

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

BRAZO ROBÓTICO DE 5GDL CON SISTEMA DE CONTROL MODIFICABLE POR EL USUARIO PARA FINES DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ROBÓTICA

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecatrónico**, que presenta el bachiller:

Carlos Andrés Soto Bravo

ASESOR: Denis Bryan Peña Pachamango

Lima, julio del 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea el diseño de un brazo robótico de 5 grados de libertad con un sistema de control de movimiento modificable por el usuario y un control de seguridad que garantice el bienestar del usuario y de la máquina.

Se realizan los cálculos del diseño mecánico y electrónico necesarios que garanticen el buen funcionamiento de la máquina. Para ello, se obtiene el modelo cinemático del brazo robótico por medio de la obtención de los parámetros de Denavit-Hartenberg y el método geométrico. Por otro lado, se obtiene el modelo dinámico del robot resolviendo las ecuaciones de Euler-Lagrange. El dimensionamiento de piezas, ensamblaje y planos mecánicos del robot se realiza mediante el software Autodesk Inventor; así como también se consigue exportar el archivo CAD al software Matlab con la finalidad de corroborar una posible aplicación del diseño propuesto. Además, se realiza los circuitos esquemáticos del sistema usando el programa Eagle, para la selección de componentes electrónicos se hace uso de diferentes manuales y datasheets otorgados por los fabricantes. Para la cotización de los componentes utilizados, se obtuvo proformas y cotizaciones por correo electrónico, cabe resaltar que en el caso de componentes importados se está considerando el costo de envío.

Respecto a los resultados obtenidos, estos fueron positivos debido a que se consigue tener un diseño de brazo robótico que sea seguro para el usuario debido a que contiene sensores de corriente para evitar una sobrecarga en los motores y una parada de emergencia para detener el movimiento del robot cuando se requiera. Además, se le permite al usuario colocar las diferentes ecuaciones de movimiento para el control de robot y de esta manera poder tener un control libre a voluntad del usuario. Algunos cálculos fueron realizados por el software Autodesk Inventor, el reporte mostrado por este programa mostró un diseño válido y resultados positivos que ratificaron como correctos los parámetros ingresados para su análisis.

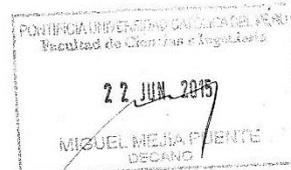
En conclusión, el brazo robótico diseñado tiene un fin educacional y de investigación. El sistema de control de movimiento puede ser modificado por el usuario; es decir, le permite alterar diferentes parámetros en las ecuaciones de movimiento para su control. Cabe resaltar que se le proporciona al usuario información de la cinemática y dinámica del brazo robótico; de esta manera, con pruebas experimentales es posible corroborarlas. Esta información ayudará al usuario a realizar el control del brazo robótico diseñado.

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR
 EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título	: Brazo robótico de 5GDL con sistema de control modificable por el usuario para fines de investigación en ingeniería robótica.
Asesor	: Denis Bryan Peña Pachamango
Alumno	: Carlos Andrés Soto Bravo
Código	: 20101642
Tema N°	: 100
Fecha	: 16/06/2015


Descripción y Objetivos

En la actualidad, los centros educativos adquieren en su mayoría brazos robóticos industriales para los laboratorios referentes a la robótica. Cada uno se diferencia en las tecnologías utilizadas en su estructura mecánica, software, hardware, etc. con la finalidad de proporcionar recursos que satisfagan a las necesidades de los usuarios. Todas estas diferencias son colocadas en un sistema cerrado que imposibilita a los usuarios modificar las ecuaciones y los diferentes parámetros de control de movimiento del robot. De esta manera, se limita en gran medida el aprendizaje e impide desarrollar la investigación e innovación tecnológica en cuanto al control de movimientos avanzados.

En el presente trabajo se plantea el diseño de un robot de 5 grados de libertad con un sistema de control modificable por el usuario mediante softwares como Matlab o Labview. Además cuenta con un sistema de seguridad que sirve para evitar colisiones del robot con su entorno, para ello se monitorea la corriente que circula por cada motor mediante sensores. Así mismo cuenta con leds indicadores por cada grado de libertad cuya función es la de informar al usuario si existe una colisión, se infringe el área de trabajo del robot o si un determinado motor está realizando sobreesfuerzo. En cuanto a la estructura del robot, esta es de un peso liviano con la finalidad de facilitar su transporte. Cabe resaltar que su carcasa es desmontable fácilmente, de esta manera el usuario podrá apreciar los diversos mecanismos usados en su construcción. Por último, es más económico respecto a la mayoría de brazos robóticos utilizados en centros de educación superior.

La finalidad de este robot respecto a la educación es el de brindar al estudiante una herramienta de aprendizaje, mediante la experimentación práctica, para que este pueda diseñar, estudiar y modificar los parámetros correspondientes a los conceptos de cinemática, dinámica y trayectoria de un brazo robótico; así como dar a conocer los distintos mecanismos utilizados en la robótica. En cuanto al ámbito de la investigación, el robot sirve como plataforma no virtual de experimentación de nuevos sistemas de control de movimiento para los brazos robóticos ayudando el avance tecnológico y desarrollo de la ingeniería robótica.

MAXIMO : 100 páginas





Dedicatoria

A mis padres, Máximo y Pilar, quienes me han apoyado incondicionalmente a culminar mis estudios, y por ser la fuerza que me impulsan a seguir adelante, para ser cada día mejor persona y mejor profesional.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por darme la vida.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A la Pontífice Universidad Católica del Perú por recibir en sus aulas formación académica, humana y profesional.

A mi asesor Denis Peña Pachamango y a los docentes de la Especialidad Ingeniería Mecatrónica por compartir sus conocimientos, sus enseñanzas en el transcurso de los años de estudios.



INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	2
1.1 Presentación de la Problemática.....	2
1.2 Estado de la Tecnología	4
1.2.1 Productos en el mercado	4
1.2.2 Investigación de la Tesis	6
1.2.3 Publicaciones de Paper	7
II. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRONICO Y PRESENTACIÓN DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN	8
2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico	8
2.1.1. Requerimientos mecánicos.....	8
2.1.2 Requerimientos electrónicos	9
2.1.3 Requerimientos de control	9
2.2 Concepto de solución.....	10
III. SISTEMA MECATRÓNICO	12
3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico	12
3.1.1 Sistema de Alimentación de energía eléctrica	13
3.1.2 Sistema de control	13
3.1.3 Sistema de sensores.....	13

3.1.4 Sistema de motores y transmisión	15
3.1.5 Sistema de Procesamiento de Datos	15
3.2 Sensores y Actuadores	17
3.2.1 Sensores	17
3.2.2 Actuadores	20
3.2.3 Otros	23
3.3 Planos Mecánicos del Sistema mecatrónico.....	31
3.3.1 Ensamble del Robot	31
3.3.2 Ensamble de la base	32
3.3.3 Ensamble del brazo	34
3.3.4 Ensamble del antebrazo.....	36
3.3.5 Ensamble del acoplamiento del Gripper.....	38
3.4 Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico	39
3.4.1 Circuito esquemático de conexiones de Arduino.....	39
3.4.2 Circuito esquemático de conexiones del Roboclaw.....	40
3.4.3 Circuito esquemático de distribución de voltaje	41
3.4.4 Circuito esquemático de la tarjeta de sensado	41
3.5 Diseño de Control	43
3.5.1 Diagrama de Flujo Principal.....	43
3.5.2 Diagrama de Flujo Subrutina de interrupción externa	44
3.5.3 Diagrama de Flujo de "Ir posición Home"	45
3.5.4 Diagrama de Flujo de "Lectura de Datos"	48
3.5.5 Diagrama de Flujo "Accionamiento de Motores"	48
IV. PRESUPUESTO.....	50
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Especificaciones de Kuka Youbot.....	4
Tabla 1.2: Especificaciones de Me Arm.....	5
Tabla 1.3: Especificaciones de ABB IRB 120.....	5
Tabla 1.4: Especificaciones de Kinova	6
Tabla 3.1: Especificaciones Sensor de Corriente ACS 712electr-5a-t.....	17
Tabla 3.2: Especificaciones de Limit Switch	18
Tabla 3.3: Especificaciones del Enconder	20
Tabla 3.4: Especificaciones de Motor	20
Tabla 3.5: Especificaciones Roboclaw	24
Tabla 3.6: Especificaciones Arduino UNO	25
Tabla 3.7: Especificaciones de fuente 12V	27
Tabla 3.8: Especificaciones de módulo de parada de emergencia	29
Tabla 4.1: Presupuesto Electrónica	50
Tabla 4.2: Presupuesto Mecánica	51
Tabla 4.3: Presupuesto Total	51

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Kuka Youbot.....	4
Figura 1.2: Me Arm V0.4 Pocket Sized Robot Arm.....	5
Figura 1.3: ABB IRB120	5
Figura 1.4: Kinova Jaco Re.....	6
Figura 1.5: FEROS II Diseño del robot.....	6
Figura 1.6: Scrobot V.....	7
Figura 1.7: Simulación de AL5B 3D.....	7
Figura 1.8: Diseño geométrico del brazo robótico.....	7
Figura 2.1: Diseño mecatrónico	10
Figura 2.2: Concepto de solución.....	11
Figura 3.1: Diagrama de bloques	12
Figura 3.2: Diagrama de bloques de tarjeta de sensado de corriente	14
Figura 3.3: Ejemplo de aplicación con Matlab 2014a	15
Figura 3.4: Bibliotecas en Labview Robotics.....	16
Figura 3.5: Paleta de brazo robótico en Labview Robotics	16
Figura 3.6: Sensor de corriente ACS712elect-5a-t.....	17
Figura 3.7: Ubicación de los sensores de corriente	18
Figura 3.8: Roller Arm.....	18
Figura 3.9: Ubicación de Limit Switch	19
Figura 3.10: Encoder Pololu.....	19

Figura 3.11: Motor Pololu 12VDC.....	20
Figura 3.12: Representación de motor para articulación del hombro	21
Figura 3.13: Representación de motor para articulación del codo.....	22
Figura 3.14: Representación de inclinación de gripper	23
Figura 3.15: Representación de giro de gripper.....	23
Figura 3.16: Controlador de motor Roboclaw	24
Figura 3.17: Ubicación de los Roboclaw.....	24
Figura 3.18: Arduino UNO	25
Figura 3.19: Ubicación del Arduino.....	26
Figura 3.20: Fuente de voltaje 12VDC.....	26
Figura 3.21: Ubicación de la fuente 12V.....	27
Figura 3.22: Led rojo	28
Figura 3.23: Posiciones de Led	28
Figura 3.24: Modulo de parada de emergencia	29
Figura 3.25: Llave térmica 10 A	30
Figura 3.26: Ubicación de llave térmica.....	30
Figura 3.27: Prensa Quick Grip x P600.....	30
Figura 3.28: Ubicación de prensas de mano	31
Figura 3.29: Vista Frontal y de perfil de brazo robótico.....	32
Figura 3.30: Vista Isométrica de la base.....	32
Figura 3.31: Vista de planta de la base.....	33
Figura 3.32: Vista seccionada AM	34
Figura 3.33: Vista isométrica ensamble del brazo	34

Figura 3.34: Vista frontal del ensamble brazo	35
Figura 3.35: Vista de planta del ensamble brazo	35
Figura 3.36: Vista Isométrica del ensamble del antebrazo	36
Figura 3.37: Vista de planta del ensamble del antebrazo.....	36
Figura 3.38: Corte AR del ensamble antebrazo	37
Figura 3.39: Vista Isométrica del ensamble de acoplamiento de gripper.....	38
Figura 3.40: Corte AV de ensamble de acoplamiento de gripper	38
Figura 3.41: Diagrama esquemático del Arduino	39
Figura 3.42: Diagrama de conexiones del Roboclawl	40
Figura 3.43: Circuito esquemático de distribución de voltaje.....	41
Figura 3.44: Circuito Esquemático de sensado de corriente	42
Figura 3.45: Diagrama de Flujo Principal	43
Figura 3.46: Diagrama de Flujo de la subrutina para detener motores	44
Figura 3.47: Diagrama de Flujo "Ir posición hOme"	45
Figura 3.48: Diagrama de Flujo "Lectura de datos"	48
Figura 3.49: Diagrama de Flujo "Accionamiento de motores"	48

LISTA DE SÍMBOLOS

F : Fuerza de empuje vertical [N]

F_n : Fuerza normal a la superficie [N]

P : Potencia [W]

t : Tiempo [s]

V : Voltaje [V]

I : Corriente eléctrica [A]

R : Resistencia eléctrica [Ω]

M_f : Momento flector [Nm]

T : Torque [Nm]

w : Velocidad Angular [rad/s]

INTRODUCCION

En la actualidad, los centros educativos adquieren en su mayoría brazos robóticos industriales para los laboratorios referentes a la robótica. Cada uno se diferencia en las tecnologías utilizadas en su estructura mecánica, software, hardware, etc. con la finalidad de proporcionar recursos que satisfagan a las necesidades de los usuarios. Todas estas diferencias son colocadas en un sistema cerrado que imposibilita a los usuarios modificar las ecuaciones y los diferentes parámetros de control de movimiento del robot. De esta manera, se limita en gran medida el aprendizaje e impide desarrollar la investigación e innovación tecnológica en cuanto al control de movimientos avanzados.

En la presenta Tesis se plantea el diseño de un robot de 5 grados de libertad con un sistema de control modificable por el usuario mediante softwares como Matlab o Labview. Además cuenta con un sistema de seguridad que sirve para evitar colisiones del robot con su entorno, para ello se monitorea la corriente que circula por cada motor mediante sensores. Así mismo cuenta con leds indicadores por cada grado de libertad cuya función es la de informar al usuario si existe una colisión, se infringe el área de trabajo del robot o si un determinado motor está realizando sobreesfuerzo. En cuanto a la estructura del robot, esta es de un peso liviano con la finalidad de facilitar su transporte.

Cabe resaltar que su carcasa es desmontable fácilmente, de esta manera el usuario podrá apreciar los diversos mecanismos usados en su construcción. Por último, es más económico respecto a la mayoría de brazos robóticos utilizados en centros de educación superior.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Presentación de la problemática:

En los últimos años a nivel mundial se ha incrementado el uso de brazos robóticos para diferentes fines. Según la IRF (Internacional Federation of Robotic) en el año 2013 las ventas se incrementaron en un 12% en el mundo. América tampoco es la excepción a este aumento acelerado de adquisición de robots, en el mismo año fueron adquiridos 30,300 brazos robóticos, siendo 8% más que el año 2012 [1].

Este aumento se da principalmente en las industrias automotrices que en el año 2013 han adquirido casi 70,000 brazos robóticos en todo el mundo. En cambio, la cantidad de robots utilizados en las universidades o institutos no es significativa y estos robots son considerados según la IRF en la categoría de “otros” que en ese mismo periodo se adquirieron 10,000 unidades [1].

Existen empresas que ofrecen brazos robóticos orientados al aprendizaje; sin embargo, en su mayoría se enfocan en la operación del robot. Por ejemplo, las empresas ABB [2] y FANUC [3] brindan programas educacionales pero utilizan brazos robóticos industriales para tales fines. Un caso distinto es el brazo robótico de la empresa KUKA “youbot” [4], que es un robot de sistema abierto orientado a la investigación, el cual permite modificar el diseño de

su control; sin embargo, tiene un costo elevado que asciende aproximadamente a 15 mil dólares [5] mientras que los robots industriales de la misma empresa pueden costar desde 6,750 dólares [6].

Es por este motivo que los centros educativos adquieren en su mayoría robots industriales para los laboratorios y la investigación. Todos los brazos robóticos industriales siguen normas y patrones internacionales [7] respecto a la seguridad y condiciones mínimas para su construcción; sin embargo cada uno se diferencia en las tecnologías utilizadas en su estructura mecánica, software, hardware, etc. con la finalidad de proporcionar recursos que satisfagan a sus clientes. Como los fabricantes buscan proteger la propiedad intelectual de sus creadores, todas estas diferencias son colocadas en un sistema cerrado que imposibilita a los investigadores, profesores y alumnos conocer y/o poder modificar las ecuaciones y los diferentes parámetros de control de movimiento del robot. De esta manera, se limita en gran medida el aprendizaje e impide la aplicación de los conocimientos obtenidos en las clases teóricas o el de desarrollar investigación e innovación tecnológica en cuanto al control de movimiento avanzados.

Es por todo lo mencionado anteriormente que en la actualidad, la enseñanza de pregrado y postgrado en diferentes cursos de la rama de robótica son dictados con un contenido mayormente teórico. En los laboratorios se enseña principalmente lo elemental del brazo robótico, los cuales consisten en como operar al robot, la programación (realizada en el entorno que proporciona el fabricante) y su mantenimiento, pero no se profundiza en los fundamentos matemáticos para el control avanzado del robot, ya que esta se encuentra como un sistema cerrado para los usuarios. En el caso de la investigación y desarrollo de control de movimiento avanzado, no se puede trabajar directamente con un robot industrial de sistema cerrado, debido a que se limita completamente la variación o mejoramiento del diseño de control en el movimiento del brazo robótico.

Ante este problema, en la presente tesis se plantea el desarrollo del diseño de un brazo robótico de 5 grados de libertad con un sistema de control abierto modificable por el usuario y con un control de seguridad para evitar daños del robot por causa de colisiones y sobrecarga de corriente de los motores. Este brazo robótico está orientado a la educación superior e investigación en la ingeniería robótica con el fin de brindar una herramienta para el aprendizaje y puesta en práctica de la tecnológica en este campo.

1.2 Estado de la tecnología:

En el mundo la cantidad de brazos robóticos ha aumentado cada año significativamente, aproximadamente un promedio de 9.5% anual. Para el aprendizaje de esta nueva tecnología existen robots que son usados para la investigación y la capacitación de estudiantes en las universidades; sin embargo, en su mayoría se usan robots industriales que son de sistema cerrado y da al estudiante el aprendizaje solo en la operación del robot, además que imposibilita en gran medida la investigación en el control del robot. Es por ello que existen diferentes tesis, publicaciones e informes de investigación que de alguna manera incentivan a la creación de brazos robóticos educacionales. A continuación se nombran diferentes ejemplos del estado de la tecnología.

1.2.1 Productos en el mercado:

1.2.1.1 KUKA YouBot [8]:

Este robot es de software de código abierto diseñado especialmente para los centros de investigación en las universidades. Su objetivo es desarrollar aplicaciones para la manipulación móvil, es considerado como un puente entre la robótica industrial de hoy en día y la robótica de servicios del futuro.

Tabla 1.1: Especificaciones de Kuka YouBot

Grados de libertad	5
Altura	655 mm
Volumen de trabajo	0.513 m ³
Peso	6.3 kg
Carga	0.5 kg
Estructura	Magnesio Fundido
Comunicación	EtherCAT
Voltaje	24 V
Potencia Limitada	80W



Figura 1.1: Kuka Youbot
Fuente: KUKA ROBOTICS [8]

1.2.1.2 Me Arm [9]:

Está dirigido principalmente para los aficionados al campo de la robótica que están familiarizados con el Arduino, Raspberry u otra tarjeta electrónica. Su uso es principalmente

en los colegios o talleres de primeros ciclos en la universidad. Su objetivo principal es el armado de un brazo robótico a partir del diseño de cada una de sus partes.

Tabla 1. 2: Especificaciones de MeArm

Grados de Libertad	3
Controlador	Arduino, Raspberry, etc
Estructura	Acrilico
Cantidad servomotores	4 microservos

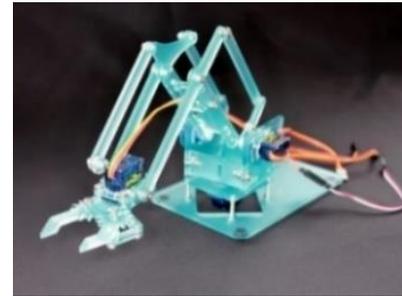


Figura 1.2: MeArm V0.4 - Pocket Sized Robot Arm
Fuente: MakerBot Thingiverse [9]

1.2.1.3 ABB IRB120 [10]:

Es un brazo robótico industrial que se encuentra dentro de un programa de aprendizaje dado por la empresa ABB. Este programa ayuda a educar y proporciona entrenamiento práctico a los estudiantes universitarios sobre los conceptos básicos de la tecnología de automatización en la manufactura. Resulta difícil su uso en la investigación ya que es un robot industrial de sistema cerrado.

Tabla 1.3: Especificaciones del ABB IRB120

Grados de libertad	6
Peso	25 kg
Carga Máxima	4 kg
Alcance Máximo	580 mm
Ruido	Max 70 dB



Figura 1.2: ABB IRB120
Fuente: Manual de Usuario
ABB IRB120 [10]

1.2.1.4 Kinova Jaco Re [11]:

Este es un brazo robótico diseñado especialmente para aplicaciones de investigación y ayuda a personas con capacidad física limitada. También es posible su uso para la educación en las universidades.

Tabla 1.4: Especificaciones Kinova

Grados de Libertad	6
Estructura	Fibra de carbono y aluminio
Peso	5.7 kg
Altura máxima	90 cm
Carga máxima	1.5 kg
Programación	Ubuntu Linux y Windows
Voltaje de entrada	18 V a 29 V
Velocidad máxima del brazo	15 cm/seg
Temperatura ambiente	0°C a 30°C



Figura 1.3: Kinova Jaco Re
Fuente: ClearPathRobotic [11]

Además de los brazos robóticos mostrados, existen actualmente en el mercado una gran cantidad de brazos robóticos con fines educativos para colegios pero no para la universidad e investigación. Este es el caso de Stacker Robot Kit, Khepera III, AL5D, Mini Robot Arm, uArm, Owi Robotic Arm, etc [12]. De esta manera se busca recopilar las diferentes características de los brazos robóticos educacionales ya existentes para darle una solución a la problemática planteada en los capítulos anteriores.

1.2.2 Investigación de tesis:

1.2.2.1 Desarrollo de un sistema abierto para la enseñanza de robots manipuladores [13]:

Tesis de maestría realizada en la Universidad de Sao Paulo por Daniel Barbuto Rossato en el 2009. En este tema de tesis se busca hacer un sistema abierto para la enseñanza del funcionamiento de robots manipuladores. El sistema permite la utilización de diversos brazos mecánicos, bastando para eso la modificación del modelo en el software. Además permite ejecutar tanto la simulación como el control en el brazo real. Los algoritmos de parámetros de control, de trayectoria y de simulación pueden ser alterados por el usuario a través del software. Debe tener medidas de seguridad tanto en el hardware como en el software.

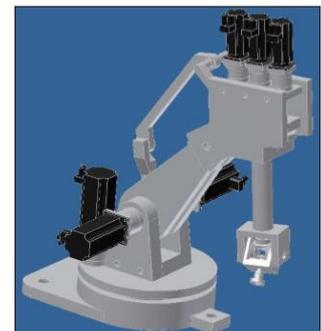


Figura 1.4: FEROS II Diseño del robot
Fuente: Tesis [13]

1.2.2.2 Caracterización de un robot manipulador articulado [14]:

Tesis de maestría realizada en el Centro Nacional de Innovación y Desarrollo Tecnológico (México) por Salomón Abdalá Castillo y Raúl Ñeco Caberta en el año 2003. El objetivo es identificar los diferentes parámetros para la configuración cinemática y dinámica para un brazo robótico, particularmente del ScorbotV. Es necesario la identificación de parámetros para tener un sistema de control abierto en un brazo robótico educacional. En la tesis se busca poner en operación al ScorbotV para el laboratorio de CINEDET.

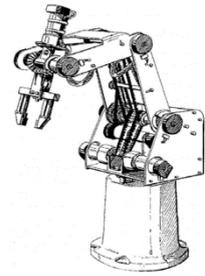


Figura 1.5: Scorbot V
Fuente: Tesis [14]

1.2.2.3 Simulación e interfaz de un brazo robótico educacional de 5 grados de libertad [15]:

Tesis de maestría realizada en la Universidad Islámica de Gaza por Mohammed Reyad AbuQassem en el año 2010. Este tema de tesis tiene como principal objetivo el desarrollo de un software para el ensayo de las características dinámicas del brazo AL5B Robot, además la realización de un modelo cinemático completo para el robot y la aplicación de un camino para el algoritmo de planificación de trayectoria.

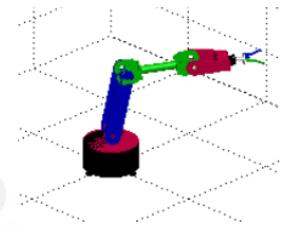


Figura 1.6: Simulación de AL5B
3D
Fuente: Tesis [15]

1.2.3 Publicaciones de papers:

1.2.3.1 Basic Laboratory Experiments with an Educational Robotic Arm [16]:

Este paper fue publicado en el año 2013 con el fin de diseñar y construir un brazo robótico para un laboratorio con propósitos educativos. Para realizar el análisis y modelado del robot se usó Matlab / Simulink / SimMechanism. El robot a construir tiene 6 grados de libertad de los cuales 3 se encuentran en el gripper. La meta del proyecto fue implementar un brazo robótico a bajo costo con propósitos educativos con el fin de resolver la cinemática directa e inversa vía Matlab.

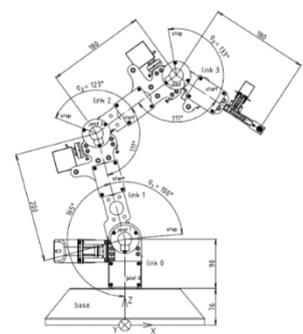


Figura 1.7: Diseño geométrico
del brazo robótico
Fuente: Paper [16]

CAPÍTULO 2

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO Y PRESENTACIÓN DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN

2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico:

Se requiere diseñar un brazo robótico para el óptimo aprendizaje práctico e investigación de los estudiantes en los cursos de robótica dictados en universidades o institutos. Para ello se requiere de un sistema abierto de control de movimiento que permita a los usuarios modificar las ecuaciones y los diferentes parámetros del diseño del controlador. Además se busca que el brazo robótico sea **económico** (aproximadamente US\$3000) para que pueda estar al alcance de la mayor cantidad de centros de educación superior en el mundo. Es por este motivo que se requiere que el robot tenga las siguientes características:

2.1.1 Requerimientos Mecánicos:

- **De 3 a 5 grados de libertad.** El diseño del robot debe estar orientado a los ejemplos utilizados en las clases teóricas que el estudiante recibe en los cursos de robótica.
- **Sin carga mínima.** El fin del robot es para el aprendizaje y no para la industria.
- **Masa menor a 8 kg.** Debe ser de fácil transporte dentro y fuera del cualquier espacio educativo o de investigación.
- Debe tener una parada de emergencia que este próximo al operador del robot.
- **Altura máxima de 800 mm y radio de operación máxima de 600 mm.**
- **Carcasa fácilmente desmontable.** Se debe poder tener acceso a los mecanismos internos y componentes electrónicos. De esta manera, el usuario tendrá un mejor entendimiento de la mecatrónica utilizada para la creación del robot.
- **Estructura mecánica segura.** No debe tener puntas o filamentos cortantes que puedan dañar al usuario que manipule el brazo robótico.
- **Generación de ruido que no perturbe al usuario.**
- **Temperatura de operación de 2°C a 40°C.**

2.1.2 Requerimientos electrónicos:

- **Dar posición en el tiempo.** El sistema debe ser capaz de entregar al software usado la posición en el tiempo de cada articulación del brazo robótico para poder realizar el control del mismo.
- **Alimentación eléctrica de 220VAC a 60 Hz.**
- **No usar fuentes adicionales.** No debe ser necesario usar otras fuentes de voltaje para energizar los demás componentes electrónicos que no trabajen a 220VAC.
- **Comunicación serial robot-pc.** Sistema capaz de controlar el brazo robótico mediante comunicación serial con la computadora.

2.1.3 Requerimientos de Control:

- **Sistema abierto.** El brazo robótico debe ser modificable respecto a su control de movimiento, mas no al sistema de seguridad. El usuario deberá poder configurar el sistema a través de la inserción de parámetros en el modelo matemático.
- **Sistema control de seguridad.** Se debe evitar que cualquier tipo de error en programación ingresado por el usuario pueda dañar al equipo o sus alrededores, al ser un robot de aprendizaje los errores son más frecuentes. Estas medidas de seguridad debe contener las siguientes características según la norma ISO10218 [7].

2.2 Concepto de solución:

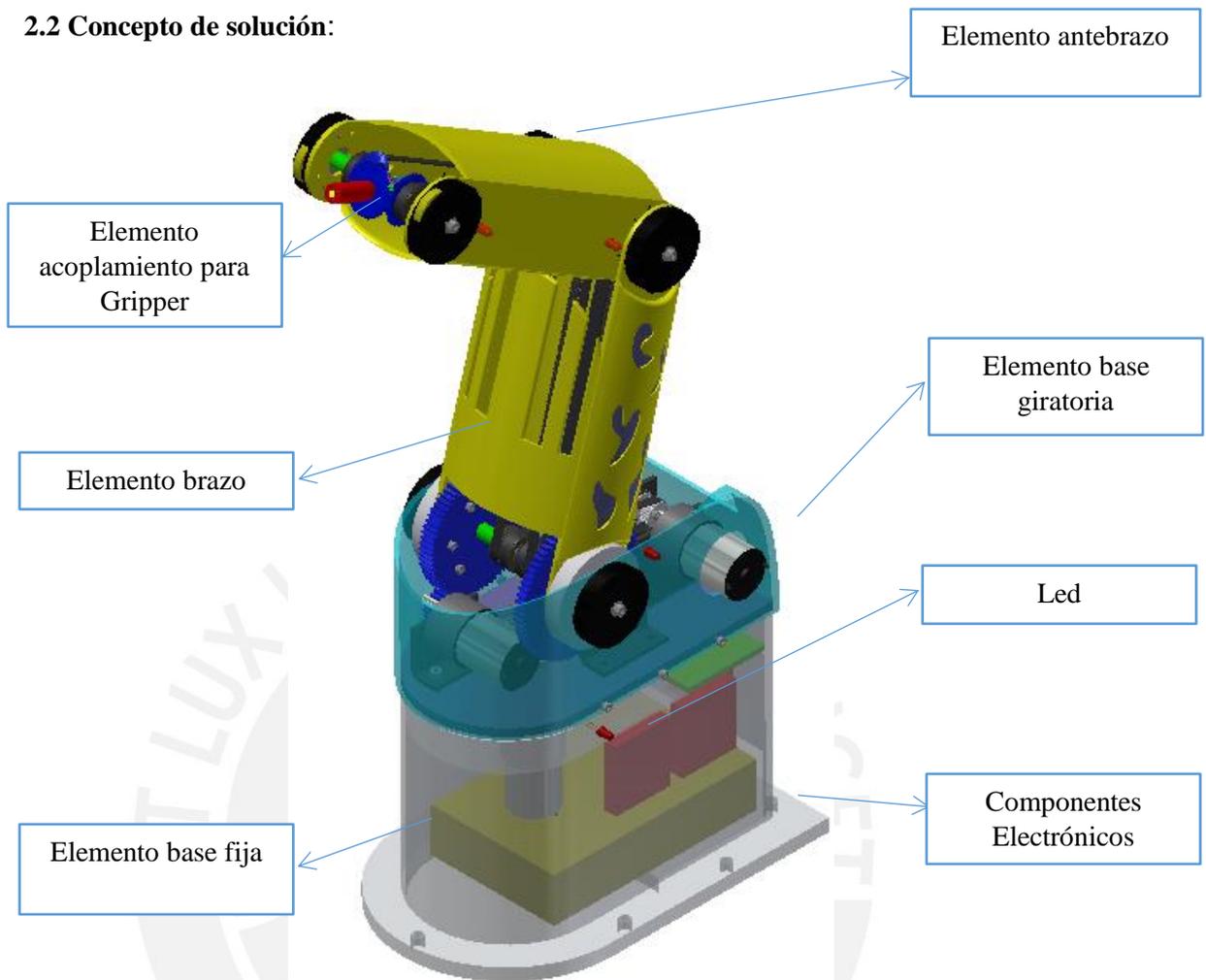


Figura 2.1: Diseño mecatrónico
Fuente: Elaboración propia

En la figura 2.1 se muestra el sistema mecatrónico el cual es un brazo robótico de 5 grados de libertad. Este está compuesto por una base fija, una base giratoria, el brazo, el antebrazo y el acoplamiento donde se colocará un gripper.

A continuación, para el accionamiento de las articulaciones se utilizan 5 motores con encoders incorporados a su eje. Cuatro de estos motores son ubicados en la base giratoria del robot, mientras que un motor es ubicado en la base fija. Para el caso del movimiento de la base giratoria del robot, el motor es colocado en la base fija y se realiza un acoplamiento directo de su eje con la base giratoria. Para la articulación del hombro y codo, se hace uso de engranajes rectos. Cabe resaltar que para la articulación del codo se añade poleas y correas dentadas para la transmisión de movimiento. Para el movimiento de inclinación y giro de la muñeca se hace uso de

un mecanismo de engranajes ubicados como un diferencial los cuales son accionados por poleas y correas dentadas que son transmitidos desde dos motores ubicados en la base giratoria.

Respecto al sistema electrónico, está conformado principalmente de un Arduino [17], controlador de motor Roboclaw [18] y sensores de corriente [19]. Todas las tarjetas son ubicadas en la base fija del motor. Además se colocan leds en cada una de las articulaciones para identificar la articulación la cual está realizando un torque excesivo y de esta manera advertir al usuario algún posible error que está realizando en el control del robot. El sistema también contiene limit switches que están ubicados en las articulaciones de nuestro robot, estos componentes nos brindará información de la posición de inicio o HOME de nuestro sistema. Cabe resaltar que cuenta con una fuente de 12VDC que energiza a todo el sistema; se hace uso de una llave térmica para el encendido del robot y un botón de emergencia para cualquier eventualidad o peligro que pueda suceder.

Finalmente, la mayoría de piezas mecánicas son fabricadas por medio de la impresión 3D. El material seleccionado es ULTEM9085 ya que cuenta con una buena relación resistencia/peso. Cabe resaltar que el brazo robótico será sujetado por dos prensas de mano, cada uno a los lados del brazo robótico; o por medio de pernos dependiendo de la elección del usuario.

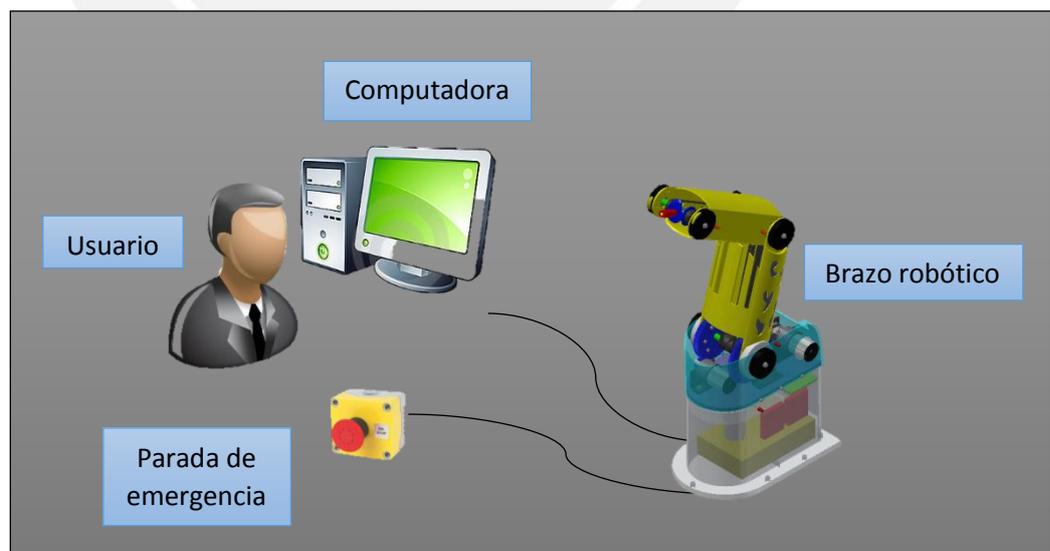


Figura 2.2: Concepto de solución
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

SISTEMA MECATRÓNICO

3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico:

En la figura 3.1 se muestra el diagrama del funcionamiento del sistema mecatrónico, esta cuenta con 5 sistemas esenciales los cuales son: Sistema de Procesamiento de datos, sistema de alimentación, sistema de control, sistema de transmisión de movimiento y sistema de sensores. A continuación se detallará el funcionamiento de cada uno de estos sistemas.

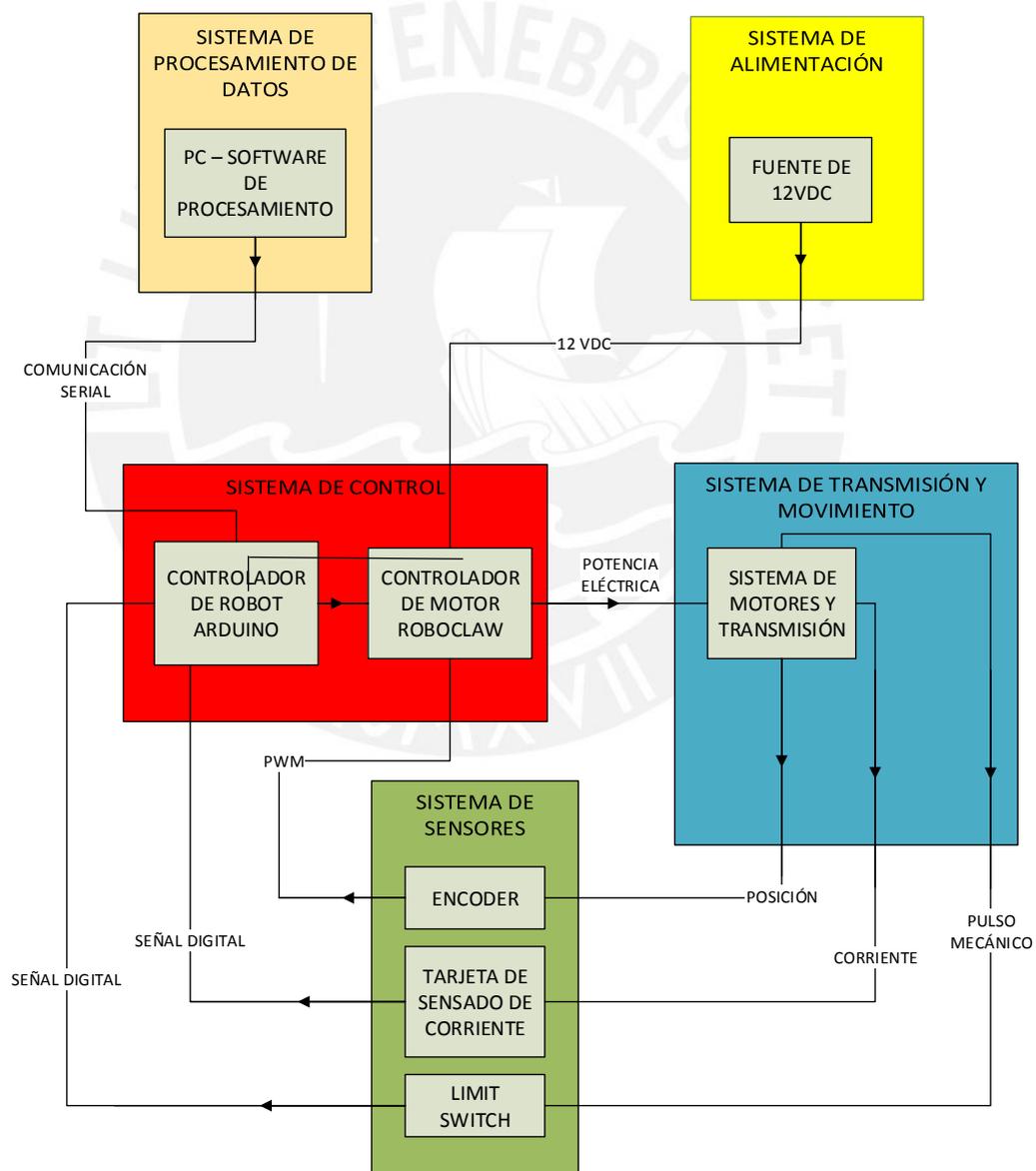


Figura 3.1: Diagrama de bloques
Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Sistema de Alimentación de Energía Eléctrica:

El Sistema de Alimentación de Energía Eléctrica está constituido por una fuente de 12V [20] y una tarjeta que distribuye el voltaje para los controladores de motor y el Arduino. La fuente de voltaje tiene una entrada de 220VAC y dos salidas de 12V, cabe resaltar que la fuente puede brindar una corriente hasta 10A, en el caso haya un exceso de corriente, la fuente cuenta con un sistema de protección que evitaría daños. Además también se cuenta con un fusible de 10A en la salida de la fuente y una llave térmica para el encendido del robot.

3.1.2 Sistema de Control:

El Sistema de Control está constituido por el Arduino UNO y el Roboclaw 5A. El Arduino UNO es una tarjeta electrónica la cual incluye un microcontrolador Atmega328 [21]. El Roboclaw 5A es un controlador de motor que puede leer datos desde el encoder y realizar el control de un motor mediante datos recibidos por sus pines de control S1 y S2. A continuación se detalla las funciones de estos componentes.

3.1.2.1 Controlador Principal:

Está conformado por el Arduino UNO. Su función principal es recibir los datos enviados por el software utilizado, luego realizar un procesamiento para obtener los parámetros que deberán ser enviados al Roboclaw. Al ya existir una librería del Roboclaw para el Arduino, la comunicación entre ambos se realiza de manera sencilla. Como función secundaria, el Arduino realiza el frenado de los motores al recibir una interrupción proveniente de la tarjeta de sensado de corriente.

3.1.2.2 Controlador de motores:

Se utilizan 5 controladores de Motor Roboclaw que se encargan de leer los datos provenientes de los encoders y enviarlo por comunicación serial al controlador principal. Además, recibe datos provenientes del Arduino para el control de velocidad de los motores.

3.1.3 Sistema de Sensores:

El Sistema de sensores está constituido por los encoders, sensores de corriente y limit switches. Estos sensores servirán como retroalimentación al controlador y se obtendrán beneficios como precisión, seguridad y posición de inicio del sistema. A continuación se detallan las funciones de cada sensor:

3.1.3.1 Encoders:

El Sistema de encoders está constituido por 5 encoders incrementales que se encuentran acoplados a cada uno de los motores a utilizar. Los encoders enviarán pulsos por segundos al

roboclaw para realizar una retroalimentación que mejorará la exactitud y precisión de posición del motor en cada instante de tiempo.

3.1.3.2 Tarjeta de sensado de corriente:

Esta tarjeta está constituida por sensores de corriente, comparadores y circuitos integrados que conforman 4 compuertas lógicas OR cada una. La función principal es enviar una interrupción externa al controlador principal en el caso haya un exceso de corriente en alguno de los motores. Además, de identificar el motor que está realizando el sobreesfuerzo por medio del encendido de leds. El funcionamiento se detalla en el diagrama de bloques de la figura 3.2.

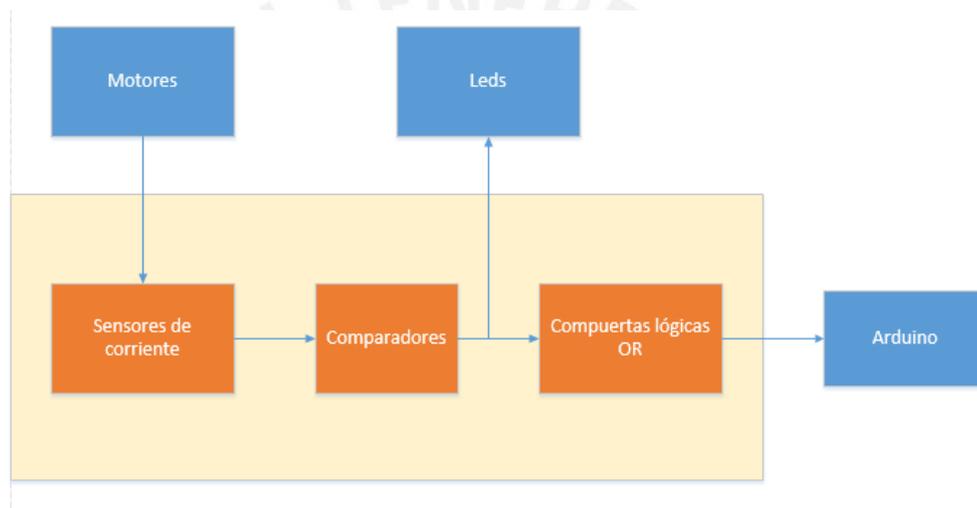


Figura 3.2: Diagrama de bloques de tarjeta de sensado de corriente
Fuente: Elaboración propia

3.1.3.3 Limit Switch:

Existen 5 limit switches ubicados de forma estratégica en cada una de las articulaciones del brazo robótico. Al iniciar el sistema, un motor asociado a una articulación será accionado hasta pulsar el limit switch asociado a él, inmediatamente después el motor será accionado con un giro contrario al que se hizo inicialmente a una velocidad muy pequeña. Se esperará hasta que se desactive el pulsador del limit switch para detener el motor. Cabe resaltar que se realiza el mismo procedimiento para cada una de las articulaciones de manera secuencial, una después de la otra. De esta manera se indicará que una articulación ya llegó a su posición HOME.

3.1.4 Sistema de motores y transmisión:

El Sistema de motores y transmisión está constituido por 5 motores con diferentes mecanismos a utilizar para cada uno de ellos, se hace una mayor explicación de este tema en el capítulo 3.2.2. La función de este sistema es transformar la potencia eléctrica recibida en potencia mecánica para el movimiento del codo, hombro y base giratoria del robot.

3.1.5 Sistema de Procesamiento de Datos:

El Sistema de Procesamiento de Datos consta principalmente de una PC y un software que pueda realizar el procesamiento del diseño de control del brazo robótico. La función principal de este sistema es realizar el procesamiento de datos de las ecuaciones que corresponden al diseño de control y enviar, dependiendo del caso, los datos de posición y velocidad al sistema de control central. Un ejemplo de aplicación con el software Matlab se muestra en la figura 3.3:

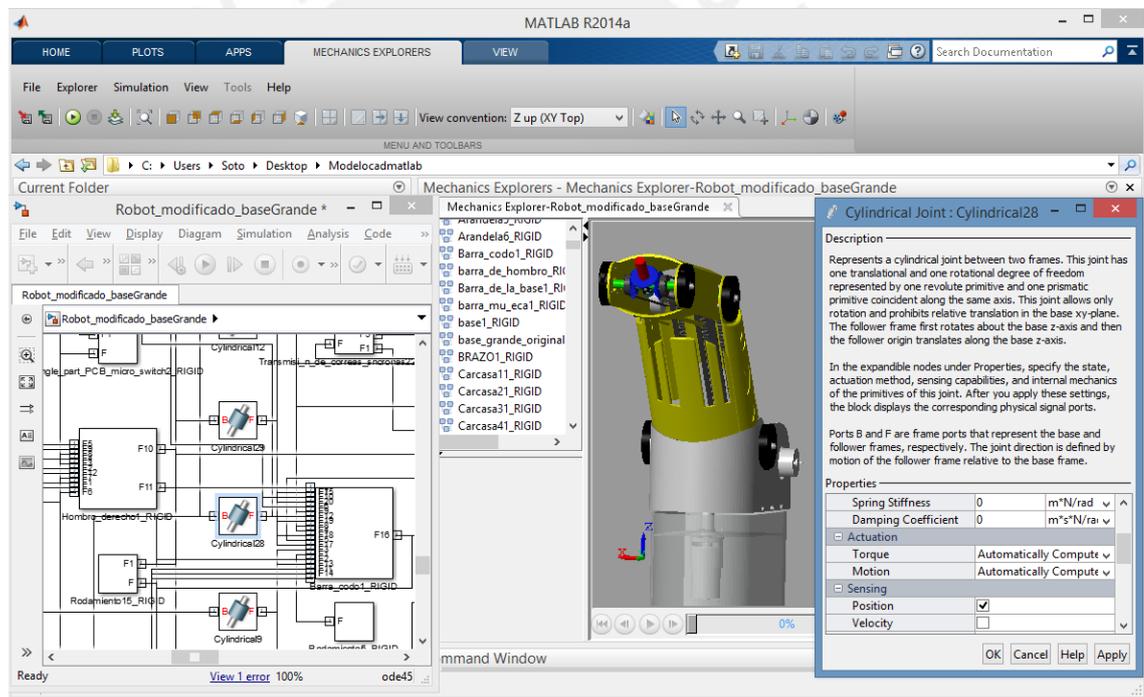


Figura 3.3: Ejemplo de aplicación con Matlab 2014a
Fuente: Elaboración propia

Para obtener lo mostrado en la figura 3.3 se hace uso del software Matlab y la librería SimMechanics. Esta librería proporciona un entorno de simulación para sistemas 3D mecánicos. De esta manera, es posible modelar el sistema usando bloques que representan los cuerpos, articulaciones y limitaciones. Luego SimMechanics formula y resuelve las ecuaciones de movimiento para el sistema mecánico completo. Modelos de sistemas CAD, incluyendo la masa, la inercia, las articulaciones, limitación, y la geometría 3D, se pueden

importar en SimMechanics. Una animación 3D generada automáticamente le permite visualizar la dinámica del sistema.

Además, es posible utilizar la librería Robotic Toolbox que es una caja de herramientas realizada para la investigación y docencia en la robótica. Este es un software libre y proporciona funciones para la manipulación y conversión entre tipos de datos como vectores, transformaciones homogéneas, ángulos de Euler, etc. que son necesarios para representar la posición y orientación en tres dimensiones.

Por otro lado, el software Labview también cuenta con una librería destinada para la robótica el cual es Labview Robotics Module. De esta manera Labview proporciona herramientas necesarias para el desarrollo de la robótica. Ver figura 3.4.

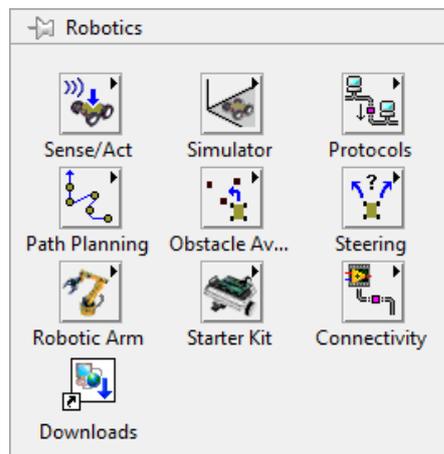


Figura 3. 4. Bibliotecas en Labview Robotics

Fuente: Overview of the LabVIEW Robotics Module [22]

En estas bibliotecas es posible utilizar la opción “Robotic Arm” la cual brinda diferentes opciones para el modelamiento de brazos robóticos como se muestra en la figura 3.5:

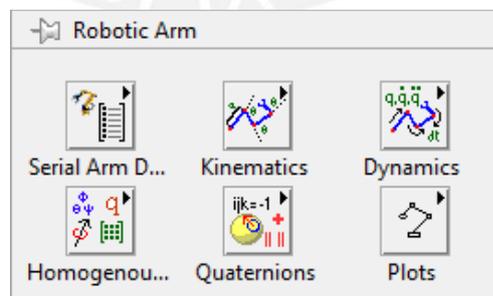


Figura 3.5: Paleta de brazo robótico en Labview Robotics

Fuente: Overview of the LabVIEW Robotics Module [22]

Finalmente, se puede apreciar que es posible el control de un brazo robótico desde software como Matlab o Labview. Estos programas brindan una gran cantidad de herramientas que

mejoran el entorno de programación del usuario, de esta manera se consigue realizar el procesamiento para obtener el control de movimiento del brazo robótico propuesto.

3.2 SENSORES Y ACTUADORES:

3.2.1 Sensores:

3.2.1.1 Sensor de Corriente:

Esta placa está constituida principalmente por el integrado ACS712ELCTR-5A [23]. Este sensor de corriente es capaz de medir de forma lineal corrientes de hasta 5 Amperios en ambos sentidos (+5A y -5A). Produce en su salida una tensión lineal proporcional a la corriente que atraviesa sus pines de medición. En el sistema mecatrónico se usará en las entradas de alimentación de los motores para saber si el motor llega a tener alguna sobrecarga eléctrica producto de alguna colisión del brazo robótico.

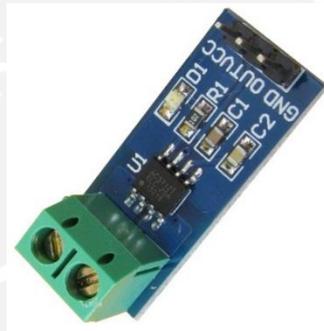


Figura 3.6: Sensor de corriente ACS712elctr-5a-t
Fuente: Aliexpress [19]

Tabla 3.1: Especificaciones Sensor de Corriente ACS712elctr-5a-t

Marca	Allegro
Voltaje de operación	5 V CD
Medición de Corriente	Corriente alterna y directa
Cantidad de pines	Tres pines (5 V, GND y señal)
Rango máximo	5 Amperios
Compatibilidad	Con Arduino
Dimensiones	3,1cm x 1,4cm

Los sensores de corriente son colocados en la pared interna de la base fija como se aprecia en la figura 3.7.

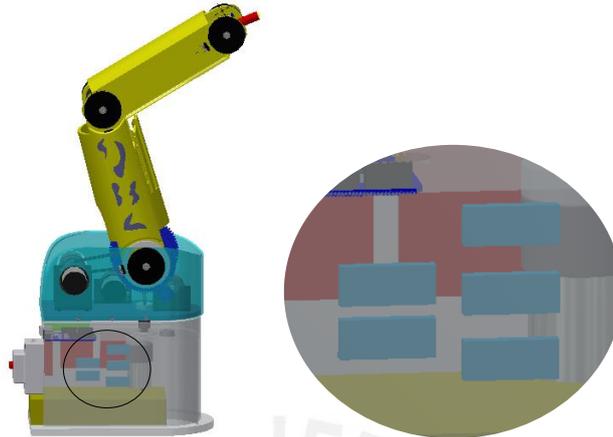


Figura 3.7: Ubicación de los sensores de Corriente
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Limit Switch:

El Limit Switch Temco CN0134 [24] es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor y es accionado de forma mecánica. En el brazo robótico será utilizado para colocar el sistema mecatrónico en una posición HOME, es decir en una posición de inicio. Es por ello que está ubicado de manera estratégica en cada una de las articulaciones y es sostenido por medio de pernos colocados en los dos agujeros que contiene.



Figura 3.8: Roller Arm
Fuente: Ebay [24]

Tabla 3.2: Especificaciones de Limit Switch

Tipo	Roller Arm
Corriente de trabajo máxima	5A
Vida Mecánica	1 millón de operaciones
Vida eléctrica	100 mil operaciones

A continuación se detallan las posiciones de los limit switches en el sistema

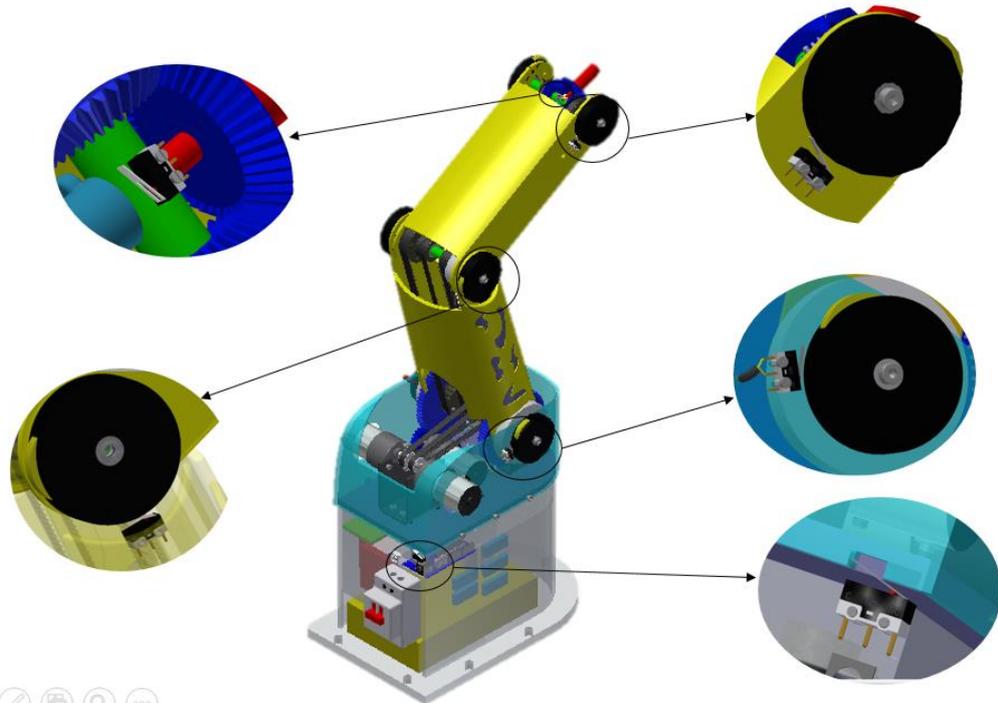


Figura 3.9. Ubicación de Limit Switch
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Encoder:

Se utilizará los encoders ya acoplados a los motores seleccionados. Este es un sensor de tipo Efecto Hall que se utiliza para detectar la rotación de un disco magnético unido al eje del motor. En el sistema mecatrónico se usarán 5 encoders (uno para cada motor). Esto servirá como retroalimentación al controlador del motor y reducirá el error de posición del motor. De esta manera se podrá realizar un mejor control y se obtendrá una mayor precisión en nuestro sistema. Estos datos del encoder serán enviados al controlador del motor para mejorar el control de posición y velocidad.



Figura 3.10: Encoder Pololu
Fuente: Pololu [25]

Tabla 3.3: Especificaciones del Encoder

Resolución	64 cuentas por revolución
Voltaje de alimentación	3.5V a 20V
Corriente máxima	10 mA

3.2.2 Actuadores:

3.2.2.1 Motores:

Se usará los motores Pololu modelo 37d57L de 12V [25] con encoder incorporado. El motor tiene una reducción de engranajes integrada de 131:1 que permitirá aumentar su torque de salida. Se selecciona este motor al cumplir las especificaciones de torque y velocidad de los cálculos realizados mostrados en el Anexo 2. En el sistema mecatrónico se usarán 5 motores, cuatro de ellos ubicados en la base giratoria del robot y uno de ellos en la base fija. El motor ubicado en la base fija se encargará de dar movimiento a un engranaje que girará de manera síncrona con la base giratoria del robot. De la misma manera se tendrá un motor en la base giratoria que mediante un mecanismo por engranajes hará mover el hombro del robot. Por otro lado, un motor se encargará de dar la articulación del codo mediante un mecanismo por engranajes y correas dentadas. Por último, dos de los motores se encargarán principalmente de controlar el diferencial para darle movimiento en dos ejes al gripper (de inclinación y rotación).



Figura 3.11: Motor Pololu 12VDC
Fuente: Pololu [25]

Tabla 3.4: Especificaciones Motor

Reducción por engranajes	131:1
Corriente Stall	5 A
Torque Stall	1,8 Nm
Velocidad sin carga	80 RPM
Masa	229.63 gramos
Tamaño	37D x 69L mm

A continuación se detalla las posiciones de cada uno de los motores a usar:

3.2.2.1.1 Motor para la articulación del hombro:

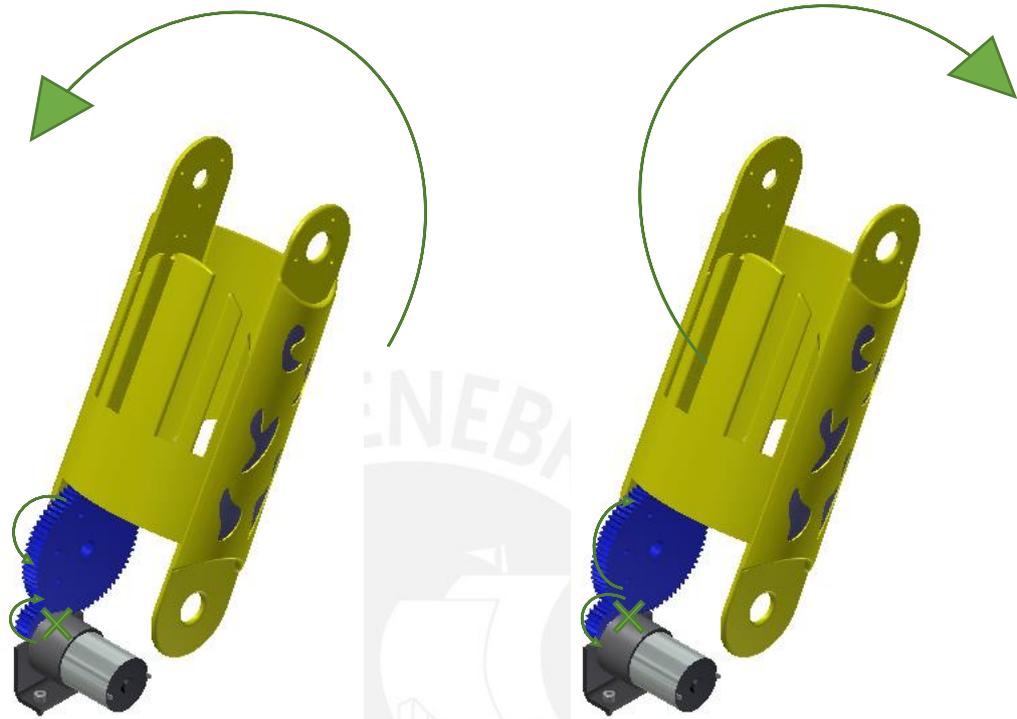


Figura 3.12: Representación de motor para articulación del hombro
Fuente: Elaboración propia

Se utilizará una reducción por engranajes rectos para conseguir suficiente fuerza en la articulación del hombro. La relación de transmisión es igual a 4, los cálculos correspondientes se aprecian en el anexo 3. El engranaje conducido está unido al eslabón del brazo de robot y se encontrará apoyado en una barra la cual girará libremente respecto a engranaje.

En la figura 3.12 se puede apreciar los dos tipos de movimientos que pueden existir; cabe resaltar que si el motor gira en un sentido, el eslabón girará en el sentido contrario.

Por último, el punto “x” mostrado representa el eje del motor y es en donde se inicia el movimiento. Las flechas en cada imagen de la figura representan el sentido de giro en cada parte del mecanismo.

3.2.2.1.2 Motor para la articulación del codo:

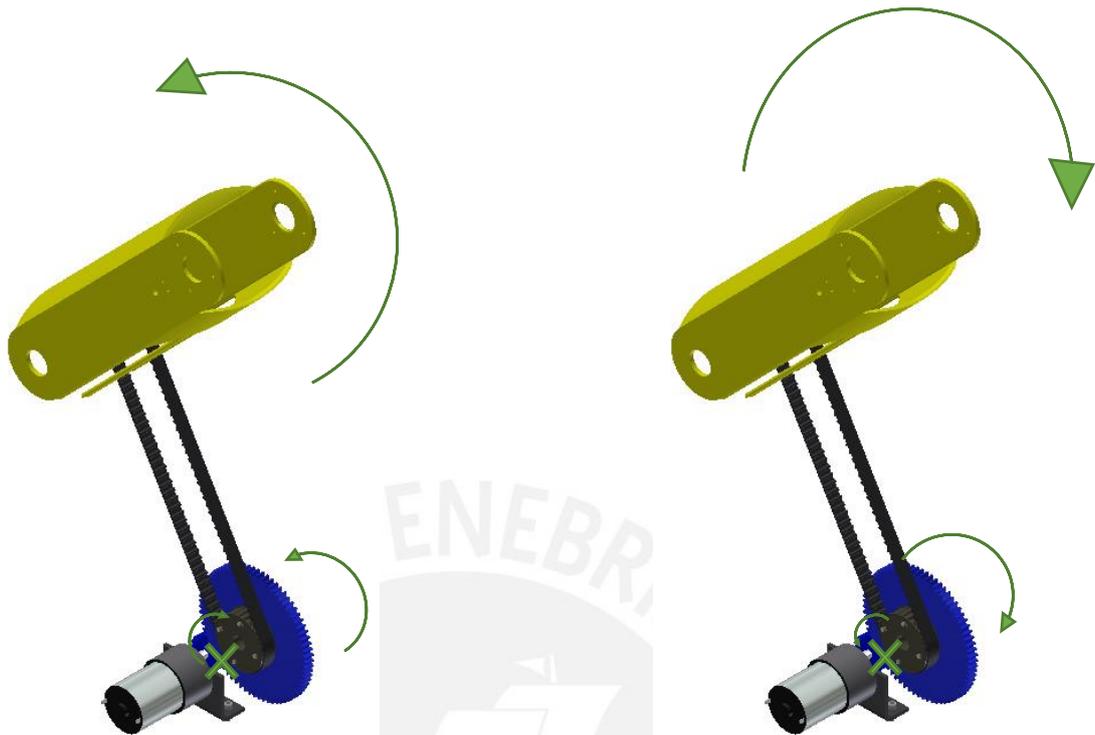


Figura 3.13: Representación de motor para articulación del codo
Fuente: Elaboración propia

Se utiliza una reducción por engranaje recto y se transmite mediante correas dentadas la fuerza necesaria para realizar la articulación del codo. El engranaje conducido está unido a la polea, de esta manera ambos se moverán de manera síncrona y generará un movimiento en la faja que a su vez conduce a una polea que se encuentra apoyado en una barra en la articulación del codo. Esta polea se une al eslabón del antebrazo para conseguir el movimiento de la articulación del codo.

En la figura 3.13 se puede apreciar los dos tipos de movimientos que pueden existir; cabe resaltar que si el eje del motor gira en un sentido, el eslabón girará en el sentido contrario. Esto se debe principalmente por el uso de engranajes rectos en este mecanismo.

Por último, el punto “x” mostrado representa el eje del motor y es en donde se inicia el movimiento. Las flechas en cada imagen de la figura representan el sentido de giro en cada parte del mecanismo.

3.2.2.1.3 Motores para gripper:

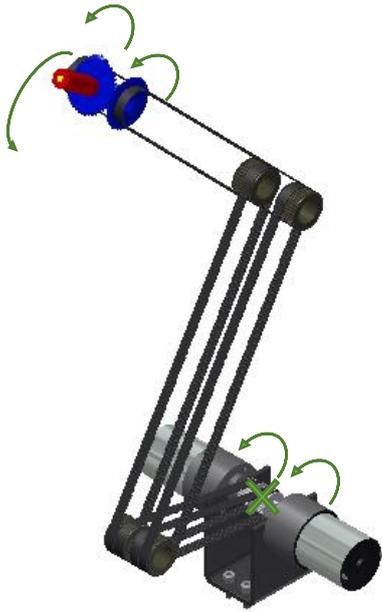


Figura 3.14: Representación de inclinación de gripper
Fuente: Elaboración propia

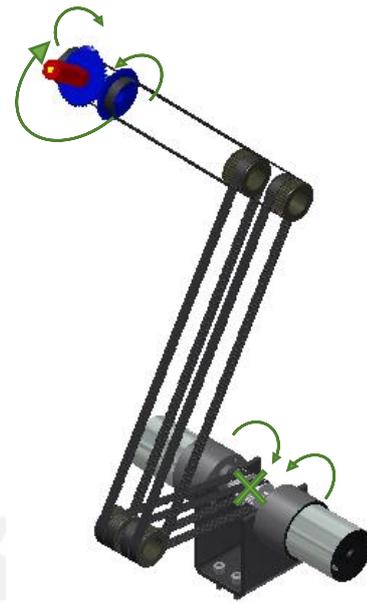


Figura 3.15: Representación de giro de gripper
Fuente: Elaboración propia

Desde la base se comienza la transmisión por fajas para poder controlar un mecanismo diferencial ubicado en la zona del gripper. Mediante un diferencial se realizarán los movimientos de inclinación (ver figura 3.14) y rotación (ver figura 3.15) de la muñeca para obtener de esta manera dos grados de libertad a nuestro sistema. Cabe resaltar que un movimiento en sentido horario u antihorario de ambos motores generará el giro sobre su propio eje de la muñeca del robot, mientras que al girar ambos en sentidos contrarios generará la inclinación de la muñeca del robot.

3.2.3 Otros:

3.2.3.1 Controlador de Motor Roboclaw :

El Roboclaw es una tarjeta de control de motor que puede realizar un control PID y recibir datos provenientes de un encoder para su retroalimentación y de esta manera reducir el error generado al controlar la posición o velocidad del motor. Para el sistema mecatrónico será necesario el uso de 3 tarjetas para los 5 motores a utilizar debido a que cada roboclaw puede controlar hasta dos motores. El roboclaw [8] se encargará de enviar los datos de la lectura de los encoder al arduino y recibirá instrucciones de este por sus pines de transmisión S1 y S2 para el control de los motores. Será energizado a 12V ya que los motores seleccionados trabajan con ese voltaje de alimentación. Por otro lado, para el control digital se energizará con 5V provenientes del Arduino [9]. Finalmente, el roboclaw permite configurar en 4 modos diferentes: Analógico, RC, Serial y "Packet Serial". Para el caso del sistema

mecatrónico se utiliza en el modo Packet Serial ya que en este modo permite enviar y recibir datos y se utilizan para ellos los pines S1 y S2 mencionado. Para obtener mayor información revisar el Anexo 12.



Figura 3.16: Controlador de motor Roboclaw
Fuente: Pololu [18]

Tabla 3.5: Especificaciones Roboclaw

Cantidad de canales para motores	2
Voltaje de operación	6V a 34V
Corriente continua por canal	5A
Corriente pico	10A
Ancho	4.3 cm
Largo	4.8 cm
Masa	17 gramos

Los 3 Roboclaws son ubicados en la base fija del robot, son colocadas en sus paredes internas. Para mayor detalle ver la figura 3.17.

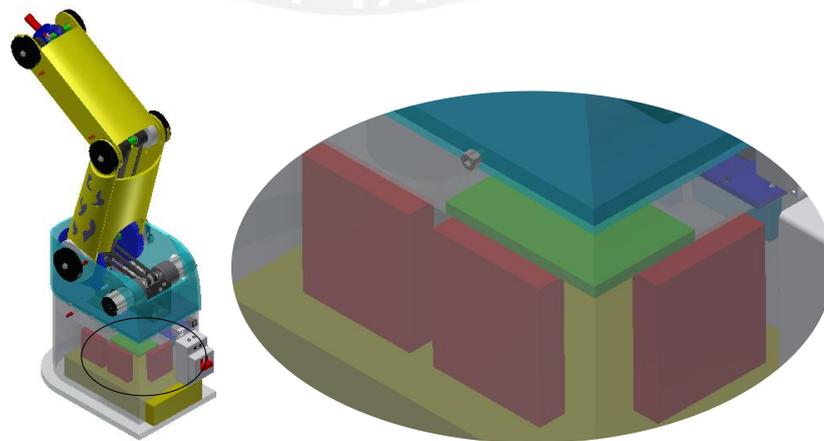


Figura 3.17: Ubicación de los Roboclaw
Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Arduino UNO:

El Arduino UNO R3 es una placa electrónica basada en el ATmega328. Cuenta principalmente con 14 pines digitales, 6 entradas analógicas y una entrada de conexión USB que sirve para cargar el programa desde el computador y como alimentación de energía para el arduino. En el sistema mecatrónico esta placa recibirá datos de velocidad angular de los motores provenientes del software a utilizar. Estos datos enviados al Arduino serán procesados de tal manera de enviar los correspondientes datos a los Roboclaws para el correcto control de los 5 motores a utilizar. Además se encargará de realizar un algoritmo de seguridad al recibir los datos del sensor de corriente.



Figura 3.18: Arduino UNO
Fuente: Web Arduino [17]

Tabla 3.6: Especificaciones Arduino UNO

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de Operación	5V
Voltaje de entrada	7V-12V
Cantidad de pines digitales (I/O)	14 pines
Cantidad de pines analógicos	6 pines
Corriente continua	40 mA
Velocidad de Clock	16 MHz
Largo	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25gramos

El Arduino está ubicado en la base fija del robot con los conectores para la comunicación y alimentación hacia a fuera de la estructura.

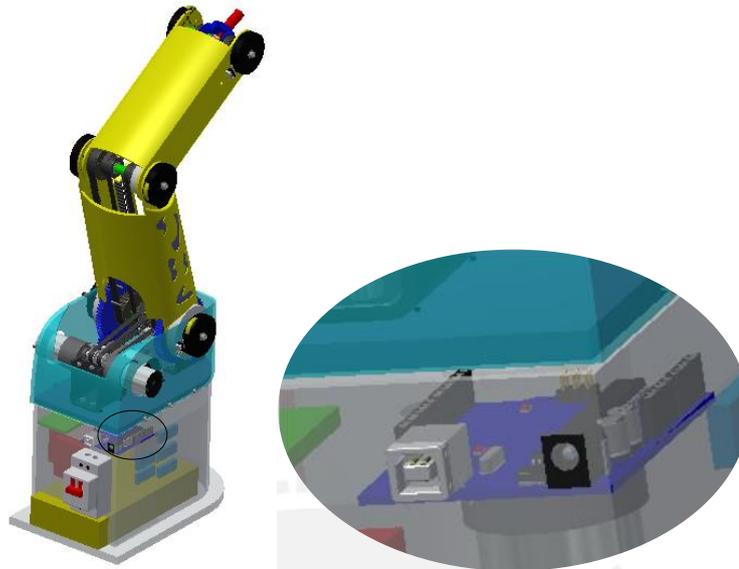


Figura 3.19: Ubicación del Arduino
Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3. Fuente de 12VDC – 30A:

Se usa una fuente de 12VDC de la Marca Fesete y Modelo S-350-12 para energizar a los motores. La fuente escogida cumple con los requerimientos presentados en el anexo 7. Tiene una entrada de 220VAC y una salida constante de 12V. Esta fuente de voltaje tiene un sistema de protección contra corrientes excesivas; la máxima corriente aceptada es de 30A, por lo que al superar esta corriente el sistema de protección actúa para evitar daños en la fuente. Para mayor información revisar su datasheet el cual se encuentra en el Anexo 13.



Figura 3.20: Fuente de voltaje 12VDC
Fuente: KinterPrinter 3D [20]

Tabla 3.7: Especificaciones de fuente 12V

Voltaje de Entrada	AC110/220V
Frecuencia de entrada	50/60 Hz
Voltaje de salida	12 VDC
Rango de salida de voltaje	+/- 1%
Corriente Máxima de salida	30A
Potencia	360 W
Eficiencia	83%
Temperatura	-10°C a 60°C
Dimensiones	170x90x44mm
Peso	0.87 Kg

A continuación, se detalla la ubicación de la fuente de 12V la cual se encuentra en la base fija del robot.

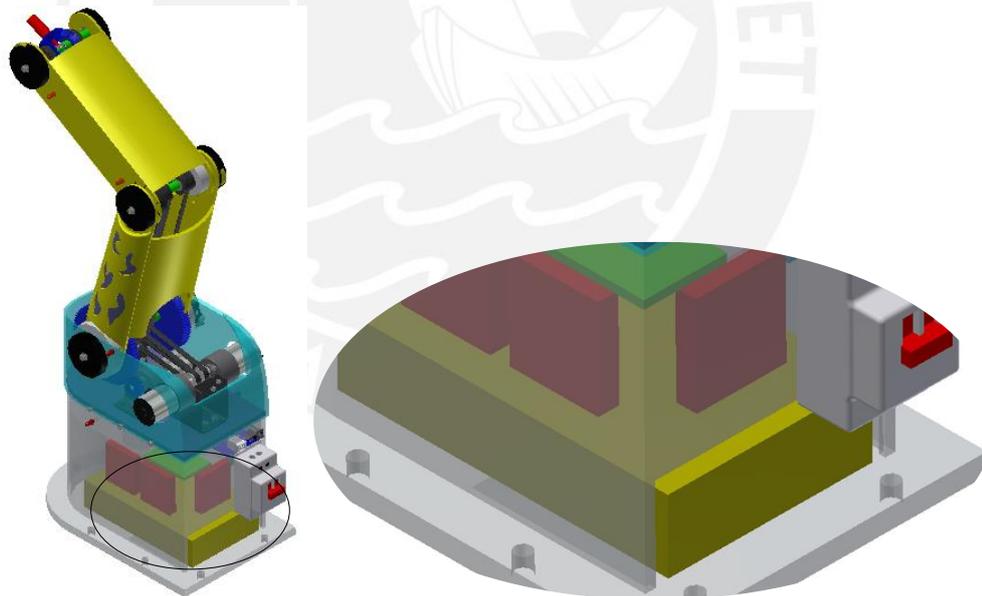


Figura 3.21: Ubicación de la fuente 12V
Fuente: Elaboración propia

3.2.3.4. Leds:

Se usarán 4 leds difusos rojos para indicar la articulación que falla en nuestro sistema. Un led será ubicado en la base fija, este sensor estará relacionado con el motor de la base y se encenderá cuando se haya superado su corriente máxima. De la misma manera se colocará un sensor en la base giratoria cerca a la articulación del hombro y otro en el brazo al lado de

la articulación del codo. Cabe resaltar que se utilizará un solo led para la articulación de la muñeca ya que este cuenta con dos motores para realizar los movimientos de rotación y giro.



Figura 3.22: Led rojo
Fuente: Ebay

A continuación se detallan la posición de los leds en el sistema mecatrónico:

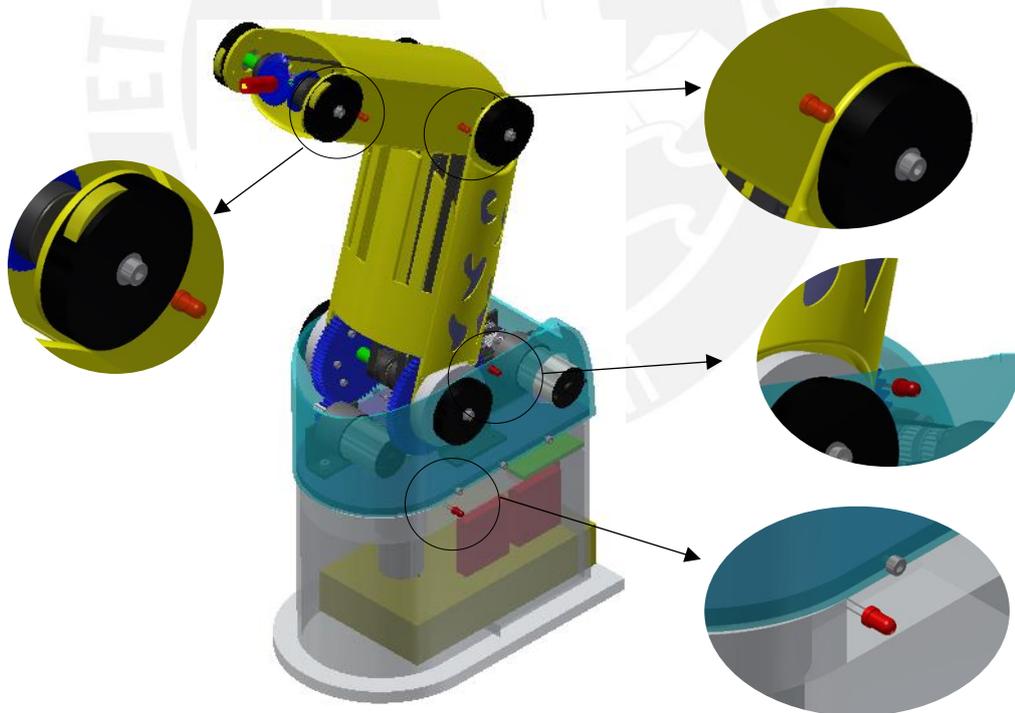


Figura 3.23: Posiciones de Leds
Fuente: Elaboración propia

3.2.3.5. Módulo de parada de emergencia:

Se usa un módulo de parada de emergencia [26] con los terminales normalmente abierto. Su función principal es detener el sistema mecatrónico antes cualquier eventualidad imprevista por el usuario. En caso el botón sea presionado se envía una señal al Arduino como una interrupción externa. Este módulo no tendrá una ubicación fija debido a que debe estar siempre a disposición del usuario para cualquier inconveniente.



Figura 3.24: Módulo de parada de emergencia
Fuente: Ebay [26]

Tabla 3.8: Especificaciones de módulo de parada de emergencia

Marca	SDDE
Dimensiones	80 x 75 x 85 mm
2 tipos de contacto	Contacto NC y NO
Agujero para cables	3 M20 (2 enroscados y 1 sin enroscar)

3.2.3.6 Llave termomagnética:

Se utiliza una llave termomagnética para encender el sistema mecatrónico. Este interruptor está limitada a una corriente máxima de 30A.



Figura 3.25: Llave térmica 10A
Fuente: Possot [27]

La ubicación del interruptor se encuentra en la parte posterior de la base fija. A continuación se detalla su posición exacta:

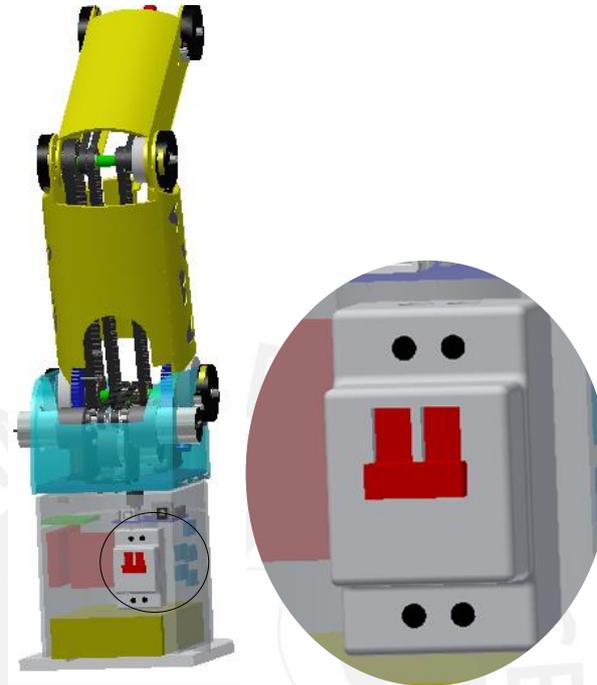


Figura 3.26: Ubicación de llave térmica
Fuente: Elaboración propia

3.2.3.7 Prensa de Mano:

Se usa dos prensas de mano de la marca IRWIN y Modelo Mini-prensa de barra/travesaño Quick Grip para sujetar la base a la mesa de trabajo. Esta prensa tiene almohadillas removibles que permiten mayor superficie de contacto, distribución de presión uniforme y evita algún daño en la zona de contacto. Puede soportar hasta 140 lb de fuerza de trabajo y su profundidad de garganta es de 2 7/16” (62 mm).



Figura 3.27: Prensa Quick Grip XP600
Fuente: Catálogo Irwin [28]

La ubicación de las prensas de mano se aprecia en la siguiente figura:

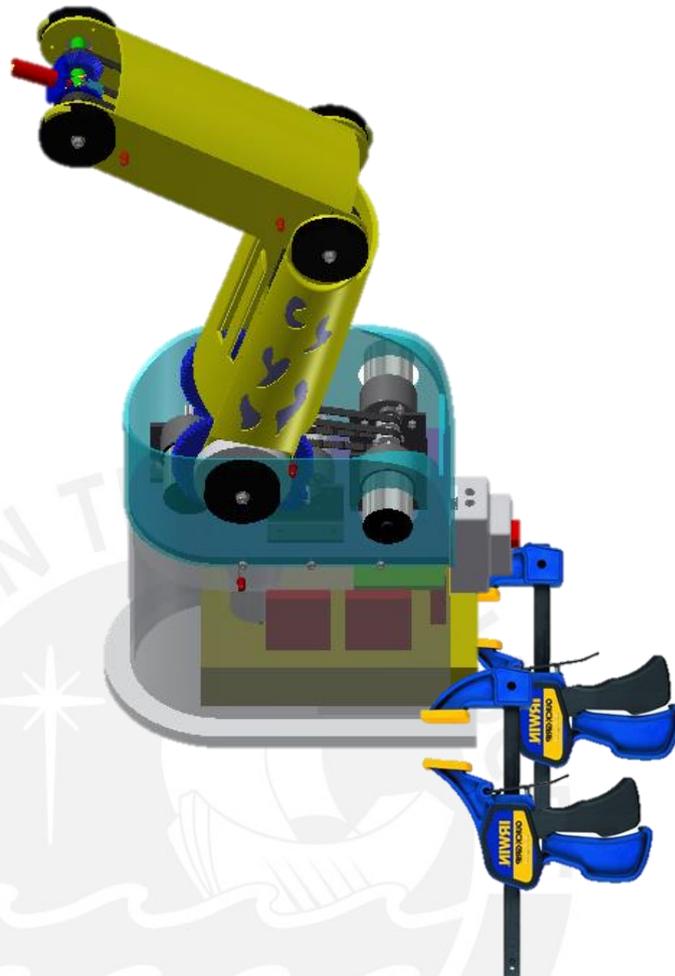


Figura 3.28: Ubicación de prensas de mano
Fuente: Elaboración propia

3.3 Planos Mecánicos del Sistema Mecatrónico:

La estructura del brazo robótico consta principalmente de 4 partes: base, brazo, antebrazo y acoplamiento de gripper. Para mayor información y detalle de los planos revisar el anexo 11. A continuación se describirá cada uno de ellos de forma general.

3.3.1 Ensamble del robot:

En la figura 3.29 se observa la vista frontal y de perfil del brazo robótico. Aquí se puede observar los ensambles mencionados: la base (3), el brazo (5), antebrazo (4), acoplamiento de gripper (1) y en este caso las fajas (2) que realizan la transmisión de movimiento para la articulación de la muñeca. Para mayor detalle revisar el anexo 11 - plano 16.

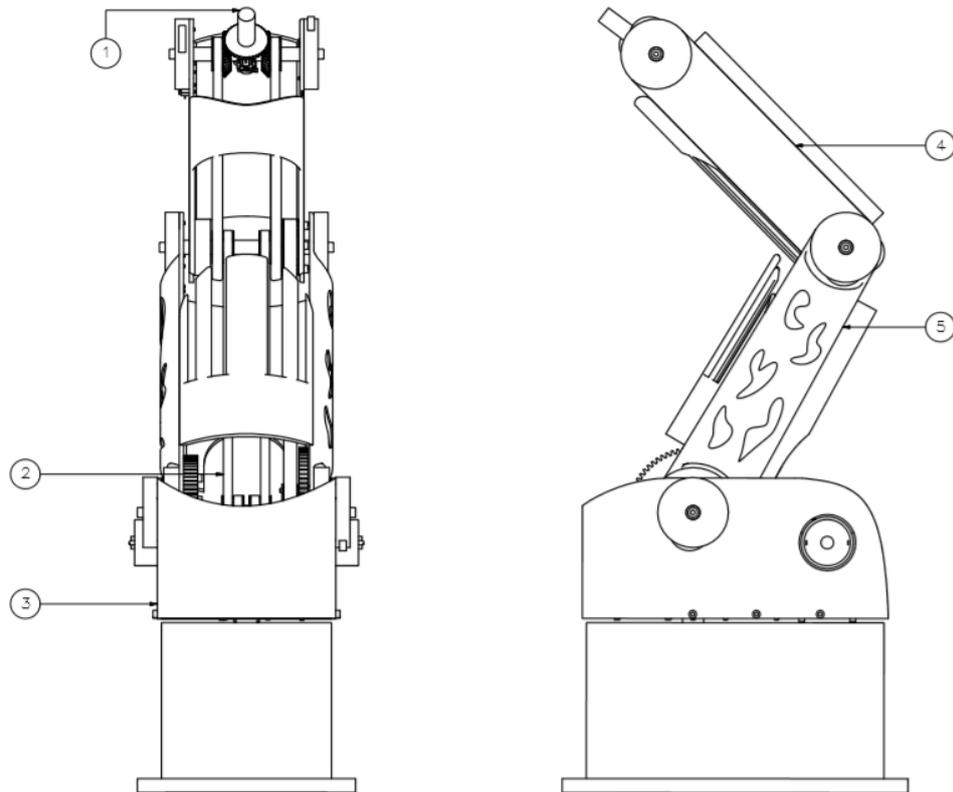


Figura 3.29: Vista frontal y de perfil de brazo robótico
Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Ensamble de la base:

En la figura 3.30 se aprecia el ensamblaje completo de base en su vista isométrica. Para mayor detalle revisar el anexo 11 - plano 15.

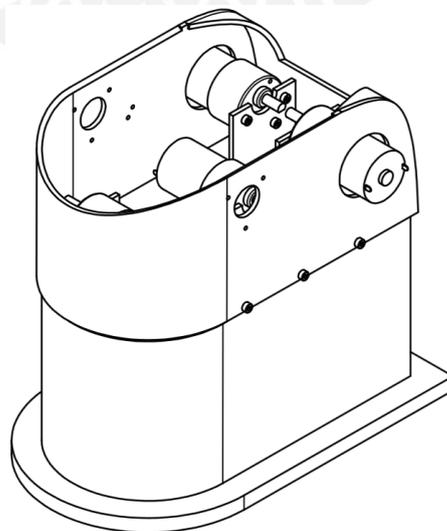


Figura 3.30: Vista Isométrica de la base
Fuente: Anexo 11-P15

En la figura 3.31, se aprecia los elementos colocados en la base giratoria de este ensamblaje. Se puede observar que esta parte consta principalmente de 4 motores (1) los cuales dos de ellos controlan el giro e inclinación de la muñeca, uno controla el codo y otro el hombro.

Además se cuenta con 2 tipos de soporte de motores. Uno para los motores de la muñeca y el otro para los motores del hombro y codo.

Los motores son sujetados mediante tornillo a sus respectivos soportes. Además los soportes son unidos mediante tornillos también a la base de aluminio. La carcasa es hecha de material ULTEM 9085.

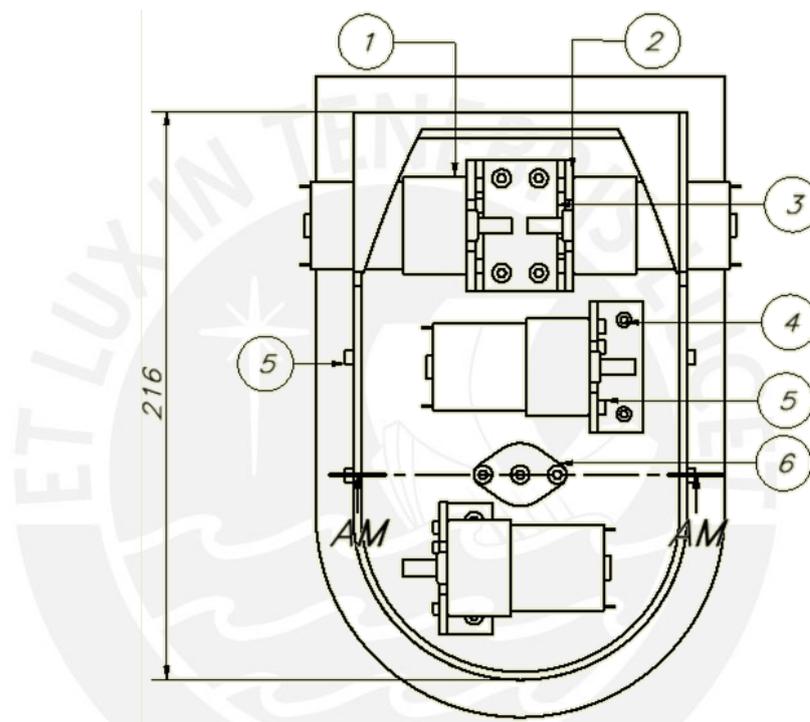


Figura 3.31: Vista de planta de la base
Fuente: Anexo 11-P15

En la figura 3.32 se puede apreciar el ensamble entre la base fija (14) y la base giratoria (13). El movimiento se realiza de forma directa trasladando el movimiento del motor a un eje de acero que está apoyado en un rodamiento que permitirá su respectivo giro. El rodamiento utilizado es de tipo rígido de hilera de bolas que consigue soportar tanto cargas axiales como radiales. La base fija será sujeta por medio de dos prensas de mano a la mesa de trabajo.

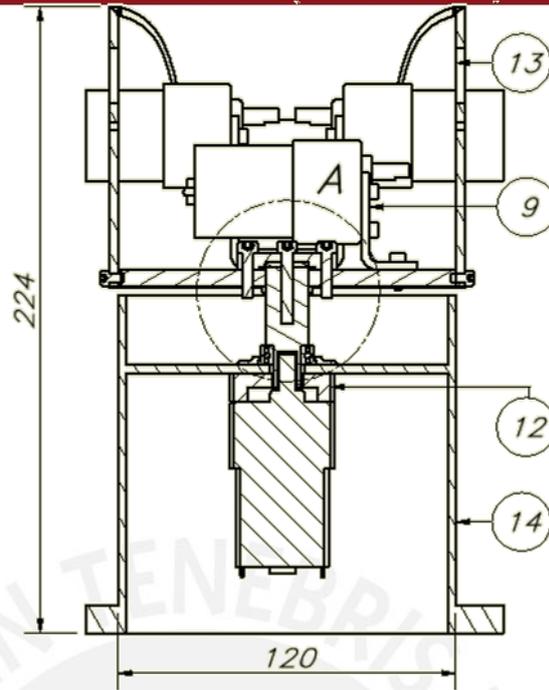


Figura 3.32: Vista seccionada AM
Fuente: Anexo 11 – P15

3.3.3 Ensamble del brazo:

En la figura 3.33 se aprecia la vista isométrica del ensamble del brazo. Para mayor detalle revisar el anexo 11 – plano 29.

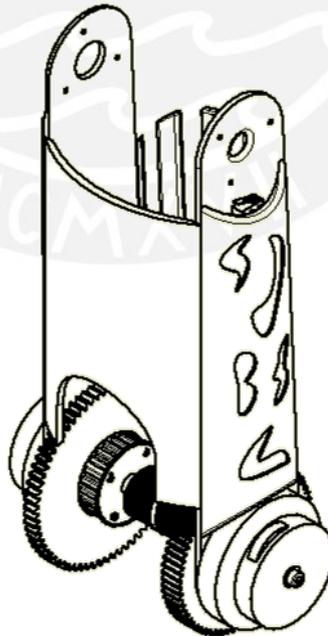


Figura 3.33: Vista isométrica ensamble del brazo
Fuente: Anexo 11 – P29

En la figura 3.34 se aprecia las poleas (12 y 10), engranajes (8 y 13), eslabones (4 y 15), elemento actuador de Limit Switch (6), piezas que sostienen rodamiento (14) y pernos (5, 9 y 13) que componen este brazo. Estos elementos son de material ULTEM 9085 y están sostenidos en una barra de acero (7) la cual tiene a sus extremos rodamientos que a su vez esta sujeta por una pieza colocada en el ensamble de la base.

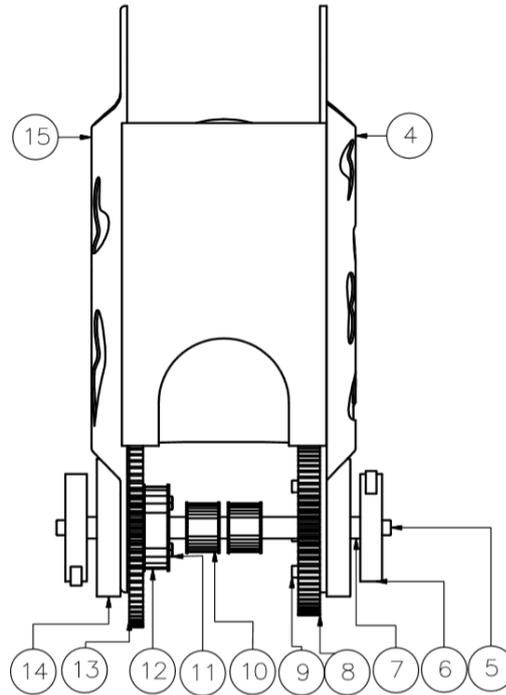


Figura 3.34: Vista frontal del ensamble brazo
Fuente: Anexo 11 – P29

En la figura 3.35 se consigue apreciar que se colocan carcasas tanto en la parte delantera (1) como posterior (3) del brazo, estas carcasas son de fácil retiro ya que están colocadas mediante pequeñas pestañas a los eslabones mostrados en la figura 20. Además se coloca un Limit Switch (2) que será accionado por una pieza del ensamble del antebrazo.

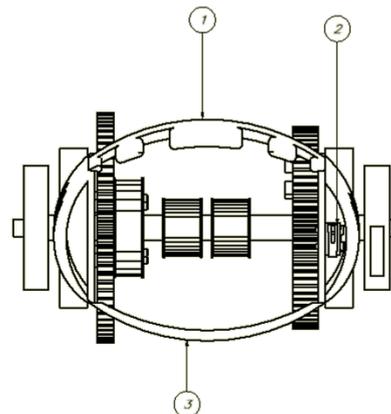


Figura 3.35: Vista de planta del ensamble brazo
Fuente: Anexo 11 - P29

3.3.4 Ensamble del antebrazo:

En la figura 3.36 se aprecia la vista isométrica del ensamble del antebrazo. Para mayor detalle revisar el anexo 11 – plano 17.

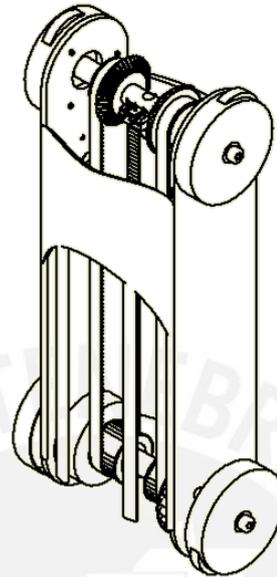


Figura 3.36: Vista Isométrica del ensamble del antebrazo
Fuente: Anexo 11 – P17

En la figura 3.37, se aprecia la vista de planta del ensamble del antebrazo. Se puede apreciar tanto la carcasa posterior (2) y la delantera (4). Estas carcasas se pueden retirar fácilmente debido a que tienen pequeñas pestañas que consiguen unirse con el eslabón de antebrazo, el cual une el codo con la muñeca del brazo robótico. Cabe mencionar que la pieza ubicada en el extremo de la barra (3) se encargará de accionar los limit switches asociados a cada articulación. Por último, en esta figura se puede apreciar engranajes. Todas estas piezas son hechas de material ULTEM realizadas por una impresora 3D.

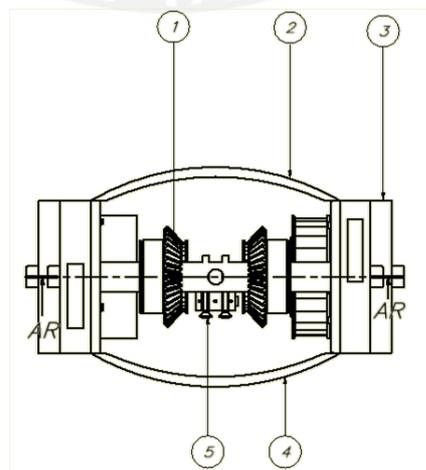


Figura 3.37: Vista de planta del ensamble del antebrazo
Fuente: Anexo 11 – P17

En la figura 3.38 se aprecia la vista frontal del ensamblaje del antebrazo. En este ensamble hay una barra de acero para sostener el acoplamiento del gripper (8) y una barra de acero para la articulación con el ensamble del brazo (16). Además también hay dos limit switches (20) para posicionar la inclinación y giro de la muñeca. Cabe mencionar que el ensamble también contiene correas dentadas (7), poleas (18) y rodamientos (12 y 17).

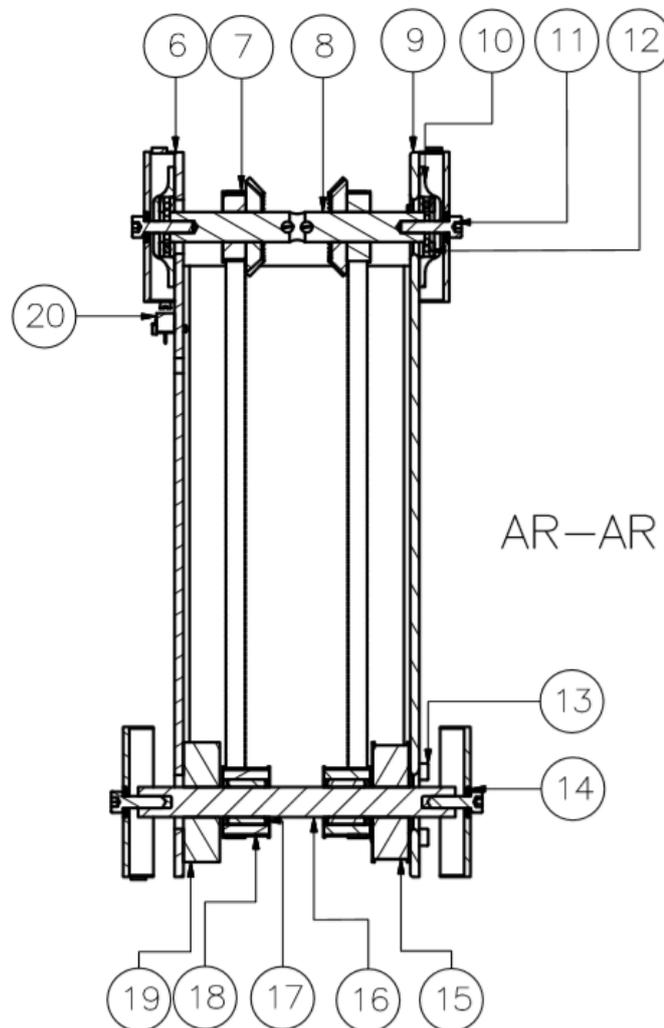


Figura 3.38: Corte AR del ensamble antebrazo
Fuente: Anexo 11 – P17

3.3.5 Ensamblaje del Acoplamiento del Gripper:

En la figura 3.39 se aprecia la vista isométrica del ensamble del Acoplamiento del Gripper. Para mayor detalle revisar el anexo 11 – plano 30.

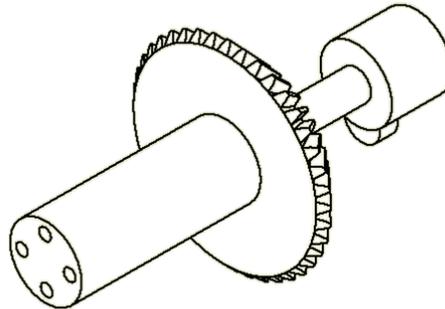


Figura 3.39: Vista Isométrica del ensamble de acoplamiento de gripper
Fuente: Anexo 11 – P30

En la figura 3.40 se puede apreciar las partes que componen este ensamble, el elemento 1 es una barra que sostendrá el gripper que se quiera colocar en este acoplamiento. Por otra parte, en elemento 2 estará apoyada en la barra de la muñeca (Ver figura 3.38 – elemento 8) y va a servir para que la barra de acoplamiento del gripper esté sostenida y no pueda desprenderse. Su segunda función es activar el limit switch al momento de realizar el giro sobre su propio eje. El elemento es un engranaje que será accionado por los dos engranajes biselados mostrados en el ensamble del antebrazo. Por último, los elementos 4 y 5 son tornillos que servirán para asegurar las diferentes piezas en este ensamble.

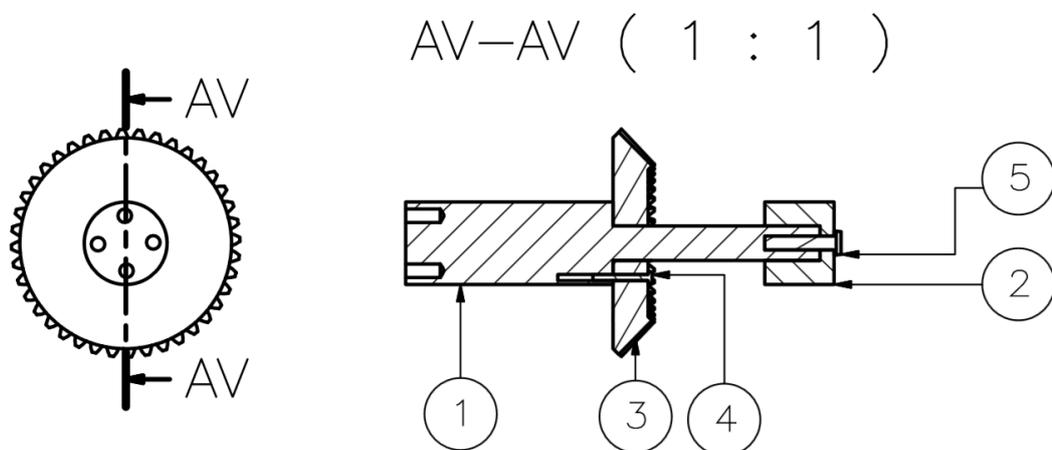


Figura 3.40: Corte AV de ensamble de acoplamiento de Gripper
Fuente Anexo 11 – P30

3.4 Diagramas esquemáticos de los circuitos del Sistema Mecatrónico:

3.4.1 Circuito esquemático de conexiones del Arduino:

El diagrama de conexiones para el Arduino se puede apreciar en la figura 41. Se utilizarán los pines 0, 1 para la comunicación con la computadora. Los pines 3, 4, 5 y 6 se usan para la comunicación de esta tarjeta con los tres Roboclaws, para mayor información sobre el Roboclaw revisar anexo 12. Cabe resaltar que los pines 0 (Rx) y 1 (Tx) son utilizados para la transmisión con la PC, es por ello que no se utilizan para la comunicación con los roboclaws por lo tanto se tendrá que configurar pines vía programación en el arduino. Además, por el pin 2 se recibe una interrupción externa que es activado en caso se presione el botón de parada de emergencia o se reciba una señal en alta proveniente de la tarjeta de sensado de corriente. Los pines VCC y GND alimenta la parte de control de los tres Roboclaws a utilizar. Los pines 8, 9, 10, 11 y 12 reciben la señal proveniente de los limit switches; se coloca una resistencia pull-up igual a 4.7k. Se creará un shield para el arduino para facilitar las conexiones con los diferentes componentes mostrados.

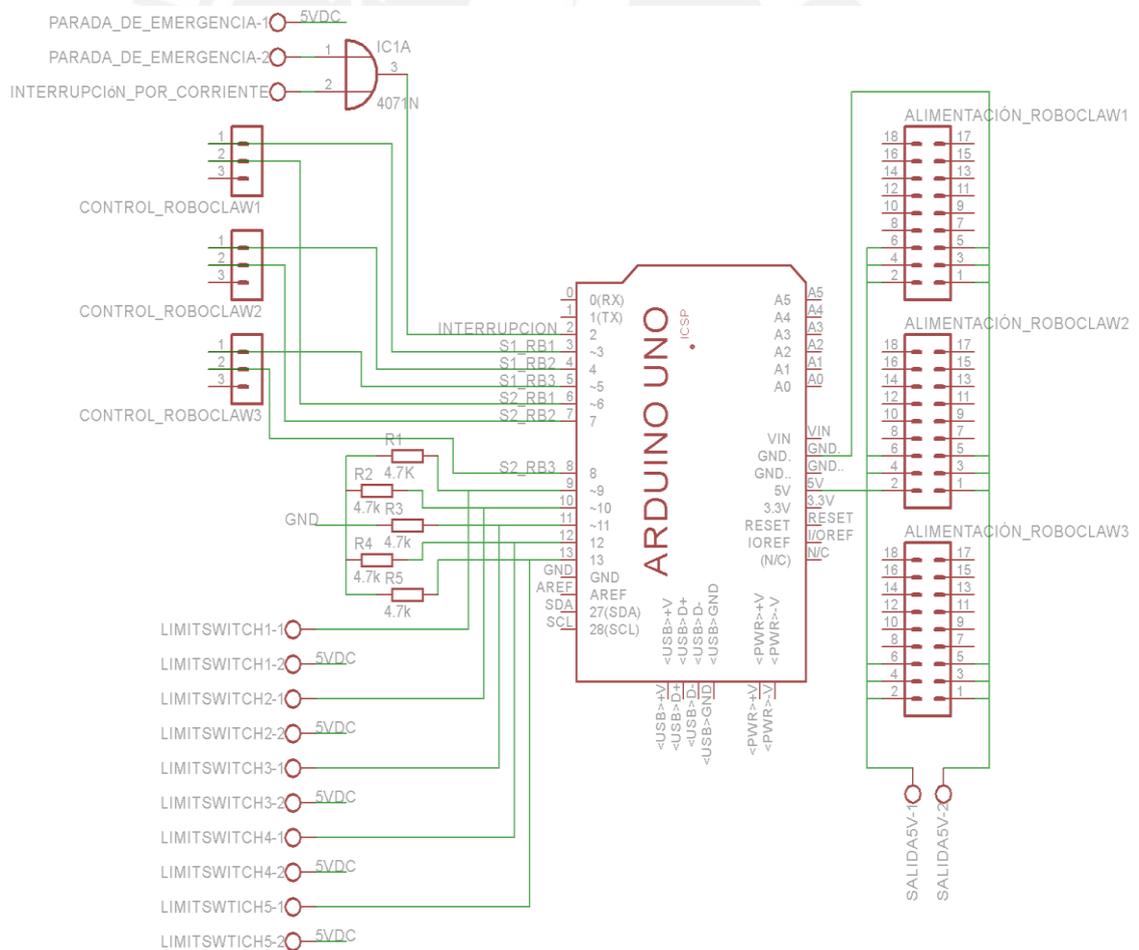


Figura 3.41: Diagrama esquemático del Arduino
Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Circuito esquemático de conexiones del Roboclaw:

El diagrama de conexiones para cada Roboclaw se puede apreciar en la figura 3.42. Se puede apreciar que se realizará una comunicación serial UART con el Arduino por los pines S1 y S2. Además su alimentación eléctrica de potencia será dada por una fuente de 12VDC para poder dar a los motores dicho voltaje como máximo. Se observa la conexión de los encoders que son alimentados gracias a las salidas de 5VDC provenientes del Roboclaw. Por último, el Roboclaw posibilita controlar dos motores, por lo que se realiza dichas conexiones como se puede apreciar en la figura 3.42.

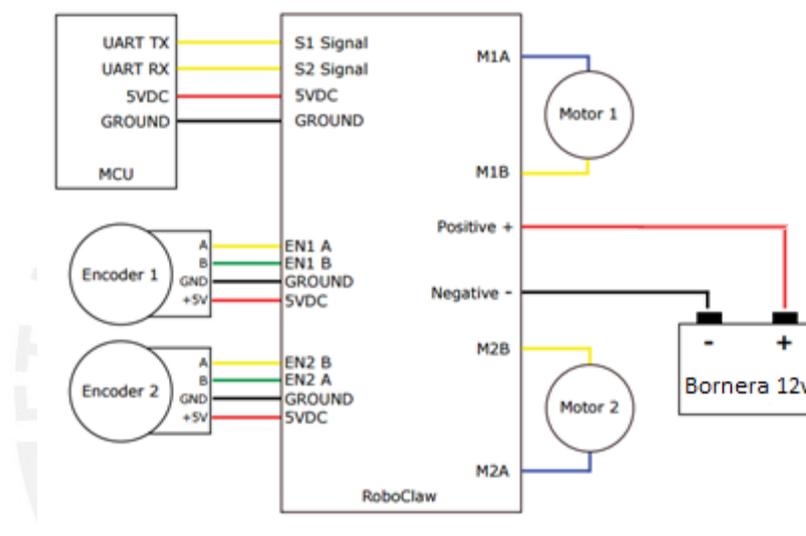


Figura 3.42: Diagrama de conexiones del Roboclaw
Fuente: Datasheet Roboclaw

Cabe resaltar que se configura 3 pines de transmisión y recepción en el Arduino. Cada pin S1 de los roboclaws es conectado a cada uno de los pines configurados como Tx en el Arduino y los pines S2 son conectados a los pines Rx configurado como tal. Por último, la alimentación de 5V se obtiene de una de las salidas del Arduino.

3.4.3 Circuito esquemático de distribución de voltaje:

El diagrama de conexiones distribución de voltaje se puede apreciar en la figura 3.43. Se puede observar que antes de distribuir el voltaje se coloca una llave térmica para el encendido de todo el sistema. Luego, al encender el sistema se recibe como entrada un voltaje de 12V para distribuirla y energizar la parte de potencia que irán a los motores de los 3 Roboclaws y el Arduino que al tener un regulador de voltaje 5V interno es posible colocarle 12V a su entrada.

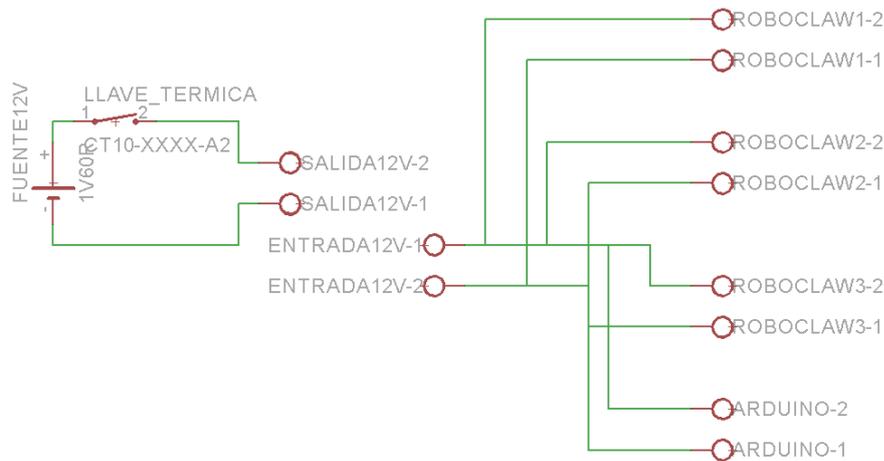


Figura 3.43: Circuito esquemático de distribución de voltaje
Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Circuito esquemático de la tarjeta de sensado:

El sensor de corriente, medirá la corriente en el motor y se obtendrá una salida de voltaje que será comparado con un voltaje de referencia que será diferente para cada motor, el cálculo de este valor se puede apreciar en el Anexo 5. Se usará un comparador para saber si se supera la corriente nominal máxima de trabajo en el motor, es necesario dos integrados LM339 debido a que cada uno cuenta con 4 comparadores y es necesario 5 en total. Todas las salidas de estos comparadores serán conectadas a una compuerta OR 74AC32 [29]. De esta manera, en el caso algún pin de salida del comparador sea “1” lógico, se enviará esta señal al 74AC32 que al ser una compuerta OR tendrá en su salida un “1” lógico de igual manera. Esta señal será enviada al Arduino para activar una subrutina de interrupción externa. Además se utilizará los voltajes de 5 V de cada salida de los comparadores para encender diferentes leds ubicados en la estructura del brazo robótico. Esto se realiza con la finalidad de saber que motor está superando su corriente máxima de trabajo. La alimentación de 5 V es proporcionada por el Arduino.

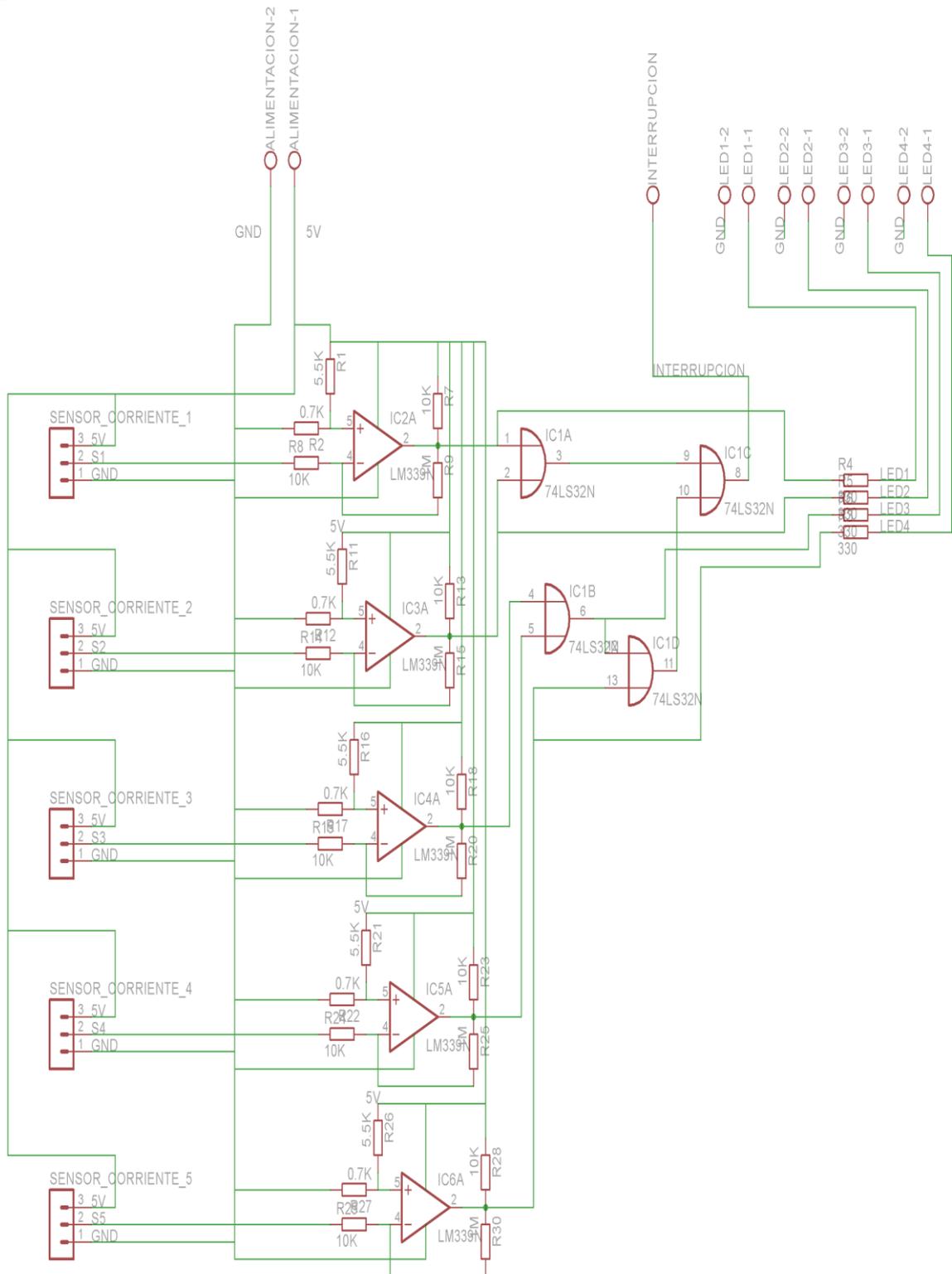


Figura 3.44: Circuito Esquemático de sensado de corriente
Fuente: Elaboración propia

3.5 DISEÑO DE CONTROL

En este subcapítulo se muestra cada uno de los diagramas de flujo del sistema de control realizado por el Arduino incluida la subrutina de interrupción que se activa cuando se recibe una señal en alta por el pin 2. Inicialmente se muestra el diagrama de flujo principal y de la subrutina externa; luego se mostrará a más detalle las diferentes funciones a utilizadas en el diagrama de flujo principal.

3.5.1 Diagrama de flujo Principal:

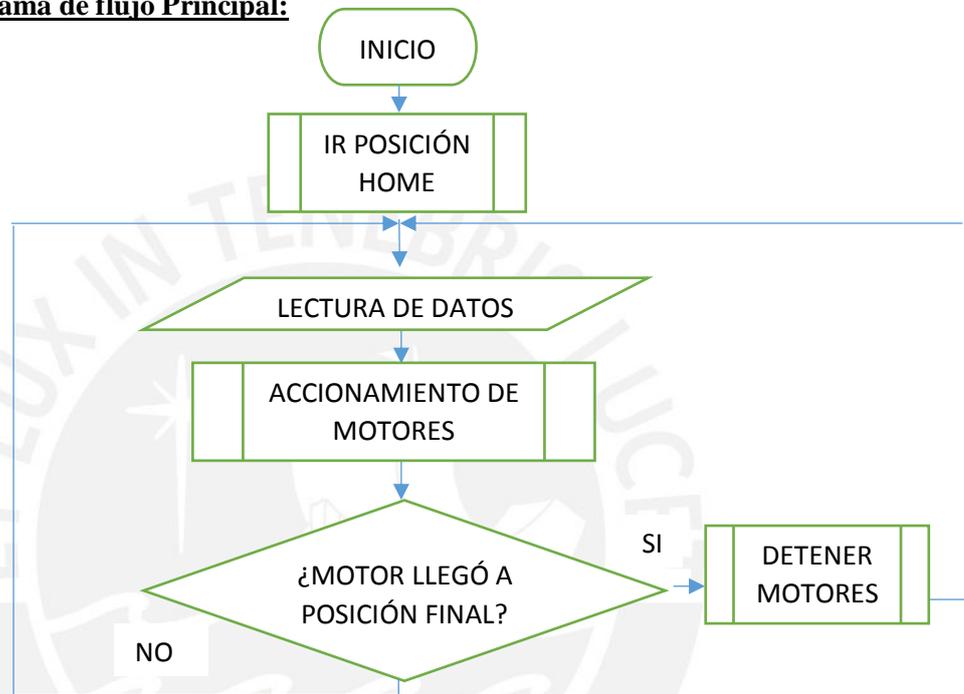


Figura 3.45: Diagrama de Flujo Principal
Fuente: Elaboración propia

Los bloques mostrados representan el diagrama de control principal del robot. Inicialmente el brazo robótico irá a su posición HOME; es decir, buscará su posición de inicio haciendo girar los motores hasta activar los limit switches ubicados en cada articulación. Luego, se leerá los parámetros enviados por el software utilizado para el control de los motores. Será necesario convertir estos datos dados en rad/s para que pueda ser leído por el controlador del motor. Luego de realizar la conversión se enviará los datos al Roboclaw para que pueda accionar los motores. Por último se realizará el respectivo control de velocidad para verificar si el motor llega a su posición final; el usuario podrá realizar un control PID por realimentación de datos de posición provenientes del encoder. En el caso llegué a su posición final se detendrá a los motores. Caso contrario, volverá a leer los datos del software para realizar el mismo procedimiento mencionado para una nueva posición y velocidad asignada.

3.5.2 Diagrama de Flujo Subrutina de Interrupción externa:

DETENER MOTORES

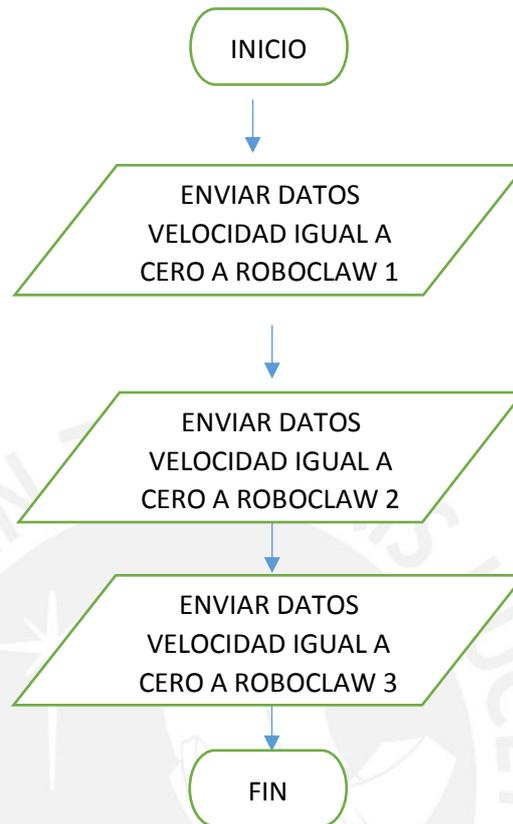
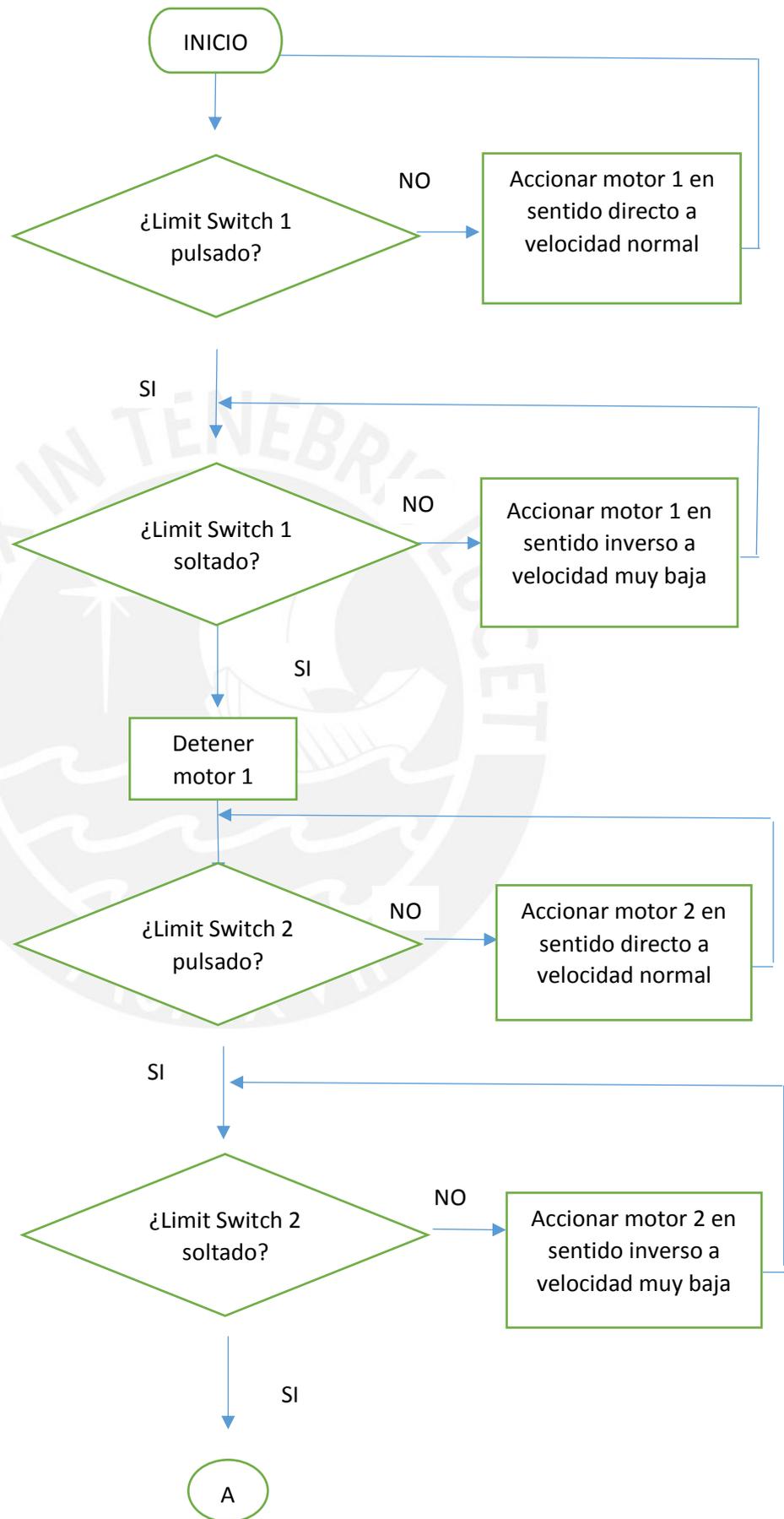
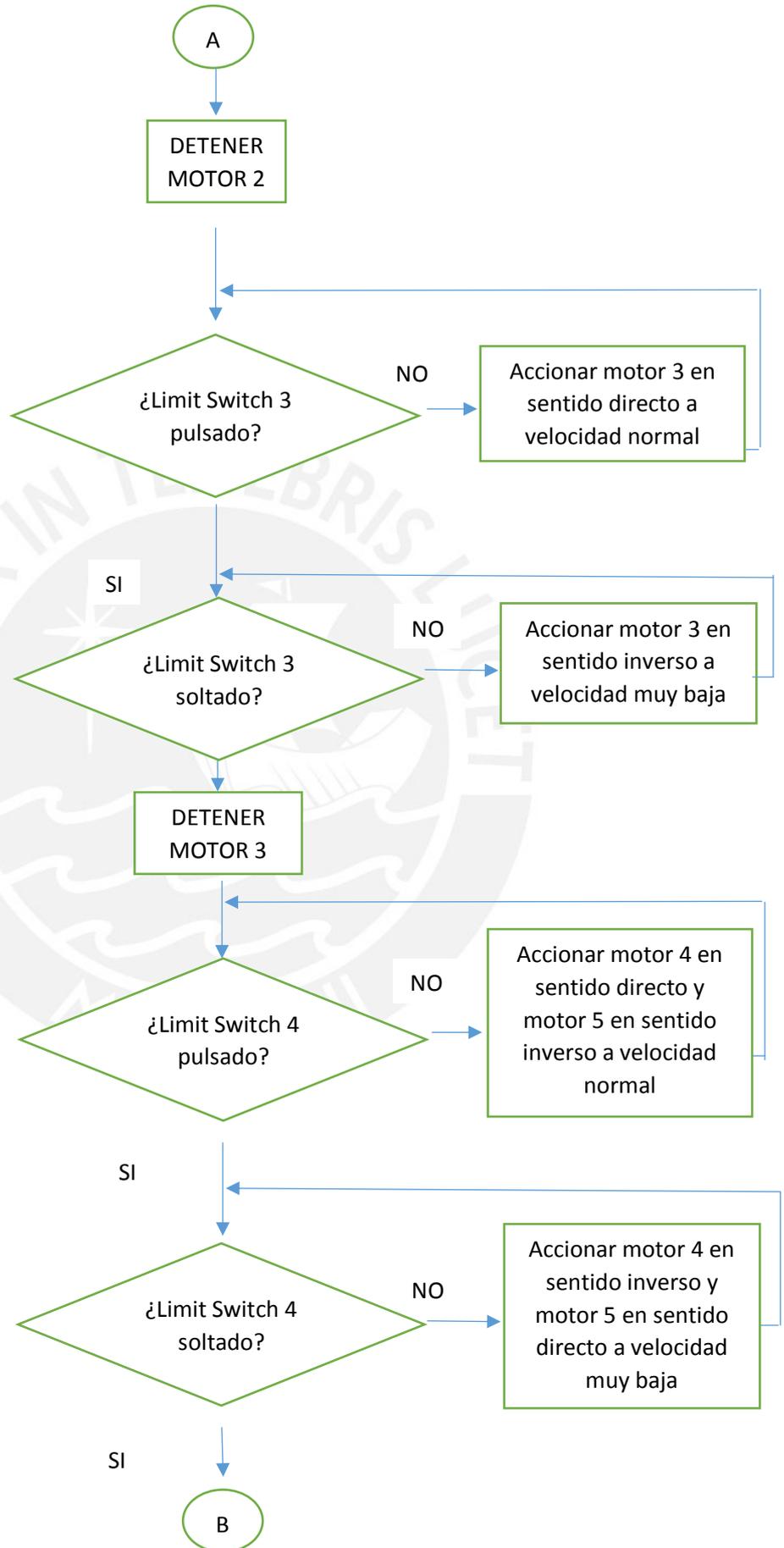


Figura 3.46: Diagrama de Flujo de la subrutina para detener motores
Fuente: Elaboración propia

Esta subrutina de interrupción se activará al recibir una señal proveniente por el pin 2 de interrupción del Arduino. Esta señal será “0” o “1” dependiendo si algún motor superó su corriente máxima de operación, la cual sucederá si existe alguna colisión del brazo robótico con algún agente externo. También puede ser activada en el caso se presione el botón de parada de emergencia. La función de esta subrutina es detener los motores; para ello, el Arduino envía una velocidad igual a cero a los Roboclaws. Se utilizará este algoritmo como modo de seguridad del sistema mecatrónico, de esta manera se consigue evitar alguna sobrecarga eléctrica que dañe los componentes internos de los controladores del motor.

3.5.3 Diagrama de Flujo de “IR POSICIÓN HOME”:





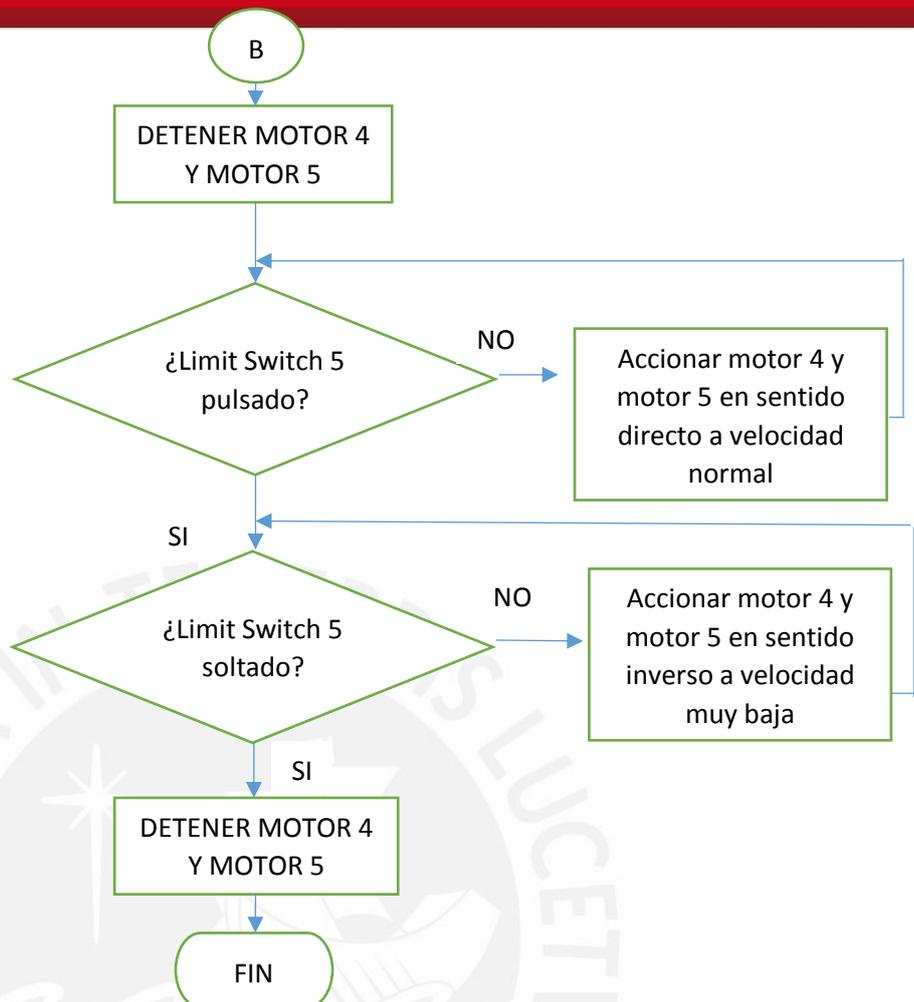


Figura 3.47: Diagrama de Flujo "Ir posición Home"
 Fuente: Elaboración propia

Los bloques mostrados representan el diagrama de flujo del sistema de inicialización del robot (Ir posición Home). Inicialmente, se comprobará si el limit switch asociado a la base se encuentra presionado, al no estar presionado se hace girar el motor de la base con parámetros establecidos por defecto hasta que el limit switch ubicado en esa articulación sea activado de forma satisfactoria. Luego, se comprobará si el limit switch dejó de estar presionado; al seguir presionado, se girará dicho motor en sentido inverso a la velocidad más baja posible. Cuando el limit switch sea soltado, se detendrá al motor y se realizará el mismo procedimiento para la articulación del hombro (asociado al limit switch 2) y del codo (asociado al limit switch 3). Para la articulación de la muñeca, se requiere el control de los motores 4 y 5 por lo que estos girarán en sentidos opuestos para realizar la inclinación en la muñeca y en el mismo sentido para realizar el giro en la muñeca. El procedimiento es exactamente igual que en las articulaciones anteriores. Cabe resaltar que al retroceder a una velocidad muy baja el error disminuye y de esta manera se asegura que la posición de inicio del sistema sea siempre la misma; es por ello que se hace este procedimiento.

3.5.4 Diagrama de flujo de “LECTURA DE DATOS”:



Figura 3.48: Diagrama de Flujo “Lectura de Datos”
Fuente: Elaboración propia

Los bloques mostrados representan el diagrama de flujo de la lectura de datos provenientes del software a utilizar. El software enviará datos de la velocidad angular de cada una de las articulaciones en rad/s. Estos datos serán leídos y colocados en variables para luego poder ser procesados de tal manera que puedan ser convertidos, mediante diferentes algoritmos, en códigos para su respectivo uso con el Roboclaw.

3.5.5 Diagrama de Flujo “ACCIONAMIENTO DE MOTORES”:

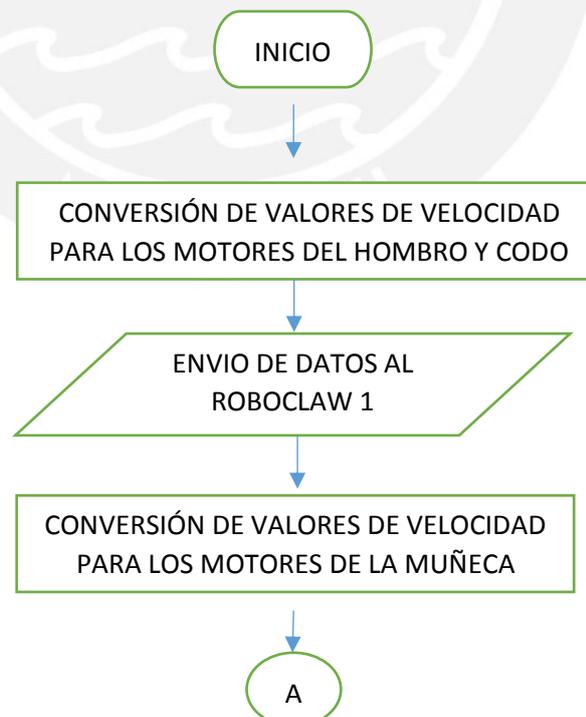




Figura 3.49: Diagrama de Flujo "Accionamiento de Motores"
Fuente: Elaboración propia

El diagrama de flujo de control mostrado se encargará de realizar el accionamiento de los motores. Inicialmente, los datos leídos son procesados de tal manera que pueda ser enviado al Roboclaw. El arduino envía un conjunto de datos que contiene a la dirección o id del Roboclaw al cual se quiere comunicar, el comando que se va a realizar y el dato requerido de velocidad en un rango de 0-127 dependiendo del comando utilizado. Estos datos son enviados serialmente al Roboclaw y se realiza el mismo procedimiento para cada uno de ellos. Por último son enviados los datos provenientes de cada uno de los encoders hacia el software a utilizar para que realice el respectivo procesamiento y control para mandar nuevos parámetros de velocidad.

CAPÍTULO 4

PRESUPUESTO

4.1 Presupuesto Electrónica:

Tabla 4.1: Presupuesto Electrónica

Cantidad	Item	Proveedor	Precio Unitario (\$)	Precio Unitario (S/.)	Envío (\$)	Precio Total (S/.)
3	Roboclaw 5A	Pololu	69.95	219.64	35.95	694.88
5	Sensor de Corriente ACS712E05 5A	Global electronic Market	7.41	23.27	0.00	116.34
1	Fuente 12V 30A modelo S-350-12	Kit Printer 3D	34.00	106.76	8.00	131.88
1	Módulo de parada de emergencia	Ebay	33.92	106.51	15.61	155.52
5	Motor Pololu 12v con encoder	Pololu	39.95	125.44	52.45	791.91
1	Arduino	Creatividad Ahora	-	79.00	0.00	79.00
1	Un pack de 10 Limit Switches	Ebay	6.88		9.00	49.86
1	Llave termica	Electro Marilu		38.00	0.00	38.00
2	LM339N	Electronica Industrial del Sur		1.40	0.00	2.80
4	Led rojo	Electronica Industrial del Sur		0.20	0.00	0.80
3	74LS32	Electronica Industrial del Sur		2.00	0.00	6.00
15	Borneras	Electronica Industrial del Sur		1.00	0.00	15.00
5	1 metro cable de potencia	Allison World Electronics		1.00	0.00	5.00
10	1 metro cable unipolar	Allison World Electronics		0.20	0.00	2.00
5	DM-03 MicroSwitch 2A/125V	Allison World Electronics		0.50	0.00	2.50
1	100 resistencia 100 omhs	Allison World Electronics		2.40	0.00	2.40
1	100 resistencias 330	Allison World Electronics		2.40	0.00	2.40
2	1x40 Header Macho (Espadines)	Bora Import		0.50	0.00	1.00
2	1x40 Header Hembra (Espadines)	Bora Import		0.50	0.00	1.00
1	Fusible 30A	Bora Import		0.20	0.00	0.20
1	Portafusible	Bora Import		0.80	0.00	0.80
5	Potenciometro multivoltas	Bora Import		1.00	0.00	5.00
					Subtotal	2104.29

Tipo de Cambio
3.14

Se puede observar que los componentes electrónicos más caros son los controladores de motor Roboclaw y los 5 motores dc. Por otro lado, se considera en el presupuesto todos los componentes necesarios para realizar las tarjetas propuestas. Para obtener mayor detalle de cada componente revisar el Anexo 9.

4.2 Presupuesto Mecánica:

Tabla 4.2: Presupuesto Mecánica

Cantidad	Item	Proveedor	Precio Unitario (\$)	Precio Unitario (S/.)	Envío (\$)	Precio Total (S/.)
1	Barra de acero de 10mm x 380mm	Ferretería Industrial KNC		6.00	0.00	6.00
1	Impresión 3D en Material ULTEM	Sala VEO		2745.00	0.00	2745.00
2	Correas dentadas de 9.5x17	Fajas Koki		5.00	0.00	10.00
3	Correas dentadas 9.5x20	Fajas Koki		5.00	0.00	15.00
4	Rodamientos HK 1015 TBR	IRESA		10.00	0.00	40.00
3	Rodamientos HK1010 TBR	IRESA		10.00	0.00	30.00
1	Rodamiento NJ 202 FDE	IRESA		65.00	0.00	65.00
3	Rodamientos SKF 6800	RODA IMPORT		18.00	0.00	54.00
1	Aluminio 1/4 15x30cm	Comercial Reyes		16.00	0.00	16.00
30	Pernos M2	Victronics	0.06		1.06	9.18
70	Pernos M3	Victronics	0.19		1.06	44.66
10	Pernos M4	Victronics	0.18		1.06	8.93
2	Prensa de mano Quick-Grip Xp600	Vidri	24.00		0.00	150.72
-	Cortes y ensamblado	-	-	-	-	1000.00
					Subtotal	4194.49

Se puede observar que se requiere un mayor costo económico en la impresión 3D del material ULTEM, para ello se realizó una cotización en la sala VEO de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Para obtener mayor información revisar el Anexo 9.

4.3 Presupuesto Total:

Tabla 4.3: Presupuesto Total

Subtotal Electrónica	2104.29
Subtotal Mecánica	4194.49
TOTAL	6298.79

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

- El sistema mecatrónico diseñado tiene un carácter innovador porque permite a los investigadores beneficiarse de la arquitectura completamente abierta y una plataforma robótica extremadamente flexible sin limitaciones de los controladores de sistemas cerrados. Por otro lado, en la actualidad el control de los sistemas robóticos es una parte fundamental de los cursos de Robótica y sistemas inteligentes dictados en Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Mecánica y Mecatrónica. El sistema mecatrónico propuesto ofrece flexibilidad y seguridad para una amplia gama de cursos avanzados de control de sistemas de robótica. Es posible realizar los conceptos de robótica más avanzados como la cinemática inversa, la dinámica del manipulador y planificación de trayectorias.
- Respecto a los requerimientos inicialmente propuestos se puede concluir que el brazo robótico cumple el fin educacional y de investigación para lo cual fue diseñado. El sistema de control puede ser modificable por el usuario y le permite tener total libertad para realizar el control de movimiento del robot. Cabe resaltar que se le proporciona al usuario información de la cinemática y dinámica del brazo robótico. Esta información ayudará al usuario a realizar su control de movimiento. Además cuenta con un sistema de seguridad que permite el cuidado de los motores y controladores, cabe resaltar que se cuentan con leds en cada una de las articulaciones por lo que vuelve el sistema aún más interactivo y educativo para que el usuario pueda identificar en que articulación se está realizando el sobreesfuerzo. Por otro lado, la comunicación con el Arduino se realiza mediante softwares como Matlab o Labview de forma serial; estos softwares cuentan con un gran número de librerías aplicadas a la robótica que facilitan de gran manera la programación para el control de movimiento del robot. Por último, el sistema cuenta con diferentes mecanismos de transmisión de movimiento para que el usuario pueda observar y entender las formas de construcción de un brazo robótico; es por ello que tanto la carcasa delantera como la carcasa trasera son desplegadas para que el usuario pueda observar los mecanismos utilizados y de esta manera aumentar el propósito educacional de este robot.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “World Robotic 2014 Industrial Robots”. International Federation of Robotic. Disponible: <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>
- [2] ABB. (2011, Julio.). ABB Robotics launches new Educational Package. Disponible: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/f30f8e1876d77d42c12578cd002034b4.aspx>
- [3] FANUC. FANUC Robotics CERT Programs Teach Robotics and Enhance Employees’ Skill. Disponible: <http://robot.fanucamerica.com/robotics-articles/robot-education-program-fanuc-cert.aspx>
- [4] KUKA. YOUTBOT – PROMOTING COOPERATION WITH SCIENCE AND TEACHING. Disponible: http://www.kuka-labs.com/en/service_robotics/research_education/youbot/
- [5] R. Bischoff. “KUKA youBot – a milestone for education and research in mobile manipulation”, IEEE ICRA Workshop “A new generation of educational robots”. Shanghai International Convention Center, China. 2011. Disponible: http://www.best-of-robotics.org/pages/BRICS-events/icra2011/Bischoff_-_KUKA_youBot_-_a_milestone_for_education_and_research_in_mobile_manipulation.pdf
- [6] “Global Robots”, Kuka KR 125/150/200. Diponible: <http://www.globalrobots.com/robots.aspx?brand=3>
- [7] Norma ISO 10218-1:2011, “Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots”. Disponible: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0049289&pdf=#.VRmOLfmG9UV>

- [8] Locomotec, “KUKA youBot User Manual”, 2012. Disponible: ftp://ftp.youbot-store.com/manuals/KUKA-youBot_UserManual.pdf
- [9] Phenoptix, “Pocket Sized Robot Arm #meArm V0.4, 2014. Disponible: <http://www.adafruit.com/datasheets/Pocket-Sized-Robot-Arm-meArm-V04.pdf>
- [10] ABB Robotics, “Product Manual IRB 120”, Suecia, 2013. <http://www.adafruit.com/datasheets/Pocket-Sized-Robot-Arm-meArm-V04.pdf>
- [11] Kinova, “Jaco Rehab Edition User Guide”, 2011. http://kinovarobotics.com/wp-content/uploads/2012/04/JACO_User_Guide-1.2.7_RELEASED.pdf
- [12] Intorobotic, “Robotic Arm Kits For Your Next Project”, 2014. Disponible: <http://www.intorobotics.com/robotic-arm-kits-for-your-next-project/>
- [13] Daniel Barbuto Rossato, “Desenvolvimento de um sistema aberto para ensino de robôs manipuladores”, Universidad de Sao Paulo, Brasil, 2009.
- [14] Salomón Abdalá Castillo y Raúl Neco Caberta, “Caracterización de un robot manipulador articulado”, Centro Nacional de investigación y desarrollo Tecnológico, México, 2003.
- [15] Mohammed Reyad AbuQassem, “Simulation and Interfacing of 5 DOF Educational Robot Arm”, Islamic University of Gaza, Israel, 2010.
- [16] Pavol Krasňansky, Filip Tóth, Vladimír Villaverde Huertas, Boris Rohal-Ilkiv, “Basic Laboratory Experiments with an Educational Robotic Arm”, Slovak University of Technology, Eslovaquia, 2013.
- [17] Arduino. “Arduino UNO”. Disponible: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [18] Pololu. Controlador Roboclaw: Disponible: <https://www.pololu.com/product/1492>
- [19] Aliexpress, Sensor de corriente 5A. Disponible: <http://es.aliexpress.com/item/Free-Shipping-ACS712E-05-Current-Sensor-Module-5A-linearity-180mV-1A/1893262067.html>
- [20] KinterPrinter3D. Fuente 12VDC 30A. Disponible: <http://www.kitprinter3d.com/es/electronica/99-fuente-de-alimentacion-conmutada-12v-30a.html>
- [21] ATMEL. (2009, Octubre). Atmega328P. Disponible: www.atmel.com/images/doc8161.pdf

- [22] Overview of the LabVIEW Robotics Module. (2014, Noviembre). Disponible: <http://www.ni.com/white-paper/11564/en/>
- [23] ALLEGRO. (2013). ACS712. Disponible: Anexo 13
- [24] Ebay, Limit Switch: Disponible <http://www.ebay.com/itm/10-pc-TEMCo-Micro-Limit-Switch-Roller-Arm-Subminiature-SPDT-Snap-Action-LOT-/301029432479>
- [25] Pololu. Motor 12VDC. Disponible: <https://www.pololu.com/product/1447>
- [26] EBAY. (2015, Junio). NEW Hylec 1-Way A-Lock Mushroom Head Stop Push Button. Disponible: http://www.ebay.es/itm/NEW-Hylec-1-Way-A-Lock-Mushroom-Head-Stop-Push-Button-/131504776485?pt=LH_DefaultDomain_3&hash=item1e9e4ba525#shpCntId
- [27] Posot. Stronger Llaves térmicas. Disponible: http://img.pe.class.posot.com/es_pe/2014/10/09/Llaves-Termomagneticas-General-Electric-Usa-20141009213215.jpg
- [28] IRWIN. Herramientas de Sujeción. Disponible: http://www.irwin.com/uploads/documents/81_Spanish_FLC_dClamps_ebook.pdf
- [29] MOTOROLA. 74LS32. Disponible: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/5707/MOTOROLA/74LS32.html>
- [30] AreaTecnología, “Servomotor”. Disponible: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>
- [31] Arduino, “Arduino Mega 2560”. Disponible: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [32] Tienda Raspberry Pi, “Hardware Raspberry Pi”. Disponible: <http://www.raspberrypi.com/hardware-raspberry-pi.php>
- [33] Siskon, “Sensores, Limit Switch”. Disponible: <http://www.siskon.com.ve/ProdSensores.htm>
- [34] Hizook, “Robotis Dynamixel Servos: Overview, Applications, Tear-Down, and Open-Source Software”. Disponible: <http://www.hizook.com/blog/2010/03/14/robotis-dynamixel-servos-overview-applications-tear-down-and-open-source-software>

- [35] Robotics e-manual, “Roboplus”. Disponible:
http://support.robotis.com/en/software/roboplus_main.htm
- [36] Siscon, “Sensores, Encoders”. Disponible:
<http://www.siscon.com.ve/ProdSensores.htm>
- [37] Todo Robot, “Tutorial sobre motores paso a paso”. Disponible:
<http://www.todorobot.com.ar/tutorial-sobre-motores-paso-a-paso-stepper-motors/>
- [38] Transpart, “Engranaje Planetario”. Disponible: <http://www.transpart.com/7.html>
- [39] xPc Tarjet, “xPc Tarjet”. Disponible:
<http://es.mathworks.com/products/datasheets/pdf/xpc-target.pdf>

