté encendido, los pulsadores respectivos fueron accionados para iniciar la petición de enlace por parte de los sistemas robótico y brazales; seguidamente es ejecutado el HMI en el computador, de esta manera los sistemas intentan confirmar la comunicación con el HMI, y una vez establecido el enlace, los sistemas informan por medio de sus indicadores respectivos el actual estado de los mismos, donde se señala que se ha confirmado la comunicación con el PC (Figura 4.8).



Figura 4.8 Confirmación de enlace: a) Sistema robótico b) Sistema de brazales

En el caso del sistema robótico cuando no establece la comunicación, muestra en el LCD que se verifique la conexión para un posterior intento de enlace (Figura 4.9).

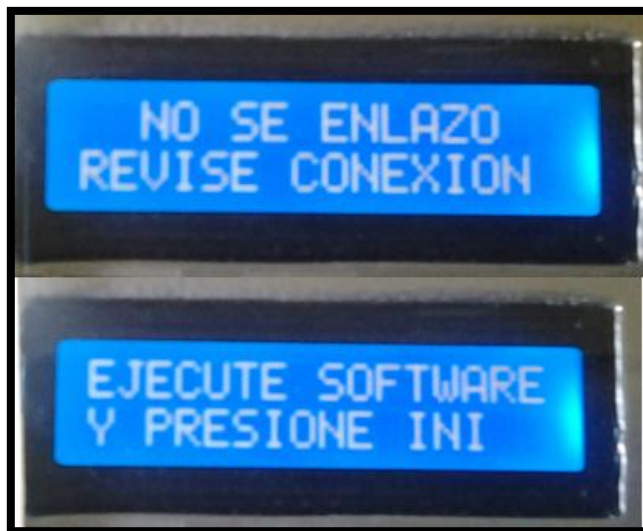


Figura 4.9 Indicación del sistema al no establecer el enlace

4.3.2 PRUEBAS DE DETECCIÓN DE ERRORES EN LA COMUNICACIÓN

Con la finalidad de comprobar la operación del sistema de detección de errores en la comunicación tanto con el sistema robótico como con el sistema de brazos, se han efectuado los siguientes literales, considerando que ya se ha establecido la comunicación y además que se esté ejecutando cualquiera de los modos de control en el MHI, por ejemplo el control manual.

- a. Desconectando el cable de comunicación serial entre el sistema robótico y el computador, al transcurrir el tiempo de aproximadamente un minuto, el sistema robótico detecta que se ha perdido comunicación y por medio del LCD muestra la información correspondiente, adicionalmente en el HMI se muestra en el indicador de texto el error de comunicación con el sistema robótico.

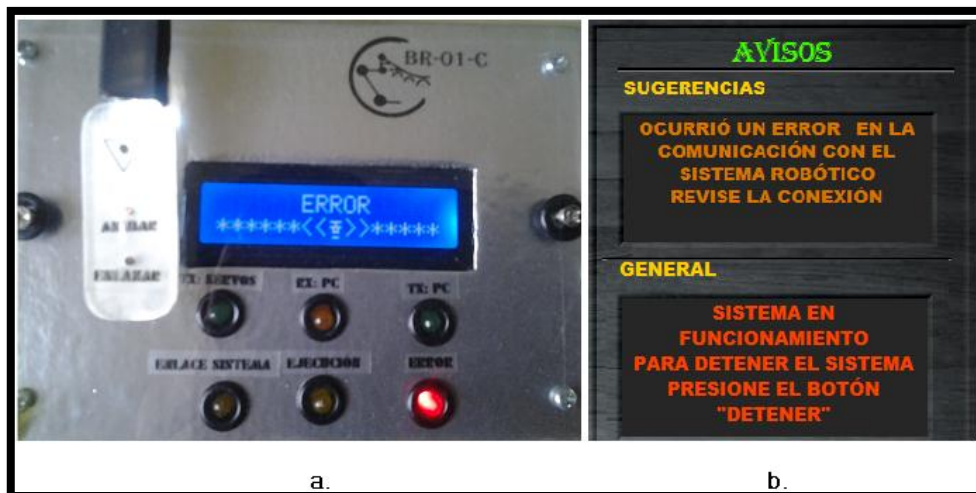


Figura 4.10 Prueba de error de comunicación entre el sistema robótico (a) y el HMI (b)

- b. Teniendo en ejecución el modo de control con brazales, y habiendo desconectado el cable de comunicación entre el computador y el sistema de brazales, el sistema en el transcurso de un minuto detecta que se pierde la comunicación con el computador; a continuación el indicador respectivo en el sistema de brazales parpadea indicando el error de comunicación, y además el indicador textual respectivo en el HMI muestra el error surgido.



Figura 4.11 Prueba de error de comunicación entre el sistema de brazales y el computador: a) Sistema robótico b) HMI

- c. En el caso de que los dos cables de comunicación son desconectados, el HMI muestra en su indicador textual que se ha perdido la comunicación

con los dos sistemas inmiscuidos (robótico y brazales), inhabilitando la ejecución del HMI como en los casos antes detallados.

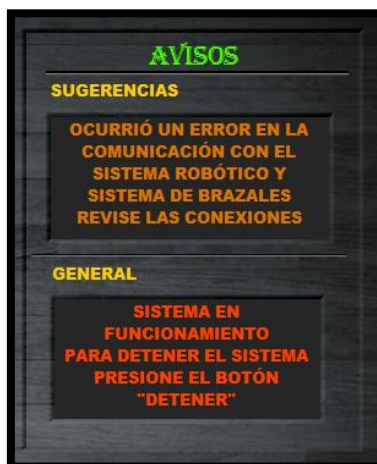


Figura 4.12 Prueba de error de comunicación con ambos sistemas

4.3.3 PRUEBAS DE MOVIMIENTOS PREDEFINIDOS DEL SISTEMA ROBÓTICO

Con la intención de resaltar la emulación de la movilidad de un brazo humano se ha implementado un modo de animación para el robot, el mismo que se ejecuta una vez que se acciona el pulsador respectivo (P2). Esta prueba ha buscado verificar una vez más que los movimientos que realiza el brazo robótico sean suaves y además estén acordes a la acción correspondiente e indicada en el LCD del sistema robótico. En la Figura 4.13 se muestra un ejemplo de un movimiento predefinido reproducido por el robot en el cual ejercita su brazo.

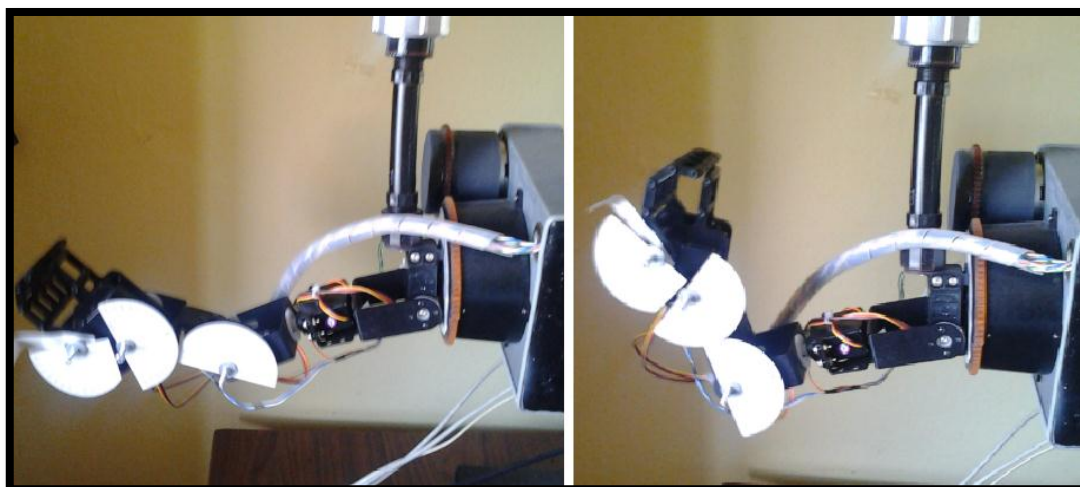


Figura 4.13 Animación ejercitando

4.3.4 CALIBRACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID

Una parte fundamental para el control del sistema robótico está dado por una adecuada calibración de los parámetros principales de los controladores PID. Estos parámetros están dados por las constantes K_p , K_d , y K_i , mismos que fueron deducidos en la ecuación [3.9] del controlador PID; la variación de estos parámetros admiten la obtención de diversas respuestas por parte del sistema, por lo que para este proyecto la calibración de los controladores PID fue muy sustancial y se ha enfocado en la obtención de resultados favorables dentro de los cuales se ha buscado que el tiempo de respuesta sea mínimo, lo más estable posible, y con sobre impulsos pequeños. Puesto que no fue fácil determinar el modelo matemático del sistema, la calibración de las constantes del PID fue hecha empleando el método de ensayo y error.

Para lo cual los valores de las constantes adecuados fueron obtenidos considerando una guía tomada de la referencia [42] y [43], la misma detalla lo siguiente:

- Se eliminan las acciones de control integral y derivativa, es decir K_i y K_d igual a cero.
- Se establece el valor de K_p en un valor pequeño, y se ejecuta el controlador.
- Se incrementa gradualmente el valor de K_p hasta que los cambios de punto de ajuste sea rápido sin que se generen oscilaciones.
- Se aumenta el valor de K_d hasta un valor máximo evitando generar oscilaciones.
- Finalmente se aumenta gradualmente el valor de K_i hasta que el error en estado estable sea lo mínimo posible.

Con el uso de las pautas expuestas se ha determinado el valor de las constantes para cada controlador PID, mismos que se muestran en la Tabla 4.2.

Cabe recalcar que para la calibración de los PID se ha usado el control en modo manual en el HMI.

Tabla 4.2 Valores de las constantes Kp, Kd, Ki de los controladores PID del sistema.

PID	Kp	Kd	Ki
Articulación 1	0,68	0,08	0,4
Articulación 2	0,26	0,01	0,41
Articulación 3	0,33	0,0002	0,7
Articulación 4	0,31	0,001	0,71
Articulación 5	0,28	0,0003	0,65
Articulación 6	0,3	0,0001	0,7

La constante de tiempo T, también considerada en la ecuación [3.9], viene dada por el tiempo que toma el sistema en conjunto, desde la petición de datos a los sistemas robótico y de brazales, hasta que estos a su vez respondan con los datos requeridos y el controlador ejecute su acción de control; este tiempo ha sido estimado en aproximadamente 20ms para los dos modos de control.

Partiendo de la consideración que el tiempo de muestreo es el mismo para los dos modos de control, y de acuerdo a las pruebas realizadas se ha podido conseguir resultados satisfactorios, en cuanto el tiempo de respuesta y estabilidad del sistema. En las siguientes gráficas se puede observar la respuesta del sistema de cada articulación frente a una entrada de tipo escalón.

- *Articulación 1*



Figura 4.14 Respuesta del sistema de control de la articulación 1

- *Articulación 2*



Figura 4.15 Respuesta del sistema de control de la articulación 2

- *Articulación 3*

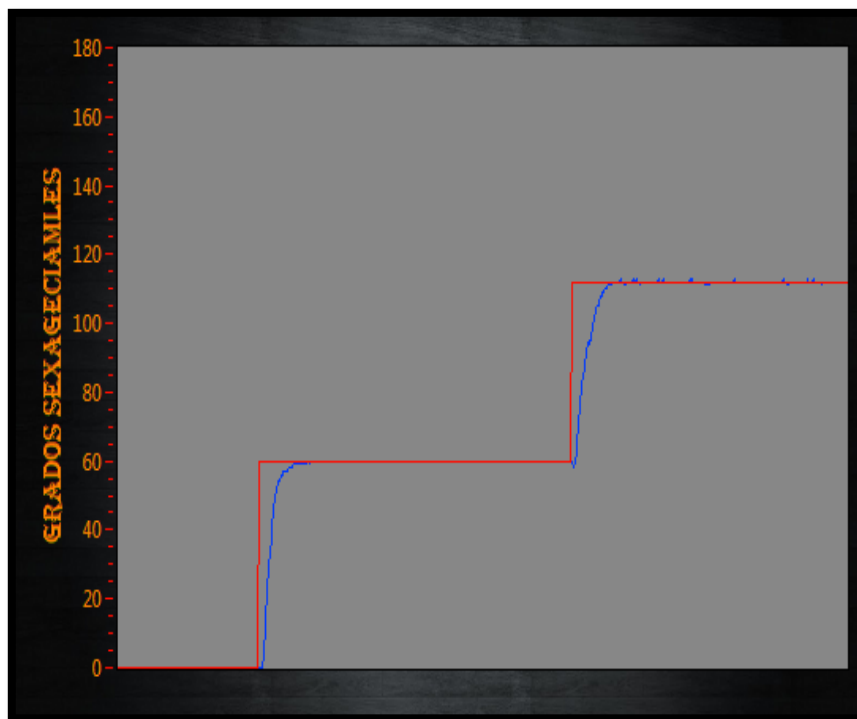


Figura 4.16 Respuesta del sistema de control de la articulación 3

- *Articulación 4*

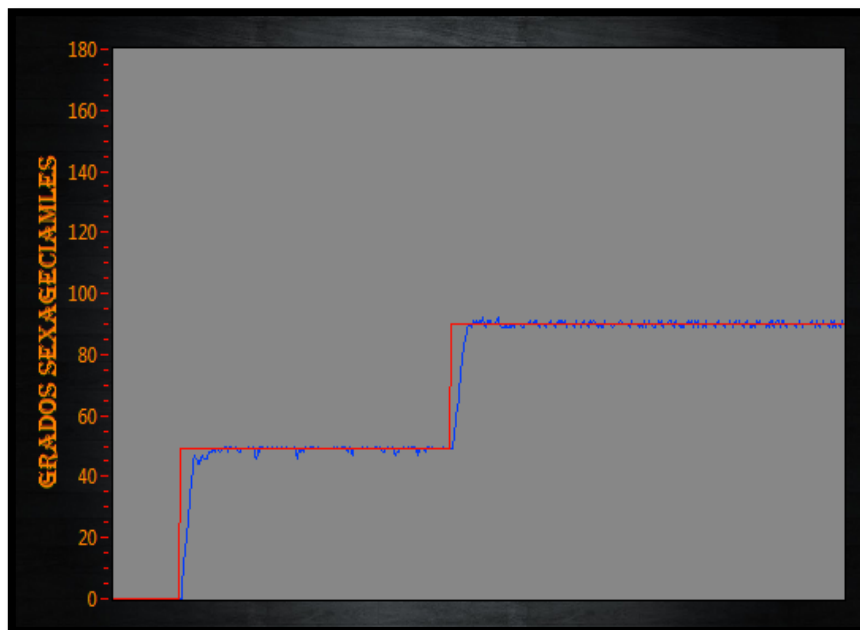


Figura 4.17 Respuesta del sistema de control de la articulación 4

- *Articulación 5*

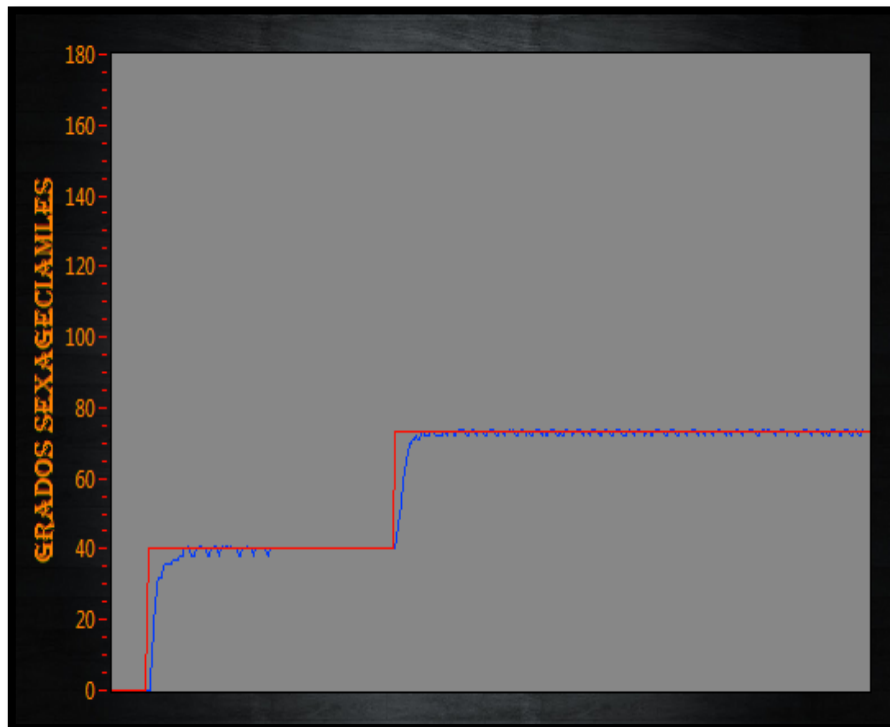


Figura 4.18 Respuesta del sistema de control de la articulación 5

- *Articulación 6*



Figura 4.19 Respuesta del sistema de control de la articulación 6

4.4 PRUEBA DE MOVILIDAD DEL BRAZO ROBÓTICO EMPLEANDO EL MODO DE CONTROL MANUAL

En esta prueba se ha verificado el movimiento del brazo robótico bajo la acción de control de los PID respectivos, además de evidenciar que los desplazamientos angulares estén dentro de los límites que fueron establecidos con anterioridad; para ello se ha trabajado con el modo de control manual del HMI, en el cual el movimiento de cada articulación está comandado por los deslizadores respectivos disponibles en el panel de control del HMI.

De las pruebas realizadas, se pudo constatar que frente a cambios graduales del punto de ajuste de una articulación en particular, los movimientos son ejecutados de manera continua en un tiempo de respuesta menor a los tres segundos.

Dentro de la gran variedad de posiciones angulares de cada una de las articulaciones, se muestra a continuación las gráficas de control correspondientes a los movimientos realizados considerando los límites: superior, intermedio e inferior del rango angular; además ha buscado intuir los movimientos del sistema robótico y relacionarlos al sistema articular del brazo humano.

- *Articulación 1:*

Tipo de movimiento: flexión del brazo robótico.

Tabla 4.3 Valores límites de posición angular para la articulación 1.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	90
Posición superior	170



Figura 4.20 Movimiento articulación 1

- *Articulación 2:*

Tipo de movimiento: abducción del brazo robótico.

Tabla 4.4 Valores límites de posición angular para la articulación 2.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	90
Posición superior	120



Figura 4.21 Movimiento articulación 2

- *Articulación 3:*

Tipo de movimiento: rotación interna y externa del brazo robótico.

Tabla 4.5 Valores límites de posición angular para la articulación 3.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	90
Posición superior	180

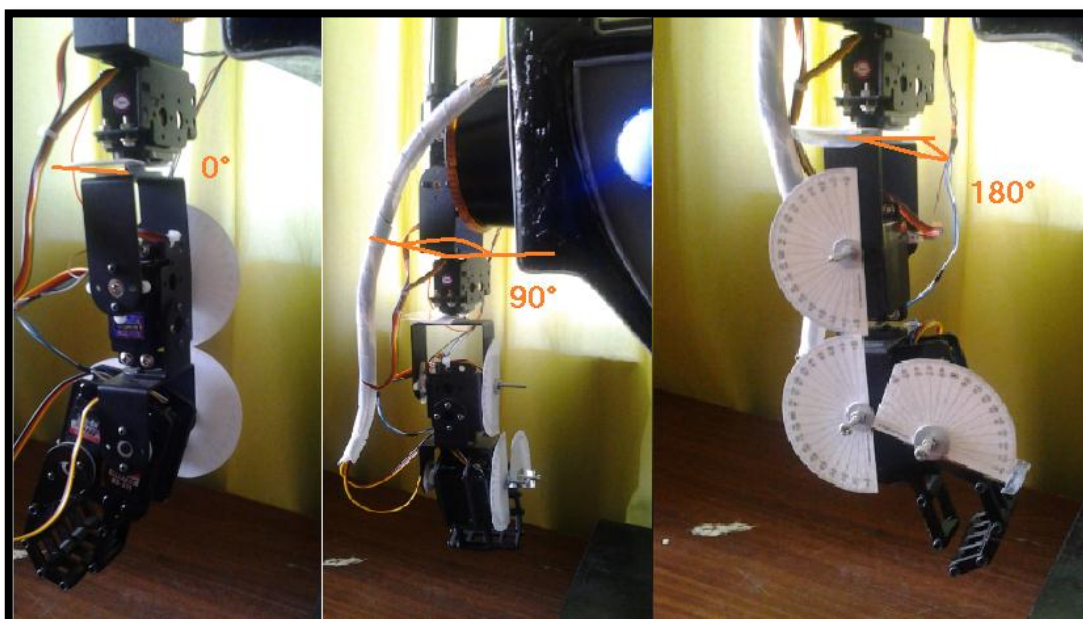


Figura 4.22 Movimiento articulación 3

- *Articulación 4:*

Tipo de movimiento: flexión del codo.

Tabla 4.6 Valores límites de posición angular para la articulación 4.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	90
Posición superior	120

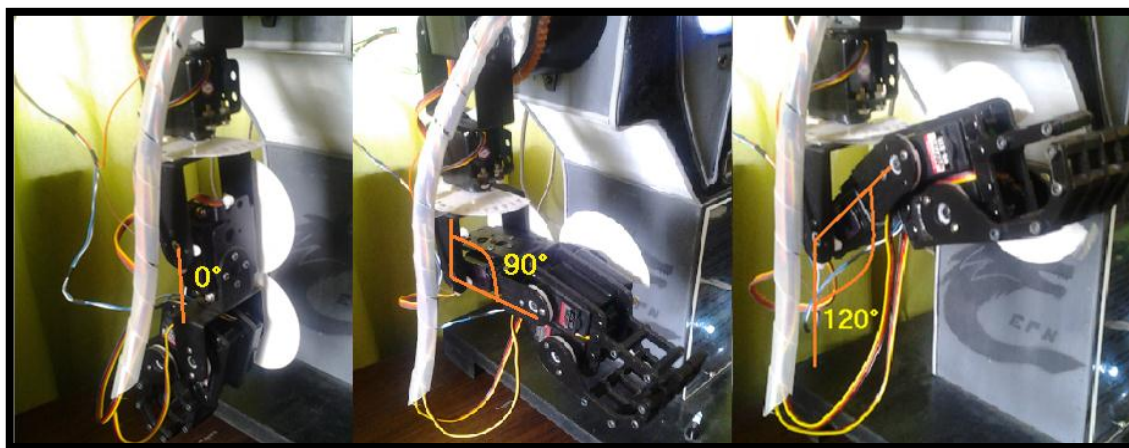


Figura 4.23 Movimiento articulación 4

- *Articulación 5:*

Tipo de movimiento: flexión-extensión de la muñeca.

Tabla 4.7 Valores límites de posición angular para la articulación 5.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	20
Posición superior	100

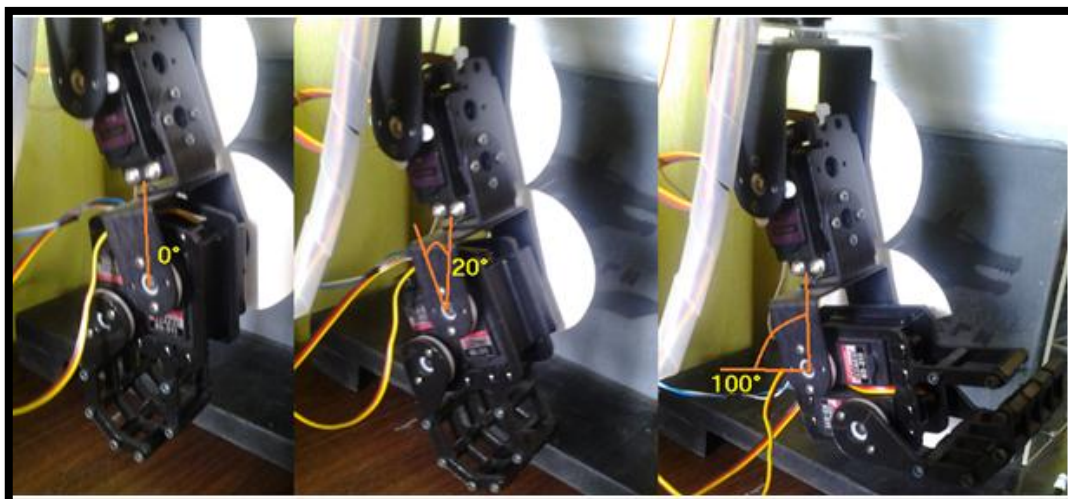


Figura 4.24 Movimiento articulación 5

- *Articulación 6:*

Tipo de movimiento: apertura y cierre de la mano.

Tabla 4.8 Valores límites de posición angular para la articulación 6.

	Ángulo [°]
Posición inferior	0
Posición intermedia	90
Posición superior	110

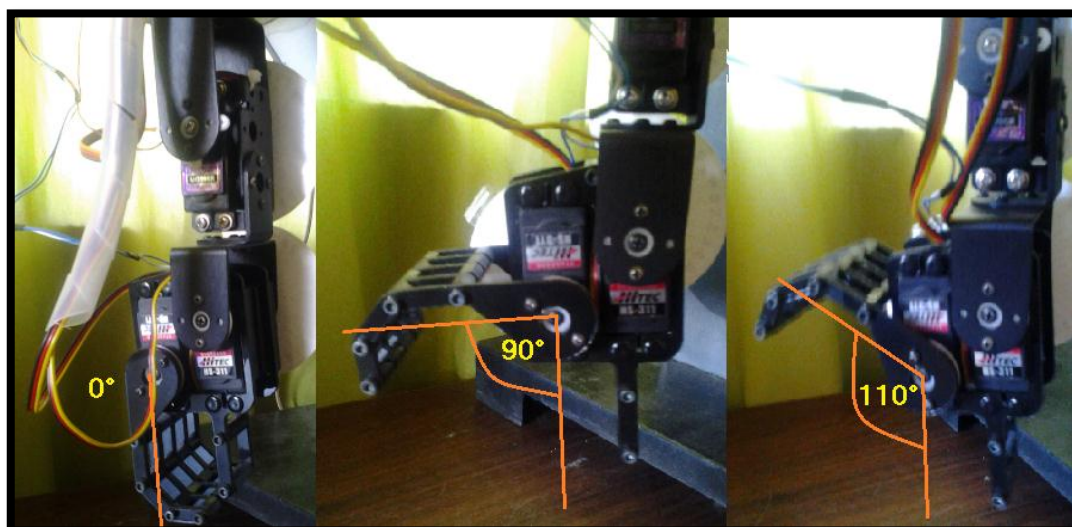


Figura 4.25 Movimiento articulación 6

Para verificar la posición angular real de una articulación y además de constatar la acción de compensación de los controladores PID, se han registrado datos de los desplazamientos angulares en pasos graduales de 10° de cada articulación, para ello se hace uso de escalas graduadas (transportador) en cada eje articular del robot (Figura 4.26); estas escalas permiten verificar la posición angular real de cada articulación para compararla con el valor establecido en el punto de ajuste, de esta forma se obtuvo la Tabla 4.9.



Figura 4.26 Escalas graduadas ubicadas en la estructura robótica

Tabla 4.9 Datos comparativos.

Ángulo [°]	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Punto de ajuste	Valor medido					
0	0	0	0	0	0	0
10	10	9,5	10,5	10,5	10,5	10,5
20	20	20,5	20	19,5	20,5	20,5

30	30,5	30	30	30	30	30
40	39,5	40,5	41,5	39,5	40	40
50	49,5	51	51	50,5	51	51
60	60,5	62	61,5	58,5	61,5	61
70	71	72,5	70,5	69	72	70,5
80	81	83,5	80,5	78,5	80,5	81
90	90,5	94	91	89	90,5	91,5
100	102	105	102	100,5	102	102,5
110	113	115	111,5	113	-	103,5
120	121,5	-	120,5	124	-	-
130	132	-	132	-	-	-
140	142,5	-	141	-	-	-
150	152,5	-	149,5	-	-	-
160	163,5	-	161	-	-	-
170	174	-	169,5	-	-	-
180	-	-	179	-	-	-

Considerando la teoría de errores tomada de [44], el error porcentual viene dado de la siguiente manera:

$$Error [\%] = \frac{Valor\ medido - Valor\ real}{Valor\ real} \times 100\% \quad (4.1)$$

Empleando la expresión 4.1 y los datos tabulados, se cuantificaron los errores existentes en cada posición angular de las distintas articulaciones, y de esta manera se elaboró la Tabla 4.10 donde se expresa el error en porcentaje.

Tabla 4.10 Errores porcentuales de cada posición.

Ángulo [°]	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Posición	Error [%]					
0	0	0	0	0	0	0
10	0	5	5	5	5	5
20	0	2.5	0	2.5	2.5	2.5
30	1.667	0	0	0	0	0
40	1.25	1.25	3.75	1.25	0	0
50	1	2	2	1	2	2
60	0.833	3.333	2.5	2.5	2.5	1.667
70	1.428	3.571	0.714	1.429	2.857	0.714
80	1.25	4.375	0.625	1.875	0.625	1.25
90	0.55	4.444	1.111	1.111	0.556	1.667
100	2	5	2	0.5	2	2.5

110	2.72	4.545	1.364	2.727	-	5.9
120	1.25	-	0.417	3.333	-	-
130	1.538	-	1.538	-	-	-
140	1.786	-	0.714	-	-	-
150	1.667	-	0.333	-	-	-
160	2.187	-	0.625	-	-	-
170	2.353	-	0.294	-	-	-
180	-	-	0.555	-	-	-

Estableciendo un error promedio de cada articulación a partir de los errores obtenidos en la Tabla 4.10, se tiene lo siguiente:

Tabla 4.11 Errores promedio de cada articulación.

Articulación	Error [%]
1	1.304
2	3.001
3	1.24
4	1.787
5	1.64
6	1.933

4.5 PRUEBA DE ORIENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO EMPLEANDO UN CONTROL CON BRAZALES

Para la realización de esta prueba se ha usado como componente fundamental de control el sistema de brazales, mismo que se encarga del envío de los datos tanto de los sensores IMU como de los sensores del guante al HMI, el cual hace uso de los datos del sistema de brazales como punto de ajuste para el control del brazo robótico.

4.5.1 UBICACIÓN DE BRAZALES

La obtención de buenos resultados en las pruebas empleando el sistema de brazales, está sustentada en la ubicación adecuada de los dos brazales y el guante, por lo que amerita detallar a continuación las consideraciones tomadas para la localización correcta de dichos implementos.

Brazal brazo (IMU 1): este componente permite determinar la orientación espacial del eslabón del brazo, por lo cual fue muy relevante la ubicación del brazal. De esta manera se ha determinado que la posición adecuada del brazal es

a la altura del codo y el sensor ubicado en la parte posterior del brazo cuyo eje X del sensor coincide con el eje longitudinal del brazo, tal como se muestra en la siguiente figura:

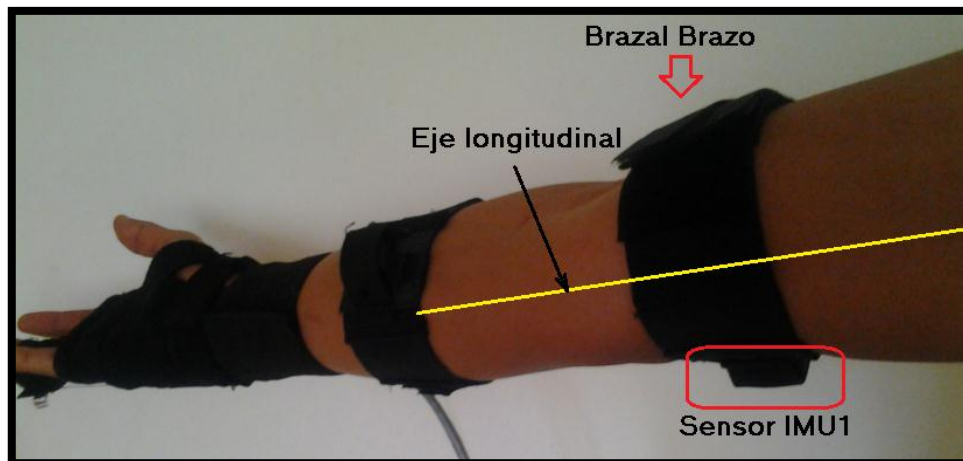


Figura 4.27 Ubicación del brazal para el sensor IMU1

Brazal antebrazo (IMU 2): este componente ayuda a determinar la orientación espacial del antebrazo a través de la articulación del codo, dado que su ubicación también es importante, se concluyó que lo ideal es aproximadamente en una posición intermedia del antebrazo y el sensor localizado en la cara frontal del antebrazo cuyo eje Y coincide con el eje longitudinal de dicho eslabón, tal como se puede ver en la siguiente gráfica:

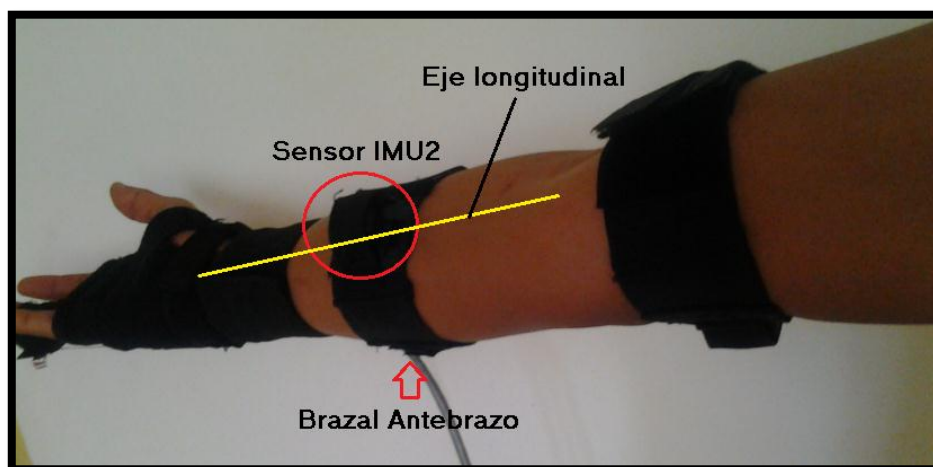


Figura 4.28 Ubicación del brazal para el sensor IMU2

Guante: este sistema fue diseñado para su ubicación en la mano con la finalidad de sensar los movimientos realizados por la articulación de la muñeca y además

de detectar la apertura y cierre de la mano con un soporte adicional que es ubicado en el dedo anular, lo que ha permitido obtener buenos resultados en la emulación.



Figura 4.29 Ubicación del guante

Una vez que se ha determinado la ubicación adecuada de los brazales y el guante, es importante realizar las conexiones pertinentes con el sistema microprocesado correspondiente, y de la misma forma tener en claro los indicadores y pulsadores disponibles tal como se muestra en la Figura 4.30.

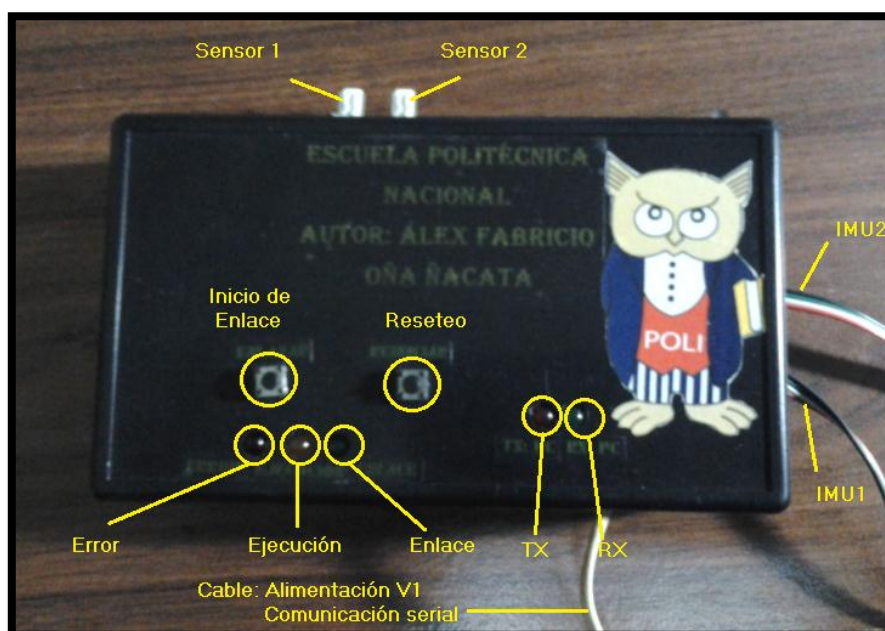


Figura 4.30 Sistema Electrónico para el sistema de brazales

Se ha efectuado las pruebas entorno a la sensibilidad de los sensores IMU, de donde se obtuvieron dos puntos a considerar:

- El sensor IMU1 estima la orientación del brazo empleando los ángulos de Euler (pitch, roll y yaw); una particularidad que se observó es un fenómeno denominado “gimbal lock” que no es más que el bloqueo de los ejes cuando el ángulo pitch está en +/- 90°, provocando que el filtro extendido de Kalman falle; con la finalidad que este fenómeno no repercute en la funcionalidad del sistema se ha restringido el uso de los ángulos roll y yaw por parte del sistema de control (HMI) para los límites donde se presenta la inestabilidad del sensor, inhabilitando el movimiento dado por las articulaciones correspondientes.
- Otra particularidad que se ha considerado radica en las fluctuaciones que se presentan en los ángulos pitch y roll entorno a cambios en el ángulo yaw, por lo cual de acuerdo a las pruebas efectuadas, se ha establecido una zona válida de operación, la cual ubica al brazo humano apuntando aproximadamente al sur magnético de la Tierra cuando éste está flexionado 90° desde su posición inicial, y a partir de esa posición se puede ejecutar el movimiento de abducción del brazo. Esta zona garantiza que la emulación de movimientos evite el efecto de las fluctuaciones.

Una característica al iniciar la ejecución del modo de control con brazales, es que el sistema de control no se ejecuta mientras el usuario no ubique el brazo en la posición inicial, tomando como consideración las restricciones detalladas anteriormente. Cuando se detecta la postura inicial, los indicadores se encienden gradualmente y el indicador textual indicará que se mantenga en dicha posición para arrancar la ejecución del sistema de control (Figura 4.31).



Figura 4.31 Postura inicial previo a la ejecución del sistema de control

4.5.2 MOVIMIENTOS EMULADOS

Como parte fundamental del proyecto se realizaron las pruebas, cuyo propósito se ha orientado en constatar la emulación por parte del sistema robótico de los movimientos realizados por el brazo humano del usuario. Partiendo de las consideraciones antes mencionadas en cuanto a la sensibilidad de los sensores IMU, se ha verificado que las restricciones establecidas permitieron un mejor rendimiento en la replicación de los movimientos, además que se ha comprobado una vez más la compensación realizada por los controladores PID. Con el propósito de mostrar los movimientos que se ha logrado emular, en las siguientes gráficas se detalla la movilidad del brazo robótico relacionándolos con los movimientos anatómicos de un brazo humano:

- **Movimiento de flexión del hombro: articulación 1.**



Figura 4.32 Flexión del hombro

- **Movimiento de abducción del hombro: articulación 2.**



Figura 4.33 Abducción del hombro

- **Movimiento de flexión y extensión horizontal del hombro:** articulación 2.



Figura 4.34 Flexión y extensión horizontal del hombro

- **Movimiento de rotación interna y externa del brazo:** articulación 3.

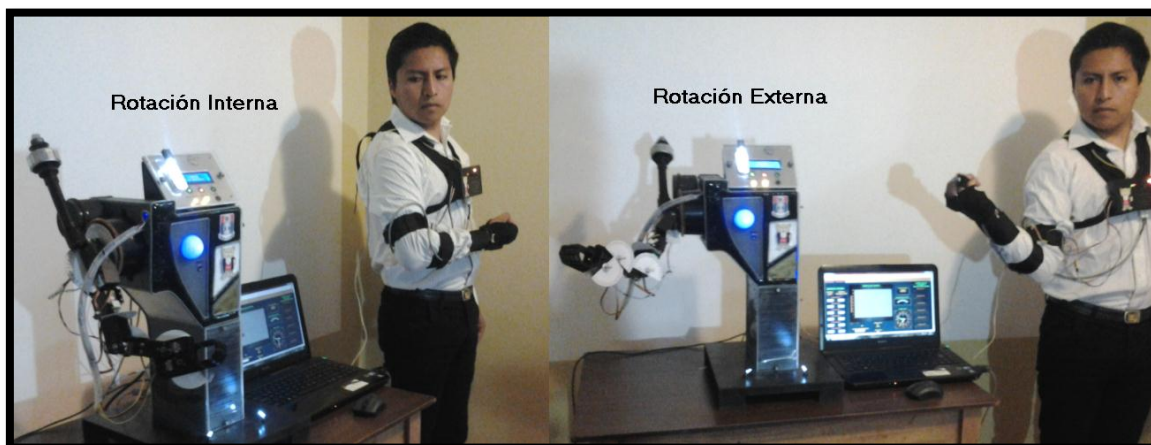


Figura 4.35 Rotación interna y externa del brazo

- **Movimiento de flexión del codo:** articulación 4.

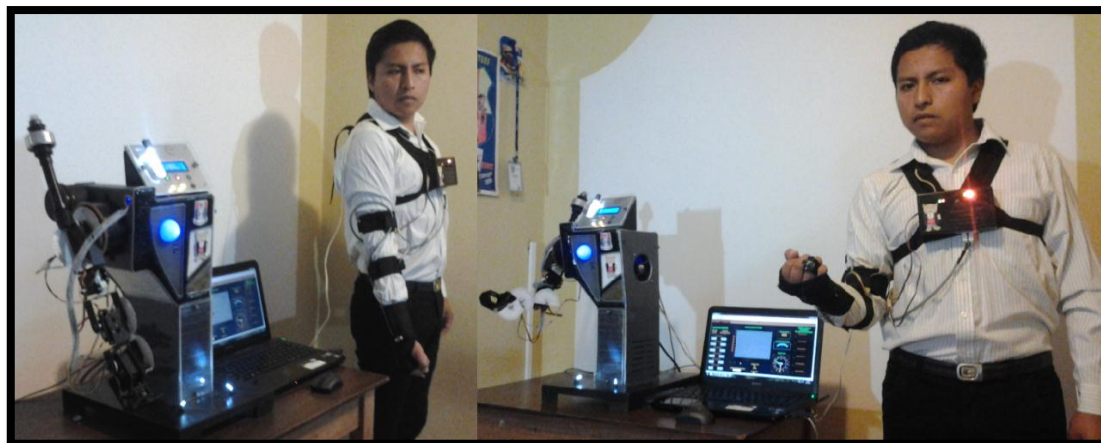


Figura 4.36 Flexión del codo

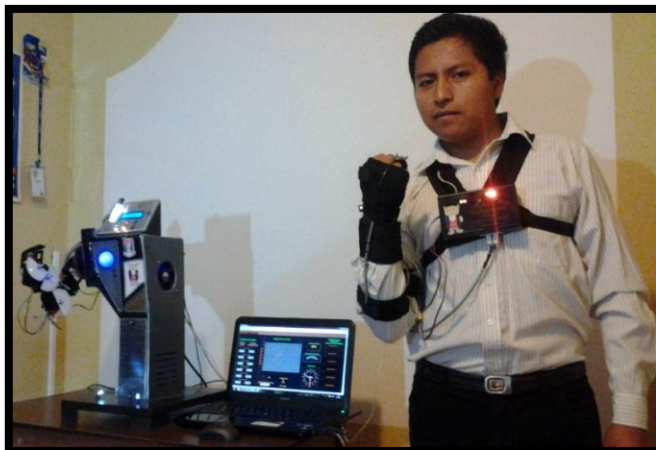


Figura 4.36 Flexión del codo (continuación)

- **Movimiento de flexión y extensión de la muñeca: articulación 5.**



Figura 4.37 Flexión de la muñeca

- **Movimiento de apertura y cierre de la mano: articulación 6**



Figura 4.38 Apertura y cierre de la mano

4.6 PRUEBA DE AGARRE DE OBJETOS

Como parte adicional se ha efectuado una prueba con la cual se pudo comprobar el uso del sistema robótico como un medio para tomar objetos dentro de su campo de trabajo, de esta manera se puede enfocar en un sistema que ayudaría a la manipulación de objetos peligrosos por medio de un control a distancia del robot, partiendo de ello se pudo verificar el agarre de objetos por parte del efector final del robot como se muestra en la Figura 4.39.



Figura 4.39 Prueba de agarre de objetos por parte del robot

Las pruebas efectuadas hicieron uso de objetos livianos para no afectar la vida útil de los actuadores del sistema robótico, de esta manera se pudo establecer

que el peso máximo para el cual se mantiene un movimiento estable por parte del robot es de 115 gramos.

4.7 COSTOS DEL PROYECTO

Para estimar el costo total empleado para la realización del presente proyecto de titulación se presenta la Tabla 4.12, en la cual se detalla el precio de todos los componentes empleados desde los materiales mecánicos para el ensamblaje y construcción de todo el sistema físico, hasta los materiales eléctrico-electrónicos utilizados para el control, de la misma forma de incluye el costo del tiempo de ingeniería invertido en el proyecto desde su diseño hasta su construcción y terminado del mismo.

Tabla 4.12 Costos del proyecto.

MATERIAL MECÁNICO Y DE IMPLEMENTACIÓN			
Elemento	Cantidad	Precio unitario	Precio total
PIEZAS BRAZO ROBÓTICO			
Kit de Base para rotación	1	22,9	22,9
Soporte multipropósito (x2)	2	14,92	29,84
Soporte largo tipo "C" (con rodamiento)	2	7,89	15,78
Soporte corto tipo "C" (sin rodamiento)	1	11,29	11,29
Soporte conector tipo "L"	1	8,82	8,82
Kit mano robótica	1	20,55	20,55
CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURA SOPORTE			
Estructura de madera del soporte	1	25	25
Estructura de madera panel frontal	1	6	6
PINTURA			
Pintura Spray color gris	2	2,85	5,7
Pintura Spray color blanco	1	2,85	2,85
Pintura Spray color negro	1	2,85	2,85
Pintura Spray color aluminio	1	3,75	3,75
1/16 pintura esmalte color oro	1	2,15	2,15
1/16 pintura esmalte color negro	1	1,1	1,1
DECORACIÓN Y COMPONENTES ADICIONALES			
1/4 Masilla para madera	1	6,15	6,15
Material de reciclaje	1	10	10
Acrílico 15,1x10,5 [cm]	1	2	2
Acrílico 8,9x19,5 [cm]	1	3	3
Banda dentada	2	3	6

Tornillos 1 pulgada	10	0,05	0,5
Componente grilon	1	3	3
COMPONENTES DEL SISTEMA DE BRAZALES			
Brazal antebrazo	1	6	6
Brazal brazo	1	6,5	6,5
Guante	1	8	8
Caja para proyecto	1	5,5	5,5
Soporte para caja de proyecto	1	7	7
Subtotal 1			222,23
ELEMENTOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS			
SENSORES			
Sensores IMU CHR-UM6	2	281,69	563,38
Sensores ópticos QRD1114	2	1,25	2,5
MÓDULOS			
Controlador de servos	1	25,79	25,79
ACTUADORES			
Servomotor HS-645 MG	1	35	35
Servomotor MG996R	2	14,1	28,2
Servomotor HS-485HB	1	24	24
Servomotor HS-311	2	13,5	27
COMPONENTES VARIOS			
Resistencias 1/4W	46	0,04	1,84
Condensador cerámico	16	0,08	1,28
Condensador electrolítico 1000uF	2	0,35	0,7
Condensador electrolítico 4700uF	1	0,45	0,45
Condensador electrolítico 2,2uF	8	0,09	0,72
Condensador electrolítico 0,1uF	4	0,09	0,36
Potenciómetro de precisión 100k	2	0,78	1,56
Microcontrolador Atmega 164p	2	6,1	12,2
Max232	1	1,95	1,95
Circuito integrado 74LS151 (multiplexor)	1	0,6	0,6
LCD 16x2	1	7,6	7,6
Led normal 5mm	11	0,1	1,1
Led alto brillo 5mm	6	0,27	1,62
Pulsadores	6	0,15	0,9
Diodos 1N4007	3	0,1	0,3
Cristal 8MHz	2	0,57	1,14
Transistor TIP 121	1	0,5	0,5
Potenciómetro 100K	2	0,33	0,66
Inductancia 10 uH	2	0,63	1,26
Fuente de poder	1	15	15
CONECTORES			

Conector de 2 pines	1	0,3	0,3
Conector de 3 pines	9	0,27	2,43
Conector de 4 pines	3	0,37	1,11
Conector de 5 pines	1	0,45	0,45
Conector de 6 pines	1	0,5	0,5
Conector de 10 pines	1	0,75	0,75
Conector RS232 macho	2	0,45	0,9
Conector RS232 hembra	4	0,59	2,36
ZÓCALOS, BORNERAS Y ESPADINES			
Zócalo 40 pines	2	0,2	0,4
Zócalo 16 pines	2	0,15	0,3
Bornera x2	4	0,2	0,8
Espadín macho	2	0,75	1,5
Espadín Hembra	2	0,75	1,5
CABLES Y ACCESORIOS			
Cable 2 pares flexible 1 metro	2	0,6	1,2
Cable UTP 4 pares flexible 1 metro	4	0,76	3,04
Bus de datos 1 metro	1	1,5	1,5
Cable termoencogible 1 metro 2,5mm	2	0,5	1
Cable termoencogible 1 metro 4mm	1	0,6	0,6
Cable de poder	1	2	2
Cable USB-232	2	15	30
Cable telefónico 4 hilos 1 metro	2	0,15	0,3
Recubridor plástico de cables	1	0,65	0,65
PLACAS			
Placa principal del sistema robótico	1	18,6	18,6
Placa panel frontal	1	4,69	4,69
Placa de encendido	1	0,98	0,98
Placa de potencia (Servomotores)	1	1,82	1,82
Placa principal del sistema de brazales	1	8,75	8,75
Subtotal 2			846,04
VALOR DE INGENIERÍA			
Horas efectivas de trabajo	250	15	3750
Subtotal 3			3750
TOTAL			4818,27

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El sistema robótico implementado tiene una configuración angular que ha facilitado el ensamblaje del mismo y ha permitido que tenga gran maniobrabilidad en sus 5 grados de libertad, además que su efector final pueda realizar trayectorias complejas dentro de su espacio de trabajo.
- El hardware físico empleado para el brazo robótico ha sido seleccionado de manipuladores comerciales del fabricante Lynxmotion, que han permitido optar por los componentes adecuados considerando la movilidad de un brazo humano (estudio biomecánico), y enfocándose en un sistema de poca complejidad mecánica que a su vez ha facilitado el control del mismo.
- El movimiento suave logrado por la estructura robótica está sustentado en el uso de rodamientos en los ejes, que como ha sido mencionado permiten atenuar el efecto de fricción, evitando el desgaste de las piezas; de esta manera se ha logrado que el sistema mecánico tenga alta durabilidad en una amplia gama de movimientos.
- La gran variedad de servomotores disponibles en el mercado, ha permitido que se haga un análisis técnico para la selección adecuada de los actuadores del sistema robótico, dentro de este análisis se han considerado factores como: económico, consumo de energía y torque; estos factores han permitido obtener movimientos continuos en todas las articulaciones, con un buen desempeño de los actuadores empleados.
- Dentro de la funcionalidad del sistema de control, surgió la necesidad de un controlador que permita minimizar el error en estado estable existente, por lo que el compensador adecuado y que ha sido usado para el control de cada servomotor es un controlador PID, cuyos parámetros han sido calibrados de tal forma que el tiempo de respuesta sea menor a los 3 segundos con sobre impulsos pequeños y primordialmente la reducción del error en estado estable, que a la vez han permitido un buen funcionamiento del sistema.

- Las pruebas efectuadas para la verificación de la compensación de los controladores, permitieron estimar mediante la Tabla 4.11 el error promedio referente a la posición angular de cada articulación, mismo que es justificado por varias causas, de las cuales se puede resaltar: la vibración mecánica del sistema robótico, el desacoplo interno de los engranajes de cada uno de los servomotores, tolerancia provocada por el muestreo de los datos análogos y la forma de lectura de las posiciones angulares reales por parte del usuario (uso de transportadores).
- El HMI desarrollado aprovechó la facilidad y ventajas en el uso del lenguaje gráfico de programación de Labview, en este contexto se ha enfocado en un sistema interactivo para el usuario, cuyas funciones sean ejecutadas de una manera ordenada, lo que ha permitido mantener una velocidad de procesamiento adecuada, sin que se pueda entorpecer en la operación del sistema de control.
- La programación de los microcontroladores está basada en la utilización de subrutinas y un buen uso de los recursos del mismo, esto ha posibilitado un buen rendimiento del procesamiento del código del programa, asimismo una ejecución ordenada de subrutinas que evita una posible interrupción durante la operación de un modo de control, que visto de otra perspectiva imposibilita la alteración del tiempo de muestreo.
- La comunicación entre los diferentes componentes del sistema fue un punto importante de análisis, dentro del cual se ha hecho uso de comandos y protocolos de comunicación que permiten una sincronización, para que los datos transmitidos o recibidos sean confiables y así tener un buen rendimiento en el procesamiento de datos.
- El uso de dos de puertos de comunicación por parte del sistema en conjunto, fue establecido considerando que el funcionamiento de los sistemas robótico y brazos sea independiente uno del otro, logrando que éstos sean compactos y flexibles.
- El avance de la tecnología ha permitido acceder a ciertos sensores especiales conocidos como inerciales que son empleados en muchos campos, en esta ocasión fueron empleados para el seguimiento de la extremidad superior del cuerpo humano, y que en base a las pruebas

respectivas ha posibilitado una estimación bastante aceptable de la orientación espacial de los eslabones del brazo para su posterior uso como medio de control del sistema robótico.

- El uso de los sensores IMU CHR-UM6 ha permitido cuantificar la orientación del brazo humano mediante los ángulos de Euler, además se constató ciertas restricciones propias de los sensores, siendo necesario la implementación de algoritmos que han admitido que los datos sean más confiables para ser usados por el sistema de control.
- La realización de este proyecto ha permitido que el sistema robótico pueda emular gran parte de los movimientos de un brazo humano captado por un sistema de brazales en el cual se incluyen sensores ópticos y sensores inerciales (IMU), estos movimientos han sido ejecutados con un error de posición angular mínimo, lo que ha dado una idea bastante amplia de la potencialidad del sistema para aplicaciones a futuro, entre las cuales puede ser usado como medio didáctico y de tele asistencia en campos como: educacional, doméstico, investigativo, entretenimiento, comercial, entre otros.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es importante identificar correctamente los puertos de comunicación en el computador, y además que los cables empleados sean fijados adecuadamente para evitar una posible desconexión, y de esta manera garantizar la comunicación física entre los sistemas para su posterior operación adecuada.
- La ubicación de los brazales debe ser similar a la detallada en el Capítulo 4 correspondiente a las pruebas, y de igual manera deben de estar lo más fijos posible durante su uso, ya que una mala ubicación puede reflejarse en una alteración de la referencia inicial, por lo que no se podrá ejecutar el control con los brazales o quizá repercute en una ejecución con movimientos erróneos del robot pudiendo poner en riesgo su integridad.
- Si se ejecuta cualquiera de los dos modos de control para operar el sistema robótico, se recomienda no hacer movimientos muy rápidos ya que

esto puede repercutir en una movilidad brusca por parte del sistema robótico, pudiendo afectar a la vida funcional de los servomotores.

- Antes de la utilización del sistema para la emulación de los movimientos del usuario, es importante ejecutar el comando para la inicialización de los sensores inerciales (encendido de giroscopios), de esta manera se asegura que los datos sean confiables para su uso por el sistema de control; es importante que la ejecución del comando se lo realice periódicamente y cada vez que se reinicie el sistema de brazos.
- Durante el funcionamiento del control con el sistema de brazos es prescindible que el usuario esté ubicado en la posición correcta orientado al sur y evitando efectuar movimientos fuera de los límites establecidos, ya que la lectura de los sensores fuera de estos límites pueden alterar de cierta forma la operación del control, y por ende el robot puede tomar posiciones que no estén acorde a la posición del brazo del usuario.
- Es importante tomar en consideración que para el uso del sistema de brazos el entorno cercano debe estar libre de objetos metálicos o magnéticos, ya que afecta las mediciones de los sensores haciendo que sus datos no sean confiables para el sistema de control.
- Ya que en este proyecto se ha hecho uso de los ángulos de Euler de los sensores IMU como puntos de ajuste para el control del robot, se pudo evidenciar su gran factibilidad de uso en resultados favorables obtenidos a pesar de las restricciones, como trabajo adicional se podría emplear otra representación para la orientación de los eslabones, esto es haciendo uso de cuaterniones, que también pueden ser provistos por los sensores empleados, y en este mismo contexto sería muy necesario un estudio previo referente al análisis matemático con cuaterniones.
- Como un trabajo complementario del proyecto, se debe enfocar en un sistema que permita el envío de datos por la web, para que de esta manera se pueda tener un control del robot desde un lugar remoto, logrando así potencializar al proyecto como un sistema de tele control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anatomía teórica, (2012, Enero), “Anatomía 1 Miembro Superior e Inferior”, [En línea], Disponible en:
<http://anatomiateorica1marilu.blogspot.com/2012/01/anatomia-1-miembro-superior-e-inferior.html>
- [2] Wikipedia, (2013, Octubre), “Brazo”, [En línea], Disponible en:
<http://proton.ucting.udg.mx/~alberto/robotica/brazo.htm>
- [3] Dibujos Imágenes Biología, (2011, Septiembre), “Dibujo de la extremidad superior del cuerpo humano”, [En línea], Disponible en:
<http://biologiafotosdibujosimagenes.blogspot.com/2011/09/dibujo-de-la-extremidad-superior-del.html>
- [4] García J., (2010), “Módulo de bases anatómicas y fisiológicas del deporte”, [En línea], Disponible en:
http://www.edvillajunco.es/doc/5_extremidad_superior.pdf
- [5] López R., (2009), “Arcos y ángulos de movimiento”, [En línea], Disponible en:
<http://www.slideshare.net/pedroespinoza106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>
- [6] Biomecánica del miembro superior, (2011, Junio), “Planos y ejes de movimiento”, [En línea], Disponible en:
<http://upperlimbbiomechanics.blogspot.com/2011/06/planos-y-ejes-de-movimiento.html>
- [7] Wikipedia, (2014, Abril), “Plano Anatómico”, [En línea], Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Plano_anat%C3%B3mico
- [8] Rodríguez C.; Quintero H.; Aschner H., (2005, Diciembre), “Movimiento del brazo humano”, [En línea], Disponible en:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200004&lng=es&nrm=iso
- [9] Torres F.; Pomares J.; Gil P.; Puente S., “Robots Y Sistemas Sensoriales”, Segunda edición, Madrid (España), Prentice Hall, 2002
- [10] Wikipedia, (2014, Febrero), “Robot humanoide”, [En línea], Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Robot_humanoide

- [11] Adriana A., (2009 Enero), "Clasificación de robots", [En línea], Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/12687023/Clasificacion-de-Los-Robots>
- [12] Moriello S., (2005, Octubre), "Los robots inteligentes autónomos son la nueva generación", [En línea], Disponible en: http://www.tendencias21.net/Los-Robots-Inteligentes-Autonomos-son-la-nueva-generacion_a744.html
- [13] Gonzáles V., (2002, Marzo), "Robots de servicio y teleoperados", [En línea], Disponible en: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/teleoperado.htm
- [14] Ollero A., "Robótica Manipuladores y Robots Móviles", Primera edición, Barcelona (España), Marcombo S.A., 2001
- [15] Sotomayor N., (2010), "Robótica Industrial", [En línea], Disponible en: <http://ciecfie.epn.edu.ec/Material/4toNivel/Robotica/Robotica.pdf>
- [16] Díaz S., (2010, Enero), "Inteligencia artificial y robótica", [En línea], Disponible en: <http://www.slideshare.net/mgarofalo85/robotica-2865399>
- [17] Sin autor, (2008), "Estructura de un robot industrial", [En línea], Disponible en: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1H2B5THKD-51F5C1-J48/morfologia%20de%20un%20robot.pdf>
- [18] Molina J., (2011), "Sensores", [En línea], Disponible en: http://www.profesormolina.com.ar/tecnologia/sens_transduct/que_es.htm
- [19] Fairchild Semiconductor, (2013, Junio), "Reflective Object Sensor", [En línea], Disponible en: <http://www.fairchildsemi.com/ds/QR/QRD1114.pdf>
- [20] ArduTEKA, (2011, Diciembre), "El servomotor", [En línea], Disponible en: <http://www.arduteka.com/2011/12/componentes-el-servomotor/>
- [21] Martín E., (2011, Junio), "Servomotor", [En línea], Disponible en: <http://www.slideshare.net/Martinfeg/servomotor-8634935>
- [22] Sin autor, (2009), "El servomotor", [En línea], Disponible en: <http://www.info-ab.uclm.es/labeledc/solar/electronica/elementos/servomotor.htm>
- [23] Wikipedia, (2013, Marzo), "Unidad de medición inercial", [En línea], Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_medici%C3%B3n_inercial
- [24] Sin autor, (2012), "Unidad de medición Inercial", [En línea], Disponible en: http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_121315.html

- [25] Ciencia e ingeniería, (2012, Diciembre), “Acelerómetros, magnetómetros y giroscopios”, [En línea], Disponible en: <http://www.cienciaeingenieria.com/2012/12/acelerometro-magnetometros-y.html>
- [26] Pololu Robotics y Electronics, (2013, Octubre), “UM6 Ultra-Miniature Orientation Sensor Datasheet”, [En línea], Disponible en: <http://www.pololu.com/product/1255>
- [27] Ogata K., “Ingeniería de Control Moderna”, Tercera Edición, México, Prentice Hall, 2001
- [28] Lynxmotion, (2009), “Products”, [En línea], Disponible en: <http://www.lynxmotion.com/c-27-robotic-arms.aspx>.
- [29] Vallejo P.; Zambrano J., “Física Vectorial”, Séptima edición, Ecuador, 2009
- [30] Sin autor, (2011), “Fuente de poder”, [En línea], Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/info/11487220/La-Fuente-de-Poder-de-tu-PC.html>
- [31] Escudero J.; Parada M.; Simón F., (2010), “Filtros”, [En línea], Disponible en: http://www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%204.%20Filtros.pdf
- [32] Pololu Robotics y Electronics, (2005), “Micro serial servo controller”, [En línea], Disponible en: <http://www.pololu.com/product/207/resources>
- [33] Ingeniería de sistema y automática, (2012), “El módulo LCD”, [En línea], Disponible en: <http://isa.umh.es/asignaturas/sea/practicas2C/P7/practica7.pdf>
- [34] Sotomayor N., (2009, Septiembre), “Control con microprocesadores”, [En línea], Disponible en: <http://ciecfe.epn.edu.ec/CControlC/materias/cmicos/CONTROL%20CON%20MICROPROCESADORES.pdf>
- [35] Wikipedia, (2014, Julio), “Circuito de LED”, [En línea], Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_de_LED
- [36] Atmel, (2013, Febrero), “8-bit Atmel Microcontroller with 16K/32K/64K bytes In-System Programmable Flash”, [En línea], Disponible en: http://www.atmel.com/images/atmel-8011-8-bit-avr-microcontroller-atmega164p-324p-644p_datasheet.pdf
- [37] Renesas Electronics Corporation, (2010, Abril), “74LS151 1-of-8 Data selector/Multiplexer”, [En línea], Disponible en: http://documentation.renesas.com/doc/products/logic/rej03d0497_hd74ls151.pdf

- [38] Texas Instruments, (2004), "MAX 232 Dual EIA-232 Drivers/Receivers", [En línea], Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [39] Mazzone V., (2002, Marzo), "Control automático 1", [En línea], Disponible en: <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [40] Morilla F., (2007, Enero), "Controladores PID", [En línea], Disponible en: <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/EI%20controlador%20PID.pdf>
- [41] "Sistemas de control discreto", Apuntes de clase IEE773, Escuela Politécnica Nacional, 2012
- [42] Dinámica y control de procesos, (2011), "Ajuste de controladores", [En línea], Disponible en: http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/dcp/teorico/16_AJUSTE_DE_CONTROLADORES.pdf
- [43] Gómez D., (2005), "Identificación y sintonización de un PID", [En línea], Disponible en: http://gtts.ehu.es/dEyE/Actualizable/Anual/Curso05-06/VI_Jornadas_IE/trabajos_dirigidos/Gomez_de_la_Riva.pdf
- [44] Cevallos A., "Hablemos de Electricidad", Primera edición, Ecuador, 2000