



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA ROBOT
HUMANOIDE QUE PERMITE EMULAR EL MOVIMIENTO DEL
CUELLO DE LOS SERES HUMANOS”**

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización

Presenta:

Ing. Francisco José López Cortés*

Directores:

Dr. Sergio Vergara Limon

Dr. David Eduardo Pinto Avendaño

Dra. Darnes Vilariño Ayala

Puebla, México

Diciembre 2017

***BECARIO CONACYT**

BUAP®

Agradecimientos

A Dios, por brindarme salud y permitirme culminar esta meta profesional.

A mis padres María Isabel y J. I. Alfredo, por ser los pilares fundamentales de mi vida en quienes siempre encuentro amor y apoyo incondicional para lograr las metas que me propongo.

A mi hermano Alfredo, quien en todo momento me acompaña y me motiva a seguir persiguiendo mis sueños.

A mis amigos, los que hicieron este tiempo ameno y compartieron sus conocimientos.

A mis asesores de tesis, el Dr. Sergio Vergara Limon quien me guio a través de este camino del conocimiento, al Dr. David Eduardo Pinto Avendaño quien me brindó todas las herramientas para el culmino de este trabajo y a la Dra. Darnes Vilariño por todo el apoyo brindado.

A los miembros del jurado revisor, por su tiempo y consejos para mejorar mi trabajo.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP y al laboratorio de robótica y automatización, por permitirme ser parte del posgrado y ofrecerme el apoyo necesario para culminar mis estudios.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por la entrega y dedicación que realiza para contar con infraestructura y posgrados de calidad.

A CONACYT por el apoyo económico brindado.

Dedicatoria.

A mis padres María Isabel y J. I. Alfredo,
quienes admiro por sus grandes valores,
su persistencia y su gran corazón.

A mi hermano Alfredo, por su gran visión
y su forma de entregar el corazón en todo
lo que realiza.

A mi primo Daniel, por ser parte de cada
logro en mi vida.

A mis amigos.

Resumen

En este trabajo se presenta una investigación sobre la historia de los robots humanoides, sus orígenes y su evolución a través del tiempo, se hace referencia a los trabajos realizados por otros investigadores. Por lo tanto, en esta tesis se diseñó un mecanismo esférico, el cual soporta la cabeza de un robot humanoide desarrollado por la empresa Hanson Robotics, se emplearon las herramientas matemáticas necesarias para obtener la cinemática directa y el modelo dinámico de dicho mecanismo, como consecuencia de esto, se realizaron simulaciones con un esquema de control tangente hiperbólico y se efectuaron estudios de movimiento en el software de diseño asistido por computadora “SolidWorks” para efectos de comprobación del modelo dinámico.

La base fundamental de este trabajo es el desarrollo de un sistema mecatrónico que emule el movimiento del cuello de los seres humanos, por consiguiente, se realizó la etapa de control que consta de un microprocesador implementado en FPGA desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. La etapa de control también cuenta con decodificadores y generadores de señal PWM como puertos de entrada y salida, además, se diseñó la etapa de potencia con transistores BJT en configuración Darlington.

Se integró un protocolo de comunicación vía Wi-Fi para la comunicación con una PC, donde se desarrolló la interfaz de usuario en el software LabVIEW, en la cual se puede manipular el sistema mecatrónico, programar el microprocesador y obtener los datos generados por el mismo. Para la programación del microprocesador se desarrolló un software ensamblador el cual traduce un archivo con las instrucciones en lenguaje ensamblador al formato binario que se envía al microprocesador.

Por último, se integran la etapa de potencia y control con el mecanismo esférico y se realizó un programa en lenguaje ensamblador donde se implementa el controlador proporcional con el par gravitacional calculado en el modelo dinámico; se realizaron pruebas del sistema mecatrónico donde se manipula la posición deseada de cada actuador y se presentan las gráficas de la acción de control.

Índice

Índice	i
Introducción	viii
Capítulo 1: Características del Sistema.	1
1.1 Movimientos del cuello humano.	1
1.2 Cabeza del Robot Humanoide	3
1.3 Especificaciones.	5
1.4 Conclusiones.	9
Capítulo 2: Diseño Mecánico.	10
2.1 Diseño de la Base	12
2.2 Estructura que emula el movimiento de Flexo-extensión.	14
2.3 Estructura que emula el movimiento de Inclinación Bilateral.	17
2.4 Estructura que realiza el movimiento de Rotación.	19
2.5 Mecanismo esférico.	19
2.6 Aproximación del torque requerido.	20
2.6.1 Movimiento de Flexión.	21
2.6.2 Movimiento de Extensión.	22
2.6.3 Movimiento de Inclinación Bilateral.	23
2.6.4 Movimiento de Rotación.	23
2.7 Reducción de la distancia del centro de masa al punto de rotación.	24
2.8 Conclusiones.	25
Capítulo 3: Modelo Dinámico.	26
3.1 Cinemática Directa.	26
3.2 Dinámica.	30
3.3 Simulación del modelo dinámico y estudio de movimiento en SolidWorks.	35
3.3.1 Parámetros Físicos del Robot.	35
3.4 Conclusiones.	40

Capítulo 4: Sistema de Control.	41
4.1 Hardware.	41
4.1.1 Módulo Wi-Fi.	42
4.1.2 Motorreductor Pololu 37Dx57L de relación 131:1 con codificador 64 CPR.	42
4.1.3 Caracterización de los motores.	43
4.1.4 Etapa de Potencia.	46
4.1.5 Memoria ROM.	49
4.1.6 Memoria RAM	50
4.2 Firmware.	50
4.2.1 Decodificador de señales.	51
4.2.2 Generador de señal PWM.	55
4.2.3 Firmware comunicación Wi-fi:	58
4.2.4 Microprocesador.	62
4.2.5 Firmware de un controlador proporcional para el robot esférico.	64
4.3 Software.	66
4.3.1 Compilador	67
4.3.2 Adquisición de datos de la memoria RAM.	68
4.4 Conclusiones.	69
Resultados Experimentales.	70
5.1 Simulación y estudio de movimiento en SolidWorks.	73
5.2 Caracterización de los motores.	74
5.3 Control de posición (Controlador Proporcional con Par Gravitacional).	76
Conclusiones Generales.	79
Apéndices.	80
Apéndice A: Ponencias	80
1° Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología ECITEC 2017.	81
XXIII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.	82
Apéndice B: Publicaciones.	83
Apéndice C: Certificado TOEFL.	86
Apéndice D: Planos	88

Ensamble Base.	89
Ensamble eslabón 1.	90
Ensamble eslabón 2.	91
Poste Base.	92
Base Motor Polea.	93
Polea dentada T10 motor.	94
Caja Balero Base.	95
Extensión Eje Motor.	96
Soporte Motor.	97
U Flex.	98
Base Soporte Motor.	99
Tapa Balero.	100
Contrapeso Lateral Eslabón 1.	101
Caja Balero.	102
Soporte Rotación.	103
Cubierta Eje.	104
Soporte Cuello.	105
Tapa Balero.	106
Contrapeso Frontal Eslabón 2	107
Contrapeso Lateral Eslabón 2.	108
Referencias	109

Índice de Figuras.

<i>Figura 1: Disciplinas que conforman la Mecatrónica</i>	ix
<i>Figura 2: a) Manipulador Cartesiano, b) Manipulador Cilíndrico, c) Manipulador Esférico, d) Manipulador tipo SCARA y d) Manipulador Antropomórfico.</i>	x
<i>Figura 3: Robot humanoide diseñado por Leonardo Da Vinci.</i>	xi
<i>Figura 4: Robot Humanoide Elektro.</i>	xii
<i>Figura 5: Primeros Robots de aspecto humanoide (P1-P2 -P3).</i>	xii
<i>Figura 6: Robot Kismet.</i>	xiii
<i>Figura 7: Robot humanoide Nexi.</i>	xiv
<i>Figura 8: Robot Saya.</i>	xiv
<i>Figura 9: Robot Expresivo llamado Han.</i>	xv
<i>Figura 10: Robot Humanoide FACE.</i>	xv
<i>Figura 11: Robot humanoide</i>	xvi
<i>Figura 1.1: Vértebras que conforman la columna cervical.</i>	1
<i>Figura 1.2: Rango de movilidad del movimiento de inclinación lateral del cuello.</i>	2
<i>Figura 1.3: Rango de movilidad de los movimientos: a) flexión y b) extensión del cuello.</i>	2
<i>Figura 1.4: Rango de movilidad de la rotación bilateral del cuello.</i>	2
<i>Figura 1.5: Movimientos que controlan los servomotores para realizar expresiones faciales.</i>	4
<i>Figura 1.6: Disposición de los actuadores en la cabeza del robot humanoide.</i>	4
<i>Figura 1.7: Espacio disponible para el mecanismo.</i>	6
<i>Figura 1.8: Emulación del peso de la cabeza del robot humanoide.</i>	6
<i>Figura 1.9: Diagrama general del sistema mecatrónico.</i>	8
<i>Figura 2.1: Sistema mecánico que emula el movimiento del cuello de los seres humanos.</i>	10
<i>Figura 2.2: Eslabones que conforman el robot esférico.</i>	11
<i>Figura 2.3: Soportes de la base, baleros de carga radial y plataforma del motor.</i>	12
<i>Figura 2.4: Caja de baleros y extensión del vástago del motor.</i>	12
<i>Figura 2.5: a) Polea dentada acoplada al motor y b) Polea dentada acoplada al eslabón.</i>	13
<i>Figura 2.6: a) Ensamble de la base y b) Componentes de la base.</i>	13
<i>Figura 2.7: Pieza que se empotra a la base, polea dentada y baleros de carga radial.</i>	14
<i>Figura 2.8: Soportes del actuador y tapas de baleros.</i>	15
<i>Figura 2.9: Contrapesos y caja de baleros acoplados a los soportes del eslabón.</i>	15
<i>Figura 2.10: a) Ensamble del eslabón que emula el movimiento de flexo-extensión y b) Componentes del eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión.</i>	16
<i>Figura 2.11: Plataforma donde se fija el actuador del movimiento de rotación y la polea dentada para la transmisión de movimiento.</i>	17
<i>Figura 2.12: a) Acoplamiento para la base de la cabeza humanoide y b) Vista de sección del acoplamiento.</i> 17	
<i>Figura 2.13: a) Ensamble del eslabón que realiza el movimiento de inclinación bilateral y b) Componentes que conforman el eslabón del movimiento de inclinación bilateral.</i>	18
<i>Figura 2.14: Eslabón que realiza el movimiento de rotación.</i>	19
<i>Figura 2.15: a) Dimensión del largo del mecanismo, b) Dimensiones de altura y ancho del mecanismo y c) Vista dimétrica del mecanismo esférico.</i>	19
<i>Figura 2.16: Parámetros del CMC propuestos.</i>	21
<i>Figura 2.17: Movimiento de 25° con respecto al eje vertical.</i>	21
<i>Figura 2.18: Movimiento de 35° con respecto al eje vertical.</i>	22
<i>Figura 2.19: a) Movimiento inclinación derecha de 15° y b) Movimiento inclinación izquierda de 15°</i>	23

Figura 2.20: Dirección de la fuerza ejercida por el peso y el movimiento de rotación.	24
Figura 2.21: Distancia del centro de masa total del sistema.....	25
Figura 3.1: Sistema de referencia fijo $\sum O(x_0, y_0, z_0)$	27
Figura 3.2: Sistemas coordenados de referencia.....	28
Figura 3.3: Centro de masa del mecanismo esférico en relación con el sistema de coordenadas de referencia.	30
Figura 3.4: Referencia de energía potencial cero para cada eslabón.....	32
Figura 3.5: Herramienta de análisis de mecanismos (SolidWork).	37
Figura 3.6: Asignación de motores y dirección de la fuerza de gravedad para el análisis de movimiento.....	37
Figura 3.7: Gráficas de posición, velocidad y aceleración articular en SolidWorks.	38
Figura 3.8: Sistema de referencia fijo.	38
Figura 3.9: a) Torque Motor 1, b) Torque Motor 2 y c) Torque Motor 3.	39
Figura 4.1: Elementos que conforman el Hardware del Sistema Mecatrónico	41
Figura 4.2: Modulo WiFly RN-XV	42
Figura 4.3: Motorreductor Pololu 131:1.....	43
Figura 4.4: Montaje del motor en el freno Prony	44
Figura 4.5: Diagrama Puente H.	46
Figura 4.6: Malla para el calcuo de las resistencias de activacion del transistor Darlington.	48
Figura 4.7: Malla para el calcuo de las resistencias de activacion del transistor 2N2222.....	48
Figura 4.8: PCB de la etapa de potencia para cada motor.	49
Figura 4.9: Memoria ROM.....	49
Figura 4.10: Memoria RAM.	50
Figura 4.11: Diagrama general del firmware.	50
Figura 4.12: Frecuencia de la señal A del codificador.....	51
Figura 4.13: Muestras por periodo de la señal A.....	51
Figura 4.14 Circuito que genera clk de muestreo.	52
Figura 4.15: Diagrama de estados divisor de frecuencia.....	53
Figura 4.16: Circuito generador del CLK de adquisición.	54
Figura 4.17: Diagrama de estados para lectura del codificador de cuadratura.....	54
Figura 4.18: Reloj de muestreo y señales A y B.	55
Figura 4.19: Diagrama de estados del divisor de frecuencia.....	57
Figura 4.20: Diagrama de estados de generador de PWM.	57
Figura 4.21: Diagrama a bloques del firmware generador de PWM.....	57
Figura 4.22: Firmware del Protocolo de comunicación Wi-Fi.	58
Figura 4.23: Trasmisión UART.....	58
Figura 4.24: Comunicación UART.	59
Figura 4.25: Muestreo de bits.....	59
Figura 4.26: Estructura a bloques del Firmware del UART.	60
Figura 4.27: Máquinas de estados de la transmisión y recepción del UART.	61
Figura 4.28: Módulo UART TX.	61
Figura 4.29: Módulo UART RX.	61
Figura 4.30: Módulo tesUART.....	62
Figura 4.31: Módulo StartStop.	62
Figura 4.32: Bloques que conforman el Microprocesador.....	63
Figura 4.33: Interfaz visual que controla el sistema mecatrónico.....	67
Figura 4.34: Compilador.	68
Figura 4.35: software de adquisición de datos de la memoria RAM.....	69
Figura 5.1: Movimiento de Flexión (Izquierda) y Extensión (derecha).....	70

<i>Figura 5.2: Movimiento de inclinación Bilateral.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.3: Movimiento de Rotación.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.4: Mecanismo esférico de 3 GDL.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.5: Sistema mecatrónico que emula el movimiento del cuello de los seres humanos.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.6: Comparación torque motor 1.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.7: Comparación torque motor 2.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.8: Comparación torque motor 3.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.9: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 1.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.10: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 2.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.11: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 3.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.12: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de flexión.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.13: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de flexión.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.14: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de rotación.</i>	<i>78</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1: Rangos de los principales movimientos del cuello humano.</i>	3
<i>Tabla 1.2: Rangos de movimiento propuestos para esta tesis.</i>	5
<i>Tabla 2.1: Elementos que conforman la base del sistema mecánico.</i>	14
<i>Tabla 2.2: Elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión.</i>	16
<i>Tabla 2.3: Elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de inclinación bilateral.</i>	18
<i>Tabla 3.1: Parámetros Denavit-Hartenberg para encontrar la cinemática directa.</i>	28
<i>Tabla 3.2: Parámetros físicos del robot esférico</i>	36
<i>Tabla 4.1: Especificaciones de comunicación inalámbrica del módulo Wi-Fi (RN-XV)</i>	42
<i>Tabla 4.2: Especificaciones del motorreductor.</i>	43
<i>Tabla 4.3: Valores de torque del motor 1 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.</i>	45
<i>Tabla 4.4 Valores de torque del motor 2 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.</i>	45
<i>Tabla 4.5 Valores de torque del motor 3 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.</i>	46
<i>Tabla 4.6: Instrucciones del microprocesador en lenguaje ensamblador.</i>	63

Introducción

Los Robots humanoides, conocidos también como androides, son máquinas de diseño antropomórficas capaces de imitar las funciones básicas del ser humano tales como caminar, hablar, ver y trasladar objetos.

Actualmente se ha avanzado mucho en la investigación de robots humanoides, y se está dando la posibilidad de tomarlos como asistentes personales. Para ser aceptados por la sociedad, los robots deben tener un aspecto y un comportamiento “humano” e integrarse en nuestro entorno, esto significa que el robot debe tener muy claro con quién está interactuando (nos debe reconocer), debe tener un modelo de nuestras necesidades, debe poder planificar sus acciones con nuestra actividad y debe interactuar con nosotros usando nuestras propias interfaces: el lenguaje natural, la visión o el gesto.

El reto más importante al que se enfrenta la comunidad robótica es la de crear un robot que sea capaz de actuar y moverse exactamente igual que un humano. Así es como nacen los humanoides, unidades con apariencia de ser humano que intenta desenvolverse en un entorno similar al nuestro para realizar diferentes acciones.

Aunque los robots humanoides presentados todavía cuentan con muchas limitaciones, los avances tecnológicos están consiguiendo que cada vez sean más naturales y tengan mayores habilidades para interactuar con el mundo que nos rodea.

Mecatrónica.

La palabra mecatrónica fue acuñado en Japón a finales de 1960, se extendió por Europa, y ahora se utiliza comúnmente en la Estados Unidos. Las disciplinas primarias importantes en el diseño de sistemas mecatrónicos incluyen la mecánica, la electrónica, control y la ingeniería informática, ver figura 1, la definición más comúnmente aceptada es aquella que hace referencia a la sinergia entre diferentes ingenierías. Mecatrónica es una de los nuevos campos de la ingeniería que requiere un amplio enfoque para el diseño de sistemas que podemos llamar formalmente sistemas mecatrónicos, estos también se conocen como dispositivos inteligentes a veces, mientras que el término inteligente es difícil de alcanzar en la definición precisa, en el sentido de la ingeniería nos referimos a la inclusión de elementos tales como la lógica, la retroalimentación y cómputo que en un diseño complejo puede aparentar que simula procesos de pensamiento humanos. No es fácil de segmentar diseño de sistemas mecatrónicos dentro de un campo tradicional de la ingeniería porque tal diseño se basa en el conocimiento a través de muchos campos [1].

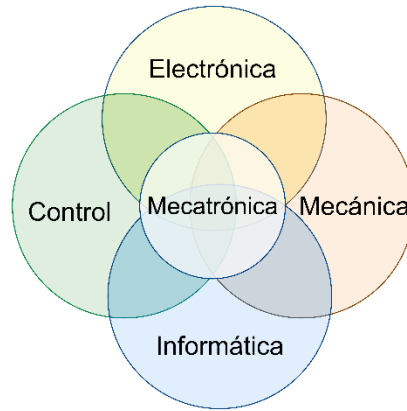


Figura 1: Disciplinas que conforman la Mecatrónica

Robótica.

La robótica es una disciplina científica que aborda la investigación y desarrollo de una clase particular de sistemas mecánicos, denominados robots, diseñados para realizar una amplia variedad de aplicaciones industriales, científicas, domésticas y comerciales. La naturaleza multidisciplinaria de la robótica permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, electrónica, computación, visión e inteligencia artificial, entre otras [2].

La palabra Robot tiene su origen en un libro clásico de Karel Capek, RUR (Rossum's Universal Robots). En este se hacía referencia a estos ayudantes como robota, palabra que en checo significa trabajo forzado o esclavo. Entre los robots considerados de más utilidad en la actualidad se encuentran los robots industriales o manipuladores. La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association), según la cual:

"Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas"

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:

"Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas" [3].

Robots Seriales.

La estructura mecánica de un robot manipulador consta de una secuencia de cuerpos rígidos interconectados por medio de articulaciones; un manipulador se caracteriza por un brazo que asegura la movilidad, una muñeca que confiere destreza, y un efector terminal que realiza la tarea requerida del robot.

La estructura fundamental de un manipulador es la cinemática serial o cadena abierta. Desde un punto de vista topológico, una cadena cinemática se denomina abierta cuando sólo hay una secuencia de enlaces que conectan los dos extremos de la cadena.

La movilidad de un manipulador está garantizada por la presencia de las articulaciones. La articulación entre dos eslabones consecutivos se puede realizar por medio de cualquier tipo de articulación de una prismática o una articulación giratoria. En una cadena cinemática abierta, cada articulación prismática o giratoria proporciona la estructura con un solo grado de libertad (DOF). En el caso más general de una tarea que consiste en la colocación arbitraria y orientar un objeto en el espacio tridimensional, se requieren seis grados de libertad, tres para el posicionamiento de un punto en el objeto y tres para orientar el objeto con respecto a un marco de coordenadas de referencia.

El espacio de trabajo del robot representa el medio por el cual se puede desplazar el efector final del manipulador, su forma y volumen dependen de la estructura del manipulador, así como de la presencia de límites de conjuntos mecánicos.

El tipo y la secuencia de los grados de libertad del brazo, a partir de la articulación de la base, permite una clasificación de los manipuladores como: cartesiano, cilíndrico, esférico, SCARA y antropomórfico [4], como se muestra en la figura 2.

Se muestran los tipos de manipuladores con su espacio de trabajo:

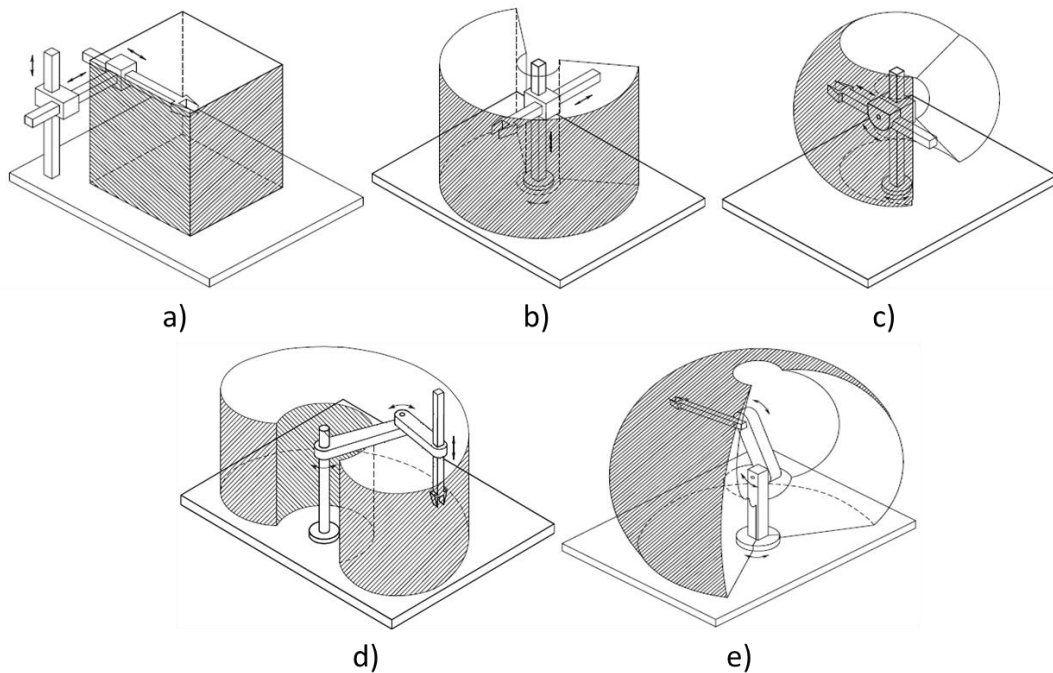


Figura 2: a) Manipulador Cartesiano, b) Manipulador Cilíndrico, c) Manipulador Esférico, d) Manipulador tipo SCARA y e) Manipulador Antropomórfico.

Robots Humanoides.

El principio de los robots humanoides se remonta al robot que diseñó Leonardo da Vinci alrededor del año 1495, el robot de Leonardo fue un autómatas humanoide, ver figura 3, este dispositivo también es conocido como el robot soldado, o como caballero mecánico del Leonardo. Básicamente, es un guerrero, vestido con armadura medieval, que es capaz de realizar algunos movimientos parecidos a los humanos, se basó en un traje de caballero que fue equipado con engranajes, ruedas, poleas y cables en el interior.

Consistía en dos estructuras de trabajo que gestionan la parte superior y la inferior del cuerpo del caballero. Se controla el movimiento de los hombros, las manos, los codos, las muñecas, las caderas, las rodillas, las piernas y los tobillos, el caballero robótico podía sentarse, ponerse de pie, levantar la visera, abrir y cerrar la boca, mover la cabeza [5].



Figura 3: Robot humanoide diseñado por Leonardo Da Vinci.

Los robots humanoides siguieron surgiendo, dotándolos con características peculiares, por ejemplo “Elektro”, un robot construido por la Westinghouse Electric Corporation en su fábrica de Mansfield (Ohio) entre 1937 y 1939, de apariencia humanoide, ver figura 4, su cuerpo recubierto de aluminio consiste en engranajes de acero, levas y motores, mide algo más de 2 metros y pesa unos 120 kg. Su cerebro consiste en 48 relés eléctricos que funcionan como una central telefónica, sus “ojos” fotoeléctricos distinguen la luz roja y la verde, y puede caminar a baja velocidad, puede pronunciar unas 700 palabras (gracias a un fonógrafo de 78 rpm), gira la cabeza, mueve su boca y brazos [6].

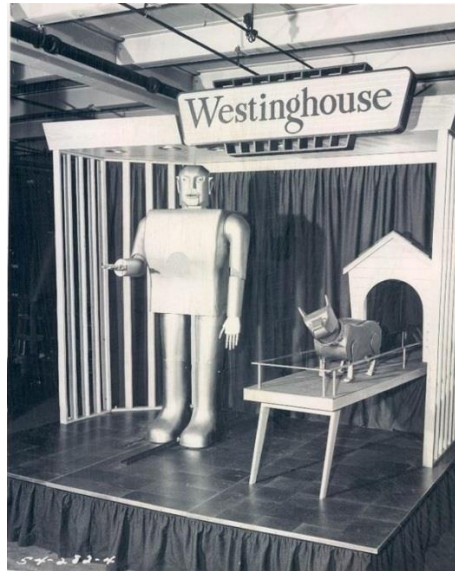


Figura 4: Robot Humanoide Elektro.

Honda presenta sus primeros prototipos con morfología humana llamado P1 en los años (1993-1997), donde el robot cuenta con extremidades superiores, cuerpo, capaz de moverse autónomamente, posteriormente el robot P2, el cual sorprendió a la audiencia por tener un movimiento muy semejante al humano y el robot P3 que fue la evolución en tamaño y peso [7], como se muestra en la figura 5.

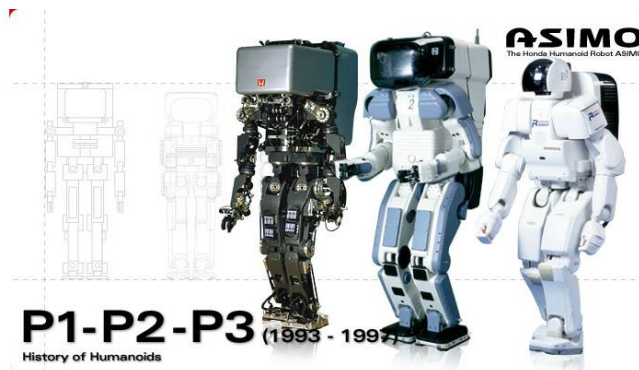


Figura 5: Primeros Robots de aspecto humanoide (P1-P2 -P3).

Con la evolución de la tecnología y la idea de crear robots que interactúen con el ser humano, se han ido mejorando los semblantes y las funciones de los androides, ya que, para tener una buena interacción y aceptación por la sociedad, no solo es necesario que el robot tenga una apariencia amigable y pueda hablar, sino también en la comunicación humana se manejar un lenguaje corporal, que son las acciones o movimientos que producimos al entablar una conversación.

Uno de los aspectos importantes que se consideran, son los gestos expresivos de la cara, que pueden producir empatía e incluso denotar el estado anímico de las personas, esto junto con los movimientos del cuello que dan énfasis al lenguaje corporal.

Por tal motivo, el desarrollo de cabezas robóticas ha ido evolucionando y dándole mayor robustez a los sistemas que conforman a estas, por mencionar algunos de los trabajos de desarrollo enfocados a esta parte del cuerpo humano tenemos la cabeza robótica Kismet, ver figura 6, que es una cabeza humanoide realizada a finales de 1990 en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Su nombre Kismet proviene de una palabra de origen árabe relacionado con el destino y la suerte.

Kismet es considerado un robot expresivo que tiene la capacidad de facilitar la interacción con niños de una forma muy natural. Igualmente, el robot está equipado con sensores de visión y audición que le permiten lograr tales tareas [8].

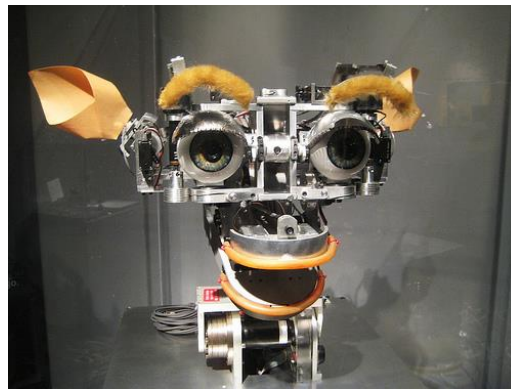


Figura 6: Robot Kismet.

Además otro desarrollo presentado por un grupo de investigadores encabezado por Cynthia Breazeal en el MIT, también conocida por su labor en la construcción de la cabeza humanoide Kismet, es el robot humanoide Nexi que se muestra en la figura 7, ha sido diseñado especialmente para desempeñar labores de comunicación, indispensables para la interacción humano-robot. No obstante también cumple funciones de asistencia y manipulación de objetos. Sus creadores lo identifican como un robot emocional capaz de imitar expresiones humanas de manera sorprendente, mediante el movimiento de sus ojos, cejas y boca [9].

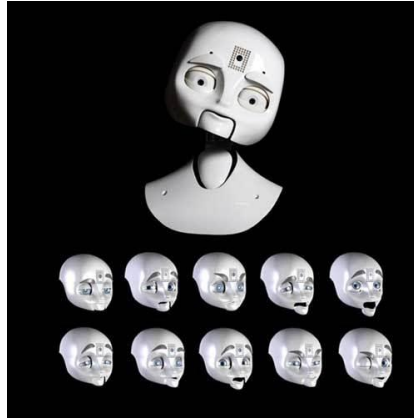


Figura 7: Robot humanoide Nexi.

Se ha ido perfeccionando la apariencia de los robots humanoides, ya que su propósito es que interactúen con la sociedad de una forma natural y que sea una experiencia que genere confianza para el usuario. Se ha dado origen a la fabricación de materiales que tengan la misma textura de la piel, así como cabello sintético, logrando una gran similitud al rostro humano, mayor calidez visual y rompiendo con la impresión de que se trata de un robot.

Saya es una cabeza humanoide que fue desarrollada en la Universidad de Ciencia de Tokio, Japón, por el profesor Hiroshi Kobayashi, ver figura 8. Inicialmente, Saya fue desarrollada con el objetivo de ser utilizada como recepcionista en el año 2004. Tiene la capacidad de hablar diferentes idiomas y usar expresiones faciales que facilitan la comunicación con cualquier tipo de persona. Otro objetivo por el cual fue construida es ser utilizada como método de enseñanza en los salones de clase. Sus expresiones faciales son similares a las de un ser humano y pueden incluir, felicidad, tristeza, curiosidad o rabia [10].



Figura 8: Robot Saya.

Robot Humanoide “Han”.

Los desarrolladores de la empresa Hanson Robotics crearon a Han, un humanoide diseñado con una piel de goma que le permite responder a gestos y expresiones mediante un sistema que combina diversos sistemas mecánicos y de reconocimiento facial, ver figura 9. Tareas simples como mantener un contacto visual y establecer una animada pero simple

conversación con otras personas puede ser algo sencillo pero repetitivo para un humano que debe estar en una recepción o una visita guiada a un museo. Con cámaras ubicadas en su hombro y en sus ojos, Han puede mantener un contacto visual con una persona y reaccionar con diversas muecas y expresiones que se ejecutan bajo un mecanismo controlado por unos 40 motores internos, a su vez, el humanoide cuenta con una función de reconocimiento de voz para sostener una simple conversación con los humanos [11].



Figura 9: Robot Expresivo llamado Han.

Robot humanoide FACE.

El equipo interdisciplinario del Centro de Investigación Interdepartamental "E.Piaggio" en la Universidad de Pisa, trabajan en la interacción emocional robot-humano, desarrollando un robot humanoide llamado FACE por sus siglas en inglés (Facial Automation for Conveying Emotions), ver figura 10, que presenta la información emocional a través de expresiones faciales para estudiar el vínculo empático robot humano, capaz de recoger información sincronizada adquirido de diferentes sensores, es decir, fisiológico, psicológico y los datos de comportamiento. El sistema de accionamiento del robot es controlado por 32 servomotores que están integrados en el cráneo androide y el cuello. Las posiciones de los servomotores tratan de reflejar los de los músculos faciales para simular expresiones de una manera muy realista [12].



Figura 10: Robot Humanoide FACE.

Con los trabajos presentados por diversas empresas e instituciones, se ha observado que el diseño y desarrollo del mecanismo que permite emular el comportamiento del cuello humano es indispensable para generar que el robot tenga un desempeño natural en la interacción con la sociedad, ya que aporta los movimientos expresivos naturales del lenguaje corporal del ser humano.

El laboratorio de Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento (LKE por sus siglas en inglés), ha adquirido recientemente un robot humanoide, mostrado en la figura 11, con la capacidad de realizar expresiones faciales, sin embargo, la componente del mismo que sostiene la cabeza está presentando errores que generan el sobrecalentamiento en los motores. Este tipo de problemas provoca que los movimientos de cuello queden en determinado momento totalmente desactivados y por tanto, el sistema global deja de tener el desempeño deseado.



Figura 11: Robot humanoide

Por tal motivo se pretende diseñar un sistema mecatrónico que emule los movimientos del cuello humano y brinde un mejor desempeño en la operación del robot, así como también, lograr implementar efectos de control y mayor rigidez en el componente del cuello para soportar el peso de la cabeza del robot cuando este sea desconectado de su fuente de alimentación.

El sistema mecatrónico propuesto, estará conformado por un sistema digital que recogerá señales, las procesará y emitirá una respuesta por medio de actuadores, generando movimientos o acciones sobre el sistema en el que se va a actuar, que en este caso será un cuello robótico que sostendrá la cabeza de un humanoide.

Se deberá desarrollar la interfaz de usuario para configurar el controlador deseado y al final de este proyecto, se presentarán las pruebas del diseño.

Objetivos:

General:

“Desarrollar un sistema mecatrónico para un robot humanoide que permita sostener la cabeza del mismo, emulando el movimiento del cuello de los seres humanos.”

Específicos:

- Estudio de las teorías, conceptos y estado del arte.
- Estudiar el análisis de cinemática y dinámica del sistema mecatrónico.
- Diseño del sistema mecánico que emule los movimientos del cuello.
- Instrumentar el sistema de control del cuello mecatrónico para el robot.
- Diseñar la electrónica necesaria.
- Desarrollar la interfaz de usuario para configurar el controlador deseado.
- Pruebas del sistema diseñado.
- Publicación de los resultados.

Organización de la Tesis:

La organización de este trabajo de tesis está estructurado de la siguiente manera:

En el **capítulo 1** se definen los alcances de este trabajo y se explica bajo que contexto se debe realizar la solución del problema.

En el **capítulo 2** se expone el diseño mecánico del sistema mecatrónico basada en los robots esféricos, además se realiza una aproximación del torque analizando el mecanismo de forma estática.

En el **capítulo 3** se calcula el modelo dinámico del mecanismo propuesto en esta tesis por medio de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange, también se realiza una simulación en Matlab con un controlador tangente hiperbólico y un estudio de movimiento en SolidWorks para efectos de comparación del modelo matemático.

En el **capítulo 4** se detalla el sistema de control en general y cada una de las partes que lo conforman, Hardware, Firmware y Software.

Se presenta una sección de **resultados experimentales** donde se exponen imágenes del robot esférico diseñado y sus movimientos, gráficas de la respuesta de los actuadores y gráficas donde se compara el modelo dinámico con el estudio de movimiento. Por último, se exponen las **conclusiones generales** de este trabajo.

Capítulo 1: Características del Sistema.

En este capítulo se expone de manera breve la anatomía del cuello humano denotando los movimientos que puede realizar y los rangos de estos, siendo esta parte del cuerpo el motivo de estudio de esta tesis para lograr el objetivo general, además, se definen los alcances de este trabajo y se explica bajo que contexto se debe realizar la solución del problema.

1.1 Movimientos del cuello humano.

El cuello es una de las áreas más complejas del cuerpo humano, es el sector de la columna que tiene mayor movimiento, cuenta con dos principales funciones, que son la función estática, para el control de la cabeza y la función dinámica, que es el movimiento del cuello a través de la columna cervical. Las vértebras cervicales se muestran en la figura 1.1, corresponden a la zona del cuello y son siete, forman la denominada columna cervical, su función básicamente es proporcionar movilidad al cuello y la cabeza.

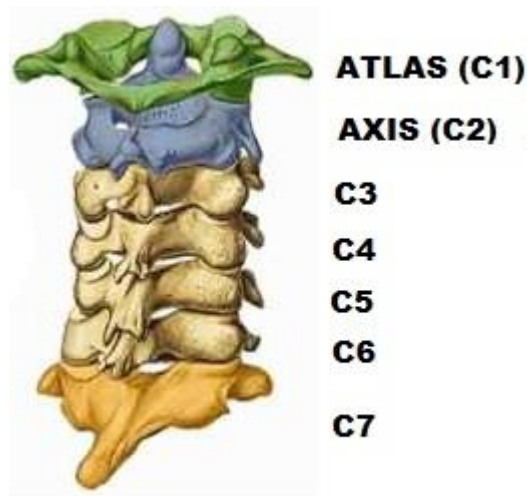


Figura 1.1: Vértebras que conforman la columna cervical.

El cuello puede realizar un gran número de movimientos, los más básicos son flexión, extensión, inclinación y rotación, cada uno implica la participación de estructuras diferentes, que facilitan, controlan y limitan el movimiento [13].

Los rangos de movilidad del cuello que maneja la goniometría, que es la medición de los ángulos articulares del cuerpo humano, para los diferentes tipos de movimiento del cuello, estos son:

- Para el movimiento de inclinación lateral, el cuello presenta un rango de movilidad de 45° por lado como se muestra en la figura 1.2, esto es 90° medidos desde una inclinación máxima lateral izquierda hasta la máxima inclinación derecha.

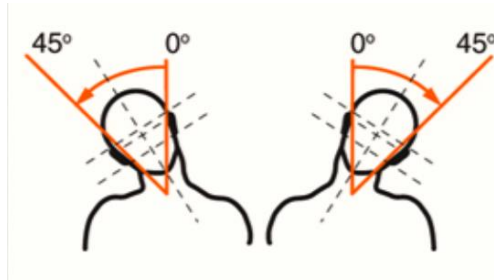


Figura 1.2: Rango de movilidad del movimiento de inclinación lateral del cuello.

- El movimiento de flexión del cuello, es cuando la barbilla se acerca al pecho, presenta un rango que oscila entre los 35° y 45° como se muestra en la figura 1.3(a); el movimiento de extensión, contrario al de flexión, presenta un rango que varía entre los 35° y 55° como se muestra en la figura 1.3(b).

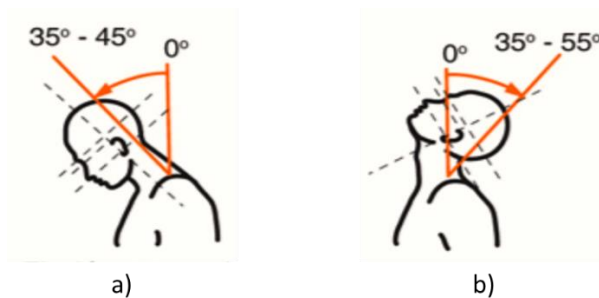


Figura 1.3: Rango de movilidad de los movimientos: a) flexión y b) extensión del cuello.

- El movimiento de rotación del cuello presenta un rango de movilidad que varía entre 60° y 80° , esto por cada lado, por tanto el rango completo de rotación del lado izquierdo hacia el lado derecho suma un rango máximo de 160° , como se muestra en la figura 1.4.

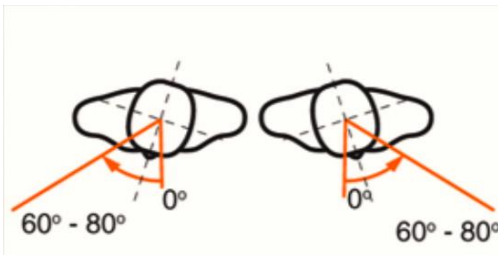


Figura 1.4: Rango de movilidad de la rotación bilateral del cuello.

El cuello humano es una estructura compleja, ya que participan diversos músculos y estructuras óseas para su movimiento, se han realizado diversos estudios con relación a los rangos de movilidad, velocidades y aceleraciones de los principales movimientos del cuello humano, además, influyen factores como la edad y el género.

Por tanto, se muestra en la tabla 1.1 la información del análisis cinemático de los principales movimientos del cuello humano, los cuales son el resultado de un estudio estadístico a una población sana de 60 individuos, y se efectuó sobre los resultados un análisis de normalidad mediante el test de “Kolmogorov-Smirnov” [14].

Tabla 1.1: Rangos de los principales movimientos del cuello humano.

Movimiento	Rango (°)
Flexo-extensión	114
Inclinación lateral	86
Rotación	137

1.2 Cabeza del Robot Humanoide

La cabeza del robot humanoide tiene 32 grados de libertad que simulan las capacidades expresivas del rostro humano. El material de piel "Frubber" patentado por Hanson Robotics permite generar con gran similitud las expresiones faciales del rostro humano, pero el material requiere menos cantidad de energía para moverse a comparación de los materiales convencionales constituidos por elastómeros, por lo que solo necesita pequeños motores para afectar las expresiones.

Los 32 grados de libertad son activados por servomotores bidireccionales en comparación de los músculos humanos que son unidireccionales, cada motor puede simular la acción de 2 grupos de músculos en el rostro humano como se muestra en la figura 1.5. Por lo tanto, el robot es capaz de simular las acciones de la mayoría de los músculos principales en la cara y el cuello, logrando replicar la gran diversidad de expresiones faciales humanas, además, es capaz de realizar movimientos de los ojos y de boca.

La acción rápida de los servos y la piel Frubber se correlaciona con los tiempos de respuesta de la musculatura humana, lo que permite interacción social con humanos en tiempo real.

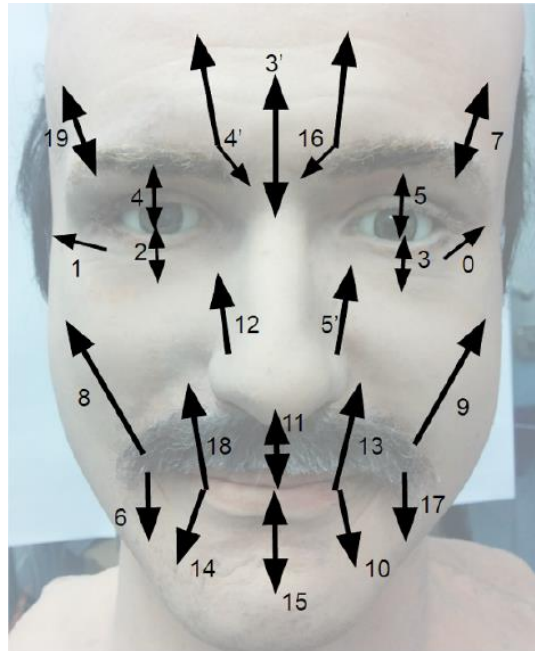


Figura 1.5: Movimientos que controlan los servomotores para realizar expresiones faciales.

La cabeza del robot humanoide está constituida por 27 servomotores como se muestra en la figura 1.6, los cuales se encargan de realizar todos los movimientos necesarios para representar las expresiones faciales que es capaz de realizar el robot humanoide, por tal motivo el peso de la cabeza humanoide es de 3.2 kilogramos y se considera una masa no homogénea, debido a la disposición de los motores, no se tiene alguna referencia en cuanto a su centro de masa.

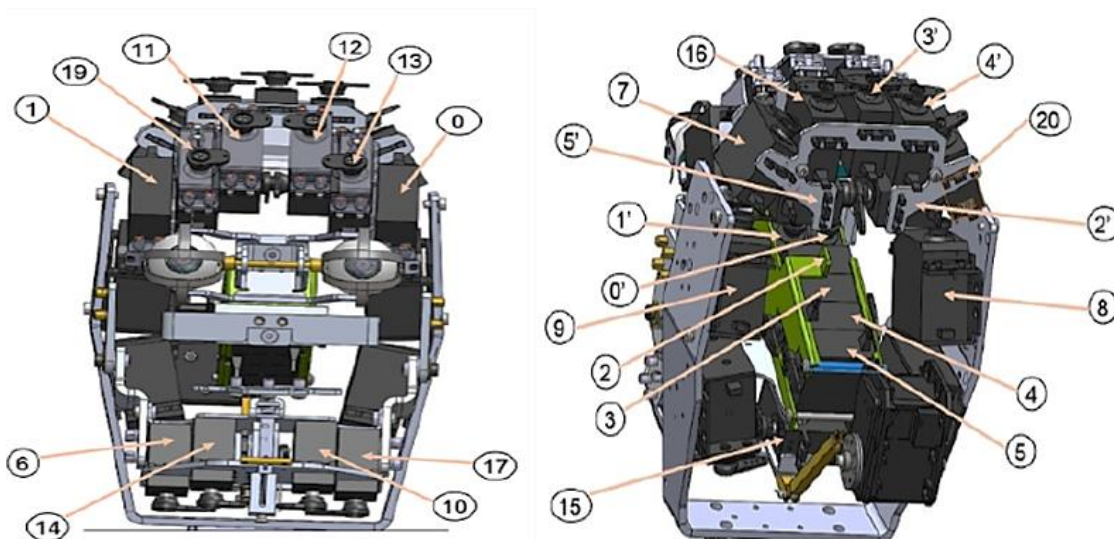


Figura 1.6: Disposición de los actuadores en la cabeza del robot humanoide.

1.3 Especificaciones.

Para la realización de este trabajo fue necesario tomar en cuenta consideraciones previas al diseño del sistema mecatrónico, estas determinaron las bases sólidas para el perfecto funcionamiento, las cuales son:

- El sistema permitirá sostener la cabeza del humanoide sin generar máximos esfuerzos en los motores del cuello.
- El sistema mecatrónico propuesto estará basado en la cinemática y dinámica de los seres humanos.
- El sistema desarrollado contará con un mecanismo efectivo para la manipulación desde herramientas de software (en tiempo real).
- Dado el costo de la cabeza del humanoide, el sistema mecatrónico contará con un mecanismo automático de shut-down (apagado seguro).

Anteriormente se mencionan los rangos máximos de movimiento del cuello humano, aunque en este trabajo el objetivo general es emular el movimiento de este, se limitan los ángulos de movimiento ya que el robot humanoide se ocupará para realizar estudios sobre el comportamiento humano en la interacción con este, por tanto, el robot solo conversará con el usuario y para estos fines no es necesario que se contemplen los rangos máximos de movimiento, basta con que el robot sea capaz de generar movimientos tenues que denoten el lenguaje corporal cuando se mantiene una conversación, además debe ser capaz de enfocar a distintas personas en un espacio o habitación. Los rangos de movimiento propuestos para este trabajo se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Rangos de movimiento propuestos para esta tesis.

Movimiento	Rango (Grados)
Flexión	25°
Extensión	35°
Inclinación lateral	15°
Rotación	60°

La estructura mecánica debe contar con dimensiones adecuadas para el montaje en el robot humanoide, se debe respetar la posición donde se encuentra la cabeza del robot humanoide, se cuenta con un espacio disponible para empotrarlo con altura de 20 centímetros, de ancho 19 centímetros y de profundidad 18 centímetros, como se muestra en la figura 1.7.

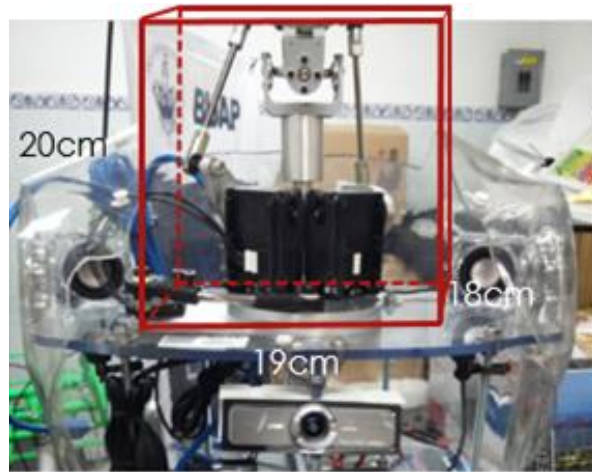


Figura 1.7: Espacio disponible para el mecanismo.

Debido al costo del robot humanoide se deberán realizar pruebas con el prototipo diseñado en esta tesis emulando el peso de la cabeza del robot y su morfología, teniendo en cuenta que la disposición de los motores causan que el centro de masa no esté en el punto medio de la misma, se logra apreciar en la figura 1.6 la distribución de los motores en la periferia de la cabeza humanoide de forma simétrica, notando que la mayor concentración de motores está en el centro y la frente, esto nos permite replicarla y por tanto lograr realizar pruebas con la cabeza emulada como se muestra en la figura 1.8.



Figura 1.8: Emulación del peso de la cabeza del robot humanoide.

El sistema mecatrónico estará conformado por una interfaz de comunicación inalámbrica basada en protocolo Wi-Fi el cual recibirá información suministrada por el usuario desde la interfaz gráfica desarrollada en el software LabVIEW que controlará y monitoreará las acciones realizadas.

El sistema mecatrónico contará con una unidad de procesamiento digital la cual se propone implementar en Arreglos de Compuertas Programables en Campo (Field Programmable Gate Array, FPGA), se necesita que el sistema digital cuente con unidades de almacenamiento para otorgar autonomía en el proceso de control, esto es, que el sistema digital tenga la capacidad de retener la información de parámetros enviados por el usuario y poder utilizarlos en cualquier momento, lo que otorga velocidad de procesamiento, al mismo tiempo, los datos calculados y procesados por el FPGA se almacenarán para su posterior obtención, por tal motivo se integraran memorias RAM y ROM que harán posible dicha tarea.

En el dispositivo FPGA se implementarán módulos de lógica programable que conforman las etapas de administración de comunicación Wi-Fi, administración de almacenamiento de información, administración de comandos, decodificadores, módulo de control y finalmente puertos de entrada y salida. Se pretende que la unidad de procesamiento digital reciba información para el control del sistema mecatrónico a través del módulo de comunicación inalámbrico, para lo cual el administrador de comunicación organizará la información para que el administrador de comandos defina que acción realizar ya sea el caso de guardar variables en la memoria ROM a través de la etapa de administración de ROM, enviar los datos procesados por medio del acceso a la memoria RAM a través de su módulo de administración, o iniciar el proceso de control.

Para iniciar el proceso de control del mecanismo se debe contar con los parámetros de posiciones deseadas para los actuadores y se deberá monitorear la posición de estos por medio de los módulos decodificadores encargados de transformar las señales recibidas por los sensores del sistema para lograr implementar la ecuación de control, todo esto se realizará en un módulo de control.

Para transmitir la respuesta hacia los actuadores se diseñará la etapa de potencia acorde a los requerimientos de los actuadores. Por último, el sistema mecatrónico contará con una estructura mecánica que permita emular los movimientos del cuello humano.

En el diagrama que muestra la figura 1.9, se plantea la idea general de funcionamiento del sistema mecatrónico.

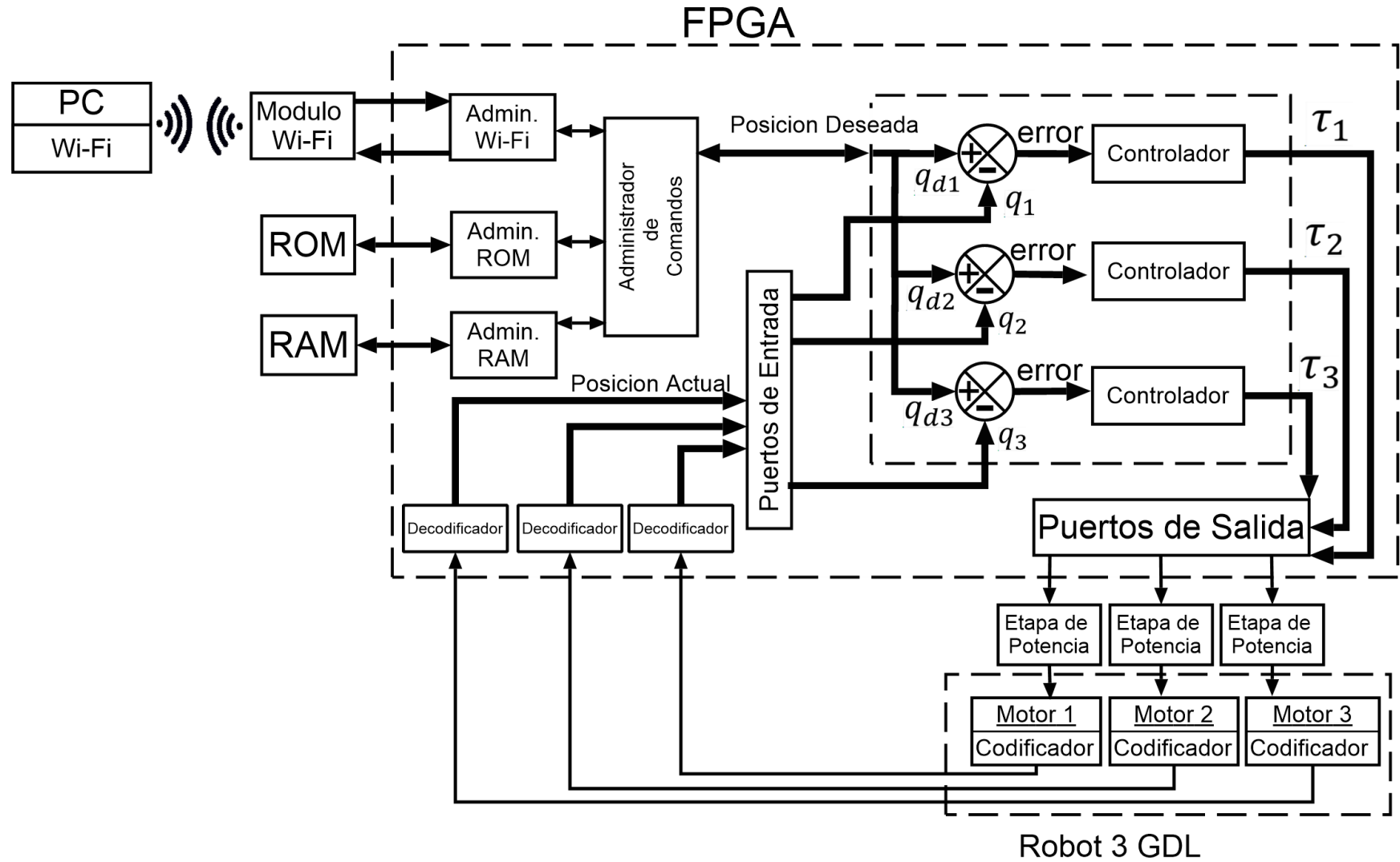


Figura 1.9: Diagrama general del sistema mecatrónico.

1.4 Conclusiones.

En este capítulo se describieron las especificaciones de diseño del sistema mecatrónico, las cuales en un principio se plantean de forma general ya que el sistema deberá cumplir con ciertas características puntuales que definen la metodología de diseño, además, se detallan los casos de estudio como son los movimientos del cuello humano que han sido analizados por diversos autores en la ciencia de la biomecánica. Cabe destacar que en conclusión son tres tipos de movimientos principales que describen la cinemática del cuello humano y se consultó en la literatura los rangos de movilidad aunque para esta tesis se acotan a determinados valores ya que el robot no realizará movimientos tan prolongados. Por último se expone las características de la cabeza del robot humanoide y debido al costo de esta se decidió replicar su peso para realizar pruebas del sistema mecatrónico.

Capítulo 2: Diseño Mecánico.

En este capítulo se expone el diseño de la estructura mecánica que sostendrá la cabeza de un robot humanoide y emula los movimientos del cuello humano, ver figura 2.1, el cual está basado en la estructura de los robots esféricos, ya que presenta características convenientes para este trabajo. Se describen las piezas que conforman la estructura mecánica del sistema mecatrónico y se puntualizan las características de cada pieza, además, se explica como el diseño presentado es funcional para los fines de este trabajo. En este apartado se presentan imágenes descriptivas de las piezas, si el lector desea profundizar o replicar este trabajo, consultar el ANEXO D donde se presentan los planos técnicos.

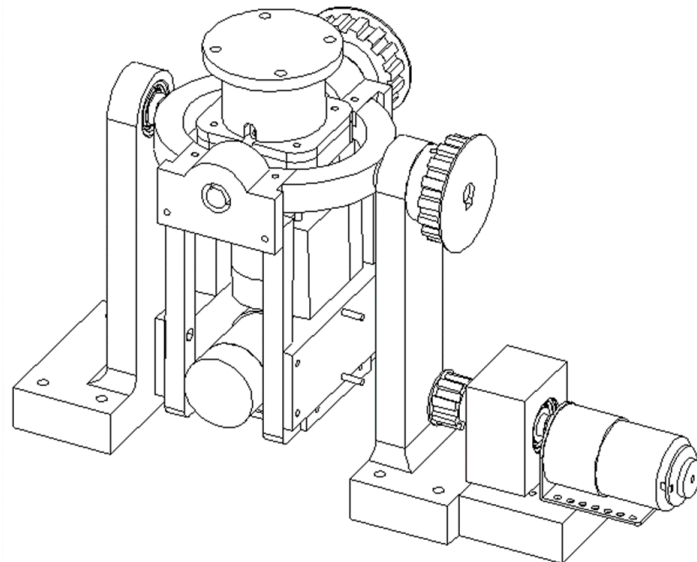


Figura 2.1: Sistema mecánico que emula el movimiento del cuello de los seres humanos.

En robótica se han estudiado los robots esféricos, un mecanismo esférico es aquel en el que cada eslabón tiene algún punto que se mantiene estacionario conforme el eslabonamiento se mueve, y en el que los puntos estacionarios de todos los eslabones están en una ubicación común, en otras palabras, el lugar geométrico de cada punto es una curva contenida dentro de una superficie esférica y las superficies esféricas definidas por varios puntos arbitrariamente elegidos son concéntricas. Por ende, los movimientos de todas las partículas se pueden describir por completo mediante sus proyecciones radiales, o "sombras", proyectadas sobre la superficie de una esfera, con un centro seleccionado en forma apropiada [15]. Aunque un mecanismo esférico de 3 GDL puede realizar movimientos en un espacio tridimensional, en general es suficiente contar con 2 GDL para realizar esta tarea, ya que la rotación sobre el eje de simetría del efector final no cambia la posición en el espacio, solo

denota la orientación del mismo [16]. Los robots esféricos más estudiados constan de una cadena cinemática cerrada, esto es, que tiene dos o más eslabones unidos a su base, aunque presentan mayor rigidez y capacidad de carga, el espacio de trabajo es reducido y su modelo dinámico es de suma complejidad, el ejemplo de mayor impacto es el robot llamado “Agile Eye” diseñado por Gosselin and Hamel [17], el cual es un mecanismo paralelo de 3 GDL que tiene como objetivo el control de la orientación de una cámara.

Emular los movimientos del ser humano ha sido tema de interés para el mundo de la robótica desde hace muchos años, ya sea para lograr diseños más amigables o para encontrar soluciones más simples a problemas de control de movimiento. El desarrollo de robots humanoides comprende el diseño de múltiples subsistemas interconectados, cada uno con una dinámica diferente pero no independiente de los demás. En el caso del posicionamiento en el espacio de la cabeza, existe una gran cantidad de posibilidades, con su respectivo espectro de singularidades, este posicionamiento puede ser objeto del cambio de posición de los pies, de la cadera o bien del cuello [18].

El mecanismo esférico de 3 GDL, presentado en este trabajo, le brinda movilidad a la cabeza del humanoide Arthur desarrollado por la empresa Hanson Robotics [19], la cual tiene un peso de 3.2 kilogramos, por tal motivo la estructura mecánica presenta rigidez para soportar dicha carga y logra emular los movimientos del cuello humano a través de tres eslabones que representan cada uno de sus principales movimientos, como se muestra en la figura 2.2, así mismo se cuenta con contrapesos para mover el centro de masa de la cabeza del humanoide (CMC) lo más cerca posible del punto de giro, esto para reducir los efectos inerciales y la energía suministrada por los motores.

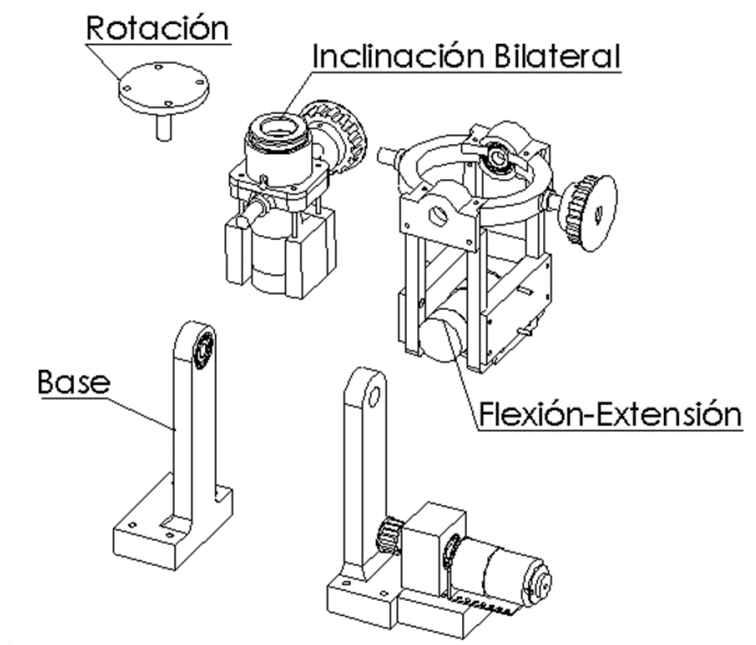


Figura 2.2: Eslabones que conforman el robot esférico.

2.1 Diseño de la Base

El diseño de la estructura es de tal forma que direcciona la fuerza de carga hacia la base, combinando la característica que poseen los robots paralelos al concentrar toda la carga en dicha parte en comparación de la cadena cinemática serial que concentran el peso en cada articulación y por ende los actuadores deben de cargar las estructuras adyacentes, por ejemplo el actuador de la base de cualquier robot serial debe de soportar la carga de toda la estructura mecánica y el peso de los demás actuadores. Por lo tanto, la base del mecanismo esférico presentado en este trabajo cuenta con dos soportes, lo que aumenta la rigidez y le brinda soporte a la estructura adyacente, estos soportes a su vez cuentan con baleros de carga radial del fabricante FAG modelo 6000 debido a que la acción de la gravedad actúa solo en ese sentido y se requiere que el eslabón siguiente pueda girar libremente sin rozamiento para evitar el calentamiento y desgaste de las piezas, además la base cuenta con una estructura en forma de rectángulo que se empotra en uno de los soportes, esta pieza sirve de plataforma para el motor y a su vez ajusta la distancia a la que debe de estar el mismo, como se muestra en la figura 2.3.

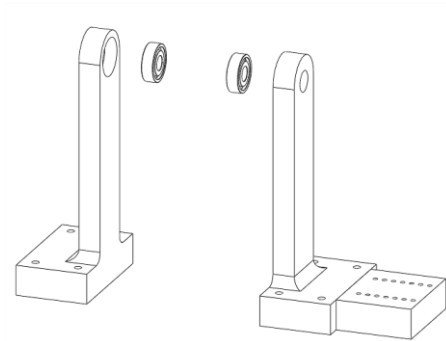


Figura 2.3: Soportes de la base, baleros de carga radial y plataforma del motor.

Se diseñó una caja de baleros, la cual tiene la función de liberar al eje del motor de la tensión a la que está sometido en la transmisión de potencia, esta pieza contiene dos baleros de carga radial separados a una distancia para tener dos puntos de apoyo, el vástago del motor no es lo suficientemente largo para atravesar la caja de baleros, por tal motivo, se diseñó una extensión del vástago del motor, que permite resolver esta problemática, como se muestra en la figura 2.4.

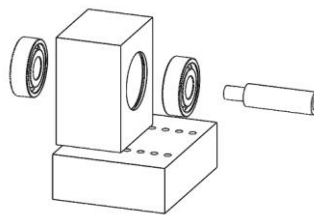


Figura 2.4: Caja de baleros y extensión del vástago del motor.

Las poleas dentadas garantizan una relación de transmisión constante al disminuir el riesgo de deslizamiento sobre la polea. Por otro lado, la incorporación del dentado a la correa le confiere de una mayor flexibilidad longitudinal lo que le permite poder adaptarse a poleas de diámetros más pequeños. En definitiva, para aplicaciones donde se requiera exactitud en la relación de transmisión, unido a exigencias de altas velocidades de giro, o que por consideraciones de diseño no sea posible el engrase o lubricación de los componentes de la transmisión, entonces el empleo de correas dentadas o síncronas es la mejor opción [20]. Por tal motivo se decidió utilizar la transmisión de potencia mediante poleas y bandas dentadas, al requerir una potencia moderada en un diseño compacto y así mismo evitar el uso de lubricantes o engrase como sería el caso de cadenas o engranes, además el recubrimiento que tendrá el sistema mecatrónico es de sumo cuidado y se debe minimizar el desgaste o en caso extremo causar algún daño a este. Las bandas y poleas dentadas seleccionadas son de paso métrico T10, además se diseñaron las poleas de tal forma que se puede tener una relación de reducción de 2:1 y así lograr disminuir el torque demandado por la cabeza del robot humanoide. Las poleas dentadas tienen ciertas características que elevan su costo de fabricación, además, se encontró la problemática que las piezas requeridas en este trabajo no eran fabricadas usualmente por ningún proveedor, por tal motivo se diseñaron y manufacturaron poleas dentadas a las necesidades del sistema, se muestran en la figura 2.5 las poleas diseñadas.

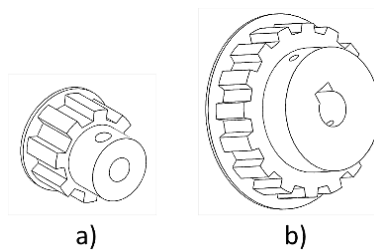


Figura 2.5: a) Polea dentada acoplada al motor y b) Polea dentada acoplada al eslabón.

Por último, se muestra en la figura 2.6(a) el ensamble de la base de la estructura mecánica y 26(b) los componentes de la base.

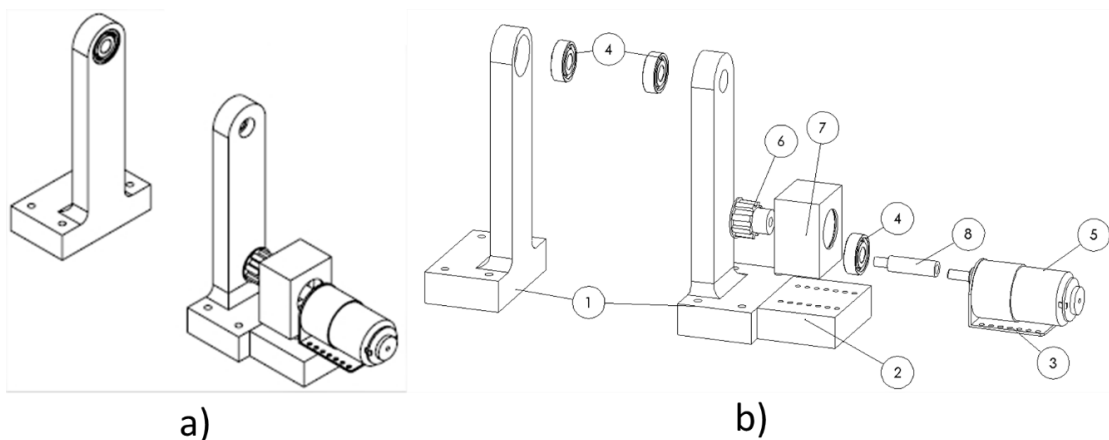


Figura 2.6: a) Ensamble de la base y b) Componentes de la base.

En la tabla 2.1 se muestra la descripción de los elementos que conforman la base del sistema mecánico, los cuales se mostraron en la figura 2.6(b).

Tabla 2.1: Elementos que conforman la base del sistema mecánico.

N.º DE ELEMENTO	PIEZA	CANTIDAD
1	Poste	2
2	Base_motor_polea	1
3	Pololu L Bracket	1
4	Balero_FAG 6000	4
5	Pololu-37D-codificador	1
6	Polea_T10_motor	1
7	Caja_balero_base	1
8	Extensión_eje_motor	1

2.2 Estructura que emula el movimiento de Flexo-extensión.

El eslabón que realiza el movimiento de flexión y extensión está conformado por una pieza en forma de arillo la cual se empotra a la base y le dará soporte al siguiente eslabón por medio de dos baleros de carga radial, además a esta pieza se le acopla una polea dentada para la transmisión de movimiento, como se observa en la figura 2.7.

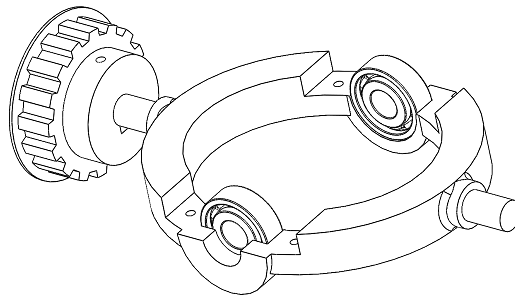


Figura 2.7: Pieza que se empotra a la base, polea dentada y baleros de carga radial.

Este eslabón contiene el motor que gobierna el movimiento de flexión bilateral, por lo que se diseñaron dos soportes que mantienen al actuador a una distancia conveniente para reducir el centro de masa del sistema, a su vez, se crearon las tapas que fijan a los baleros de carga radial y donde se empotran dichos soportes, como se muestra en la figura 2.8

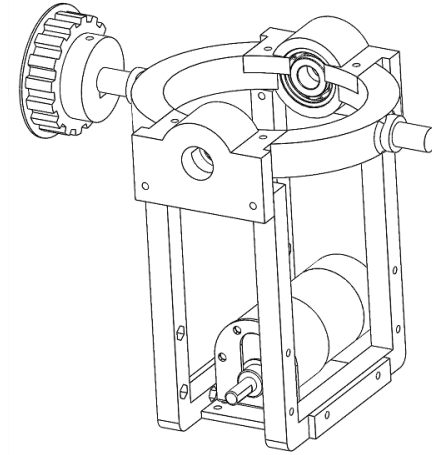


Figura 2.8: Soportes del actuador y tapas de baleros.

Además de alejar el actuador del movimiento de flexión que tiene un peso de 250 gramos, se dotó a este eslabón de contrapesos fabricados de acero 1018, los cuales se fijan sobre los soportes mostrados en la figura 2.8, por otro lado, como se mencionó anteriormente es necesario contar con una caja de baleros que liberen la tensión del eje del motor provocada por la transmisión de potencia, estos componentes también actúan como contrapeso, se muestran en la figura 2.9 los contrapesos y la caja de baleros.

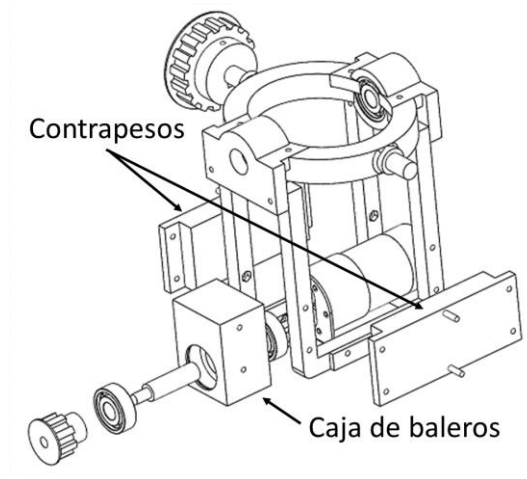


Figura 2.9: Contrapesos y caja de baleros acoplados a los soportes del eslabón.

Por último, se muestra en la figura 2.10(a) el ensamble del eslabón que emula el movimiento de flexo-extensión y 2.10(b) Componentes del eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión.

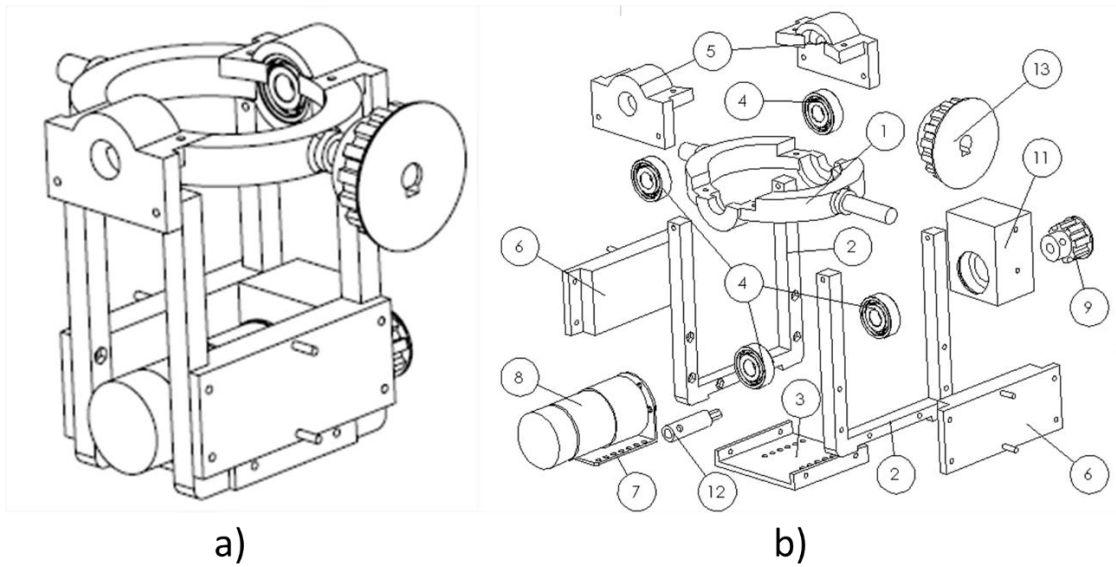


Figura 2.10: a) Ensamble del eslabón que emula el movimiento de flexo-extensión y b) Componentes del eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión.

En la tabla 2.2 se muestra la descripción de los elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión mostrados en la figura 2.10(b).

Tabla 2.2: Elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de flexo-extensión.

N.º DE ELEMENTO	PIEZA	CANTIDAD
1	U_flex	1
2	Soporte_motor	2
3	Base_soporte_motor	1
4	Balero_FAG 6000	4
5	Tapa_Balero_FAG	2
6	Contrapeso_lateral	2
7	Pololu-Bracket	1
8	Pololu-37D-codificador	1
9	Polea_T10_motor	1
10	Cubierta_codificador	1
11	Caja_balero	1
12	Extensión_eje_motor	1
13	Polea2X_T10	1

2.3 Estructura que emula el movimiento de Inclinación Bilateral.

La estructura que realiza el movimiento de inclinación bilateral del cuello cuenta con una plataforma cuadrada, la cual tiene dos ejes en los extremos para fijarse al eslabón anterior y en uno de ellos es donde se conecta la polea dentada para la transmisión de potencia, además en esta pieza se fija el actuador que gobierna el movimiento de rotación, como se muestra en la figura 2.11.

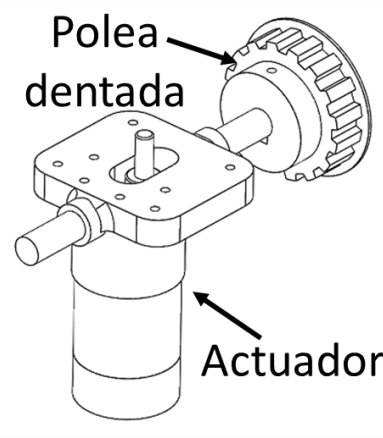


Figura 2.11: Plataforma donde se fija el actuador del movimiento de rotación y la polea dentada para la transmisión de movimiento.

Este eslabón estará conectado directamente con la cabeza del robot humanoide, por tal motivo se diseñó el acoplamiento que contiene un balero de carga radial FAG-6000 y un balero de carga axial modelo SKF 51105-107Z, se muestra en la figura 2.12(b) una vista de sección, el balero de carga radial necesita una tapa para fijarlo y el rodamiento de carga axial está conformado por dos piezas por lo tanto se fija a presión el anillo inferior en el acoplamiento, como se muestra en la figura 2.12(a), los elementos rodantes junto con el anillo superior del balero de carga axial quedan fijos al momento de acoplar la base de la cabeza humanoide.

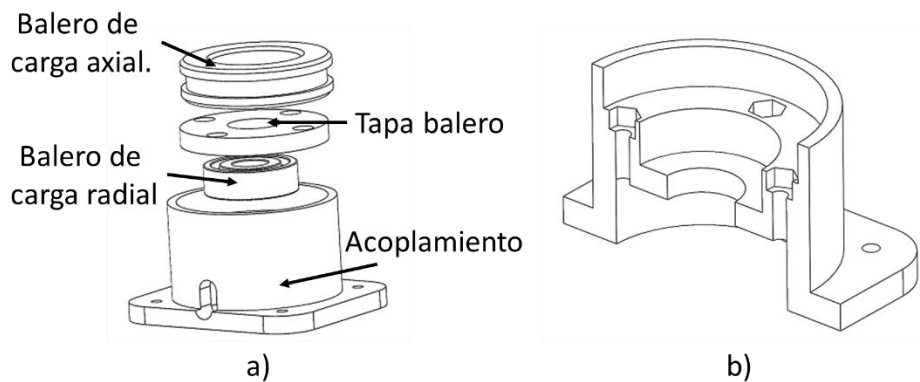


Figura 2.12: a) Acoplamiento para la base de la cabeza humanoide y b) Vista de sección del acoplamiento

Por último, se añadieron tres contrapesos de acero 1018, los cuales se mantienen a una distancia de la plataforma cuadrada y se fijan por medio de tornillos. En la figura 2.13(a) se muestra el ensamble del eslabón que emula el movimiento de inclinación bilateral, así mismo en la figura 2.13(b) se observan los elementos que componen al eslabón de inclinación bilateral.

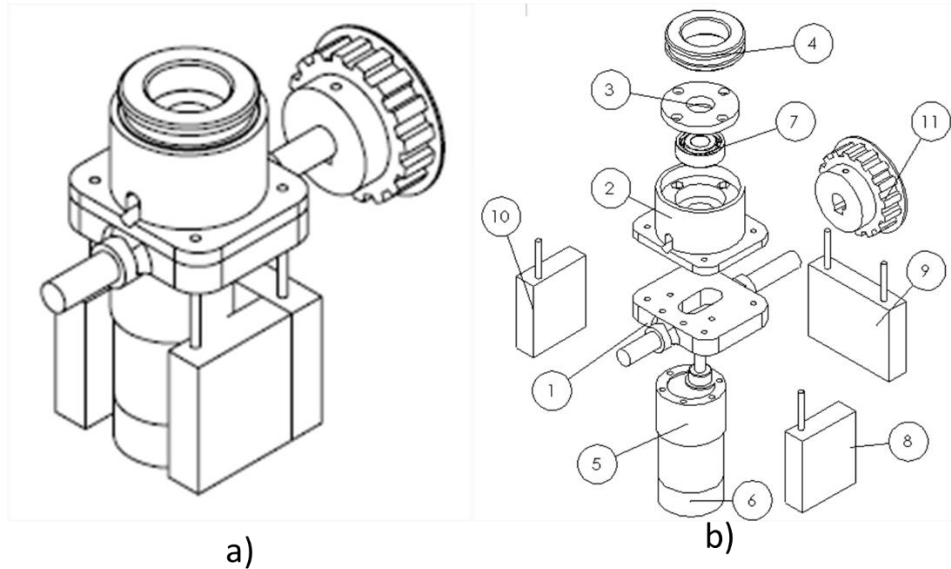


Figura 2.13: a) Ensamble del eslabón que realiza el movimiento de inclinación bilateral y b) Componentes que conforman el eslabón del movimiento de inclinación bilateral.

En la tabla 2.3 se muestra la descripción de los elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de inclinación bilateral mostrados en la figura 2.13(b).

Tabla 2.3: Elementos que conforman el eslabón que realiza el movimiento de inclinación bilateral.

N.º DE ELEMENTO	PIEZA	CANTIDAD
1	Soporte_Rotacion	1
2	Cople_eje_cabeza	1
3	Tapa_balero	1
4	Balero_axial_SKF 51105	1
5	Pololu-37D-codificador	1
6	Cubierta_codificador	1
7	Balero_FAG 6000	1
8	Contrapeso_lateral_1	1
9	Contrapeso_lateral_2	1
10	Contrapeso_frontal	1
11	Polea2X_T10	1

2.4 Estructura que realiza el movimiento de Rotación.

La estructura que realiza el movimiento de rotación consta de una base donde se empotra la cabeza del robot humanoide, el actuador que gobierna este movimiento se contempló en el eslabón anterior, en este caso solo se toma como parte del eslabón la cabeza humanoide y la base mencionada como se muestra en la figura 2.14(a) y en la figura 2.14(b) se aprecia la base diseñada con una ranura donde se acopla el rodamiento de carga axial contenido en el eslabón anterior.

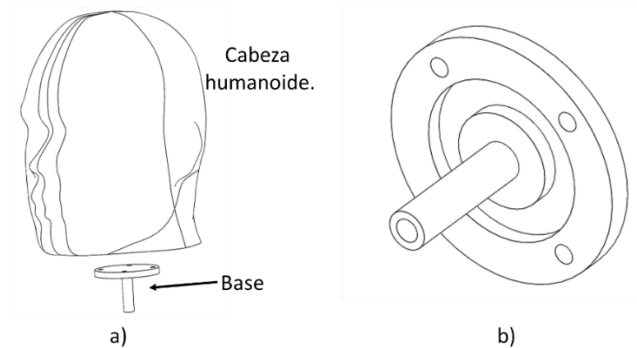


Figura 2.14: Eslabón que realiza el movimiento de rotación.

2.5 Mecanismo esférico.

El mecanismo esférico que se presenta en este trabajo debe contar con medidas adecuadas para su colocación en el robot humanoide, las cuales se mencionaron al inicio del capítulo; por lo tanto, el diseño final se muestra en la figura 2.15 donde se aprecia la dimensión de largo del sistema con 17.05 cm, ver figura 2.15(a), las dimensiones de altura y ancho del sistema se observan en la figura 2.15(b), las cuales son de 21 cm y 13.7 cm respectivamente y por último se muestra en la figura 2.15(c) la vista dimétrica del mecanismo completo.

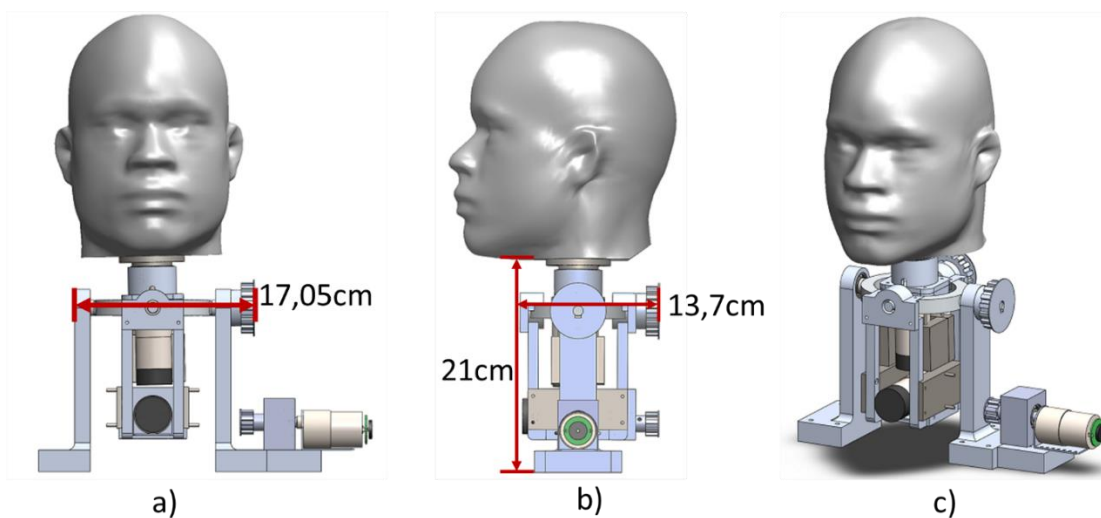


Figura 2.15: a) Dimensión del largo del mecanismo, b) Dimensiones de altura y ancho del mecanismo y c) Vista dimétrica del mecanismo esférico.

2.6 Aproximación del torque requerido.

Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, el cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. La propiedad de la fuerza para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que llamamos torque o momento de la fuerza. Se prefiere usar el nombre torque y no momento, porque este último se emplea para referirnos al momento lineal, al momento angular o al momento de inercia, que son todas magnitudes físicas diferentes para las cuales se usa el mismo término. Se define el torque (τ) de una fuerza (F) que actúa sobre algún punto del cuerpo rígido, en una posición (r) respecto de cualquier origen (O), por el que puede pasar un eje sobre el cual se produce la rotación del cuerpo rígido, al producto vectorial entre la posición r y la fuerza aplicada F , por la ecuación (2.1), el torque es una magnitud vectorial, entonces, si α es el ángulo entre r y F , su valor escalar está dado por la ecuación (2.2) tomando en cuenta la definición del producto vectorial [21].

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.1)$$

$$\tau = r \cdot F \cdot \text{Sen}(\alpha) \quad (2.2)$$

Para seleccionar los actuadores del sistema mecatrónico se realizó una aproximación del torque necesario que deberán aportar los actuadores ya que la cabeza del robot humanoide tiene un peso de 3.2 Kg, por lo tanto, en las ecuaciones (2.3 y 2.4) se obtiene la fuerza que produce por la acción de la gravedad.

$$F = \text{Peso}(\text{Kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (2.3)$$

$$F = 3.2 \text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 31.392 \text{N} \quad (2.4)$$

Los esfuerzos que tendrá el mecanismo al alcanzar los rangos máximos de movimiento dependen en gran parte de la morfología del sistema mecánico, ya que el centro de masa de la cabeza humanoide, de ahora en adelante (CMC), no es colineal con el eje de rotación del último eslabón, es decir, la cabeza del robot humanoide no es homogénea y se desconocen con exactitud las coordenadas del CMC, por lo tanto se optó por plantear parámetros como punto de partida para el desarrollo del modelo dinámico, tomándolos como variables para posteriormente poder realizar experimentos que nos permitan determinar con exactitud los valores reales, como se muestra en la figura 2.16, estos parámetros son una aproximación a los reales, puesto que para poder realizar una medición exacta se debería manipular la cabeza del robot de una forma que no sugiere la empresa que desarrolló el humanoide, ya que cuenta con hilos y un material delicado que simula la piel humana y podría dañarse.

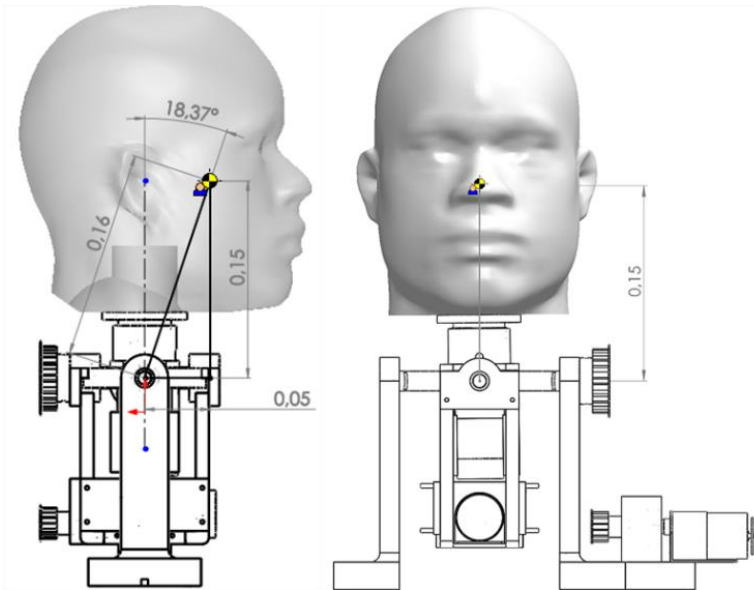


Figura 2.16: Parámetros del CMC propuestos.

2.6.1 Movimiento de Flexión.

El movimiento de flexión del cuello humano es cuando la barbilla se acerca al pecho, consta de un rango de movimiento que oscila entre 35° y 45° , sin embargo, para esta tesis se considera un movimiento máximo de 25° , debido a que el ser humano no realiza movimientos abruptos al momento de entablar una conversación y el robot humanoide se utilizará para estudiar la interacción emocional robot-humano.

Cuando el sistema realice un movimiento que alcance el valor máximo de movilidad propuesto, en este caso 25° , el CMC tendrá un ángulo de 43.37° con respecto al eje vertical de la posición inicial del mecanismo, como se aprecia en la figura 2.17, también se observa que el ángulo entre la fuerza ejercida por la acción de la gravedad y el peso de la cabeza humanoide es de 136.63° .

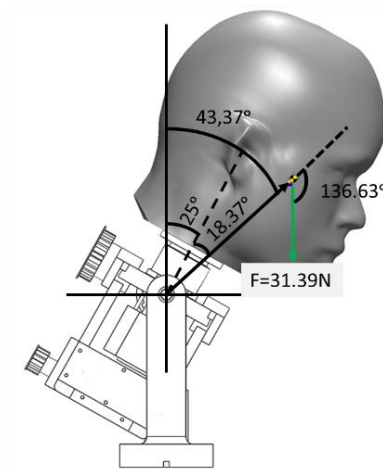


Figura 2.17: Movimiento de 25° con respecto al eje vertical.

Por tanto, para conocer el torque que genera este movimiento en su rango máximo, se sustituye en la ecuación (2.2) los valores del ángulo de aplicación de la fuerza, su magnitud escalar y el radio o distancia del CMC. La ecuación (2.5) denota el torque que necesitarán aportar los actuadores para sostener la cabeza del robot en este escenario.

$$\tau = 0.16 * 31.39 \text{ Sen}(136.63^\circ) = 3.4 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

2.6.2 Movimiento de Extensión.

El movimiento de extensión del cuello humano, al contrario del movimiento de flexión, es cuando la barbilla se aleja del pecho, este movimiento consta de un rango de 35° a 55° , no obstante se tomará como rango máximo un ángulo de 35° . Cuando el sistema alcance la posición máxima propuesta, el CMC tendrá un ángulo de 16.63° respecto del eje vertical de la posición inicial del mecanismo y la fuerza ejercida por la acción de gravedad formará un ángulo de aplicación de 163.37° como se muestra en la figura 2.18.

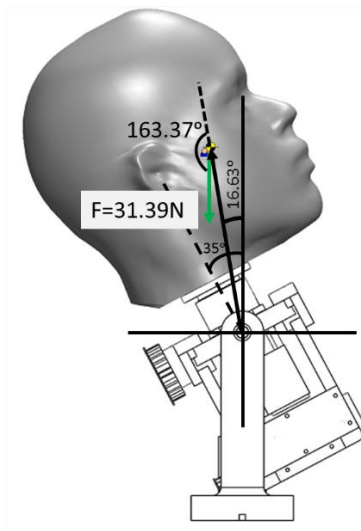


Figura 2.18: Movimiento de 35° con respecto al eje vertical.

Al sustituir en la ecuación (2.2) los valores del ángulo de aplicación de la fuerza, su magnitud escalar y el radio o distancia del CMC resulta la ecuación (2.6) que denota el torque que necesitarán aportar los actuadores para sostener la cabeza del robot para este movimiento.

$$\tau = 0.16 * 31.39 \text{ Sen}(163.37^\circ) = 1.43 \text{ Nm} \quad (2.6)$$

2.6.3 Movimiento de Inclinación Bilateral.

El movimiento de inclinación bilateral del cuello humano es cuando la oreja se acerca al hombro, presenta un rango de movilidad de 45° por lado, esto es 90° medidos desde una inclinación máxima lateral izquierda hasta la máxima inclinación derecha, aunque para los fines de este trabajo se tomará como rango máximo de movilidad un ángulo de 15° .

Cuando el sistema alcance la posición máxima propuesta para ambos lados, el CMC tendrá un ángulo de 15° respecto del eje vertical de la posición inicial del mecanismo y la fuerza ejercida por la acción de gravedad formará un ángulo de aplicación de 165° para ambos casos, inclinación máxima izquierda e inclinación máxima derecha, como se muestra en la figura 2.19.

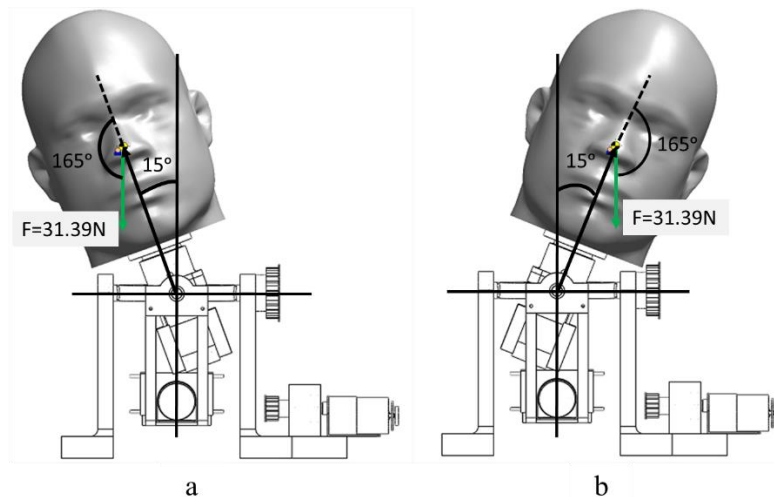


Figura 2.19: a) Movimiento inclinación derecha de 15° y b) Movimiento inclinación izquierda de 15°

Por lo tanto, para calcular el torque generado por este movimiento en ambos casos, se sustituye en la ecuación (2.2) los parámetros mencionados como lo denota la ecuación (2.7), este torque es el necesario para soportar el peso de la cabeza humanoide en el rango máximo de movimiento propuesto.

$$\tau = 0.16 * 31.39 \text{Sen}(165^\circ) = 1.29 \text{Nm} \quad (2.7)$$

2.6.4 Movimiento de Rotación.

Para el movimiento de rotación se tiene un rango máximo entre 60° y 80° , se propone para esta tesis el valor máximo de 60° . La fuerza que ejerce el peso de la cabeza humanoide por la acción de la gravedad no tiene una componente que afecte total o parcialmente al movimiento de rotación, ya que las direcciones, tanto de la fuerza ejercida como del movimiento son perpendiculares como se muestra en la figura 2.20.

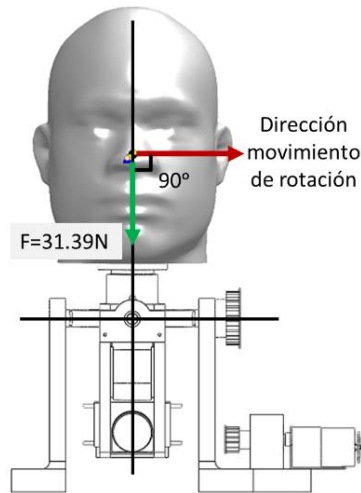


Figura 2.20: Dirección de la fuerza ejercida por el peso y el movimiento de rotación.

Por definición del producto vectorial de torque la resultante es cero, ver ecuación (2.8), por tanto, para este escenario el CMC no genera torque, las componentes o fuerzas que interactúan son puramente dinámicas como lo es el momento de inercia y en este análisis se aborda de forma estática tomando la premisa de que el sistema está en reposo.

$$\tau = 0.16 * 31.39 \text{Sen}(90^\circ) = 0 \text{Nm} \quad (2.8)$$

2.7 Reducción de la distancia del centro de masa al punto de rotación.

Como se mencionó anteriormente, la característica de tener un punto de rotación en común para cualquier movimiento de los robots esféricos es de gran importancia para este diseño, ya que la distancia del origen de referencia al centro de masa llamado radio es de naturaleza constante, es decir, cualquier movimiento que realice el sistema se encontrará definido en la superficie de una semiesfera virtual. La definición de torque o momento de torsión denota que el radio o distancia al punto de aplicación de la fuerza amplifica el efecto de esta, por lo tanto, se consideró dotar al sistema con contrapesos estratégicamente posicionados para que contrarresten el torque generado por el CMC, ya que el momento de torsión obedece al principio de superposición, los contrapesos colocados generan un torque en sentido opuesto en cualquier movimiento que realice el CMC, reduciendo la distancia del centro de masa del sistema en sí. En la figura 2.21 se observan de color verde los centros de masa de los eslabones, el CMC de color amarillo y el centro de masa del sistema completo de color blanco.

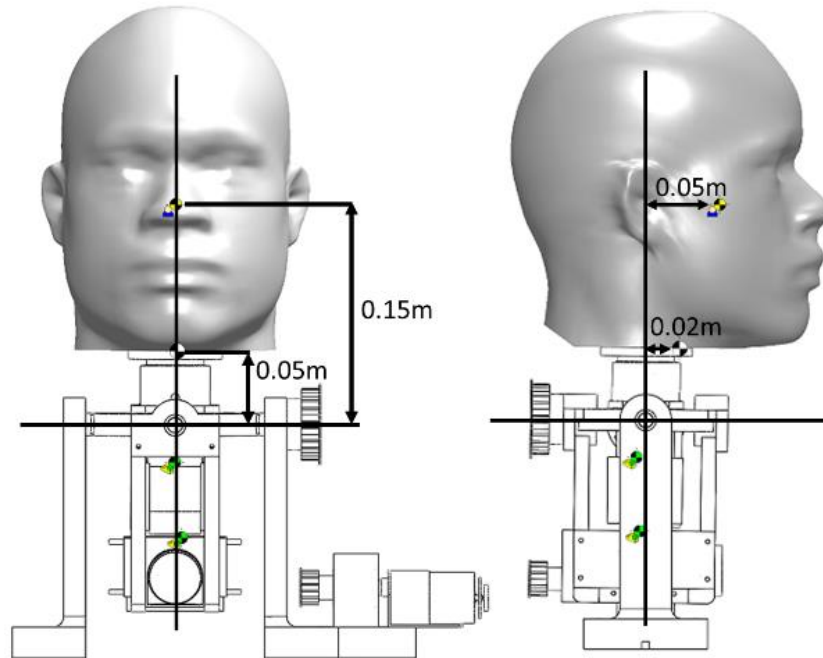


Figura 2.21: Distancia del centro de masa total del sistema.

2.8 Conclusiones.

Este capítulo describe las características de un robot esférico, en las cuales está basado el diseño mecánico del sistema, se consideró el espacio disponible para empotrar en el robot humanoide en la estructura que emula los movimientos del cuello humano, así como también se logró diseñar una estructura rígida para soportar el peso de la cabeza humanoide.

Una de las conclusiones destacadas de este capítulo es que el mecanismo esférico diseñado muestra la ventaja de soportar más carga como los robots paralelos, pero con la característica que pertenece a los robots de arquitectura serial los cuales tienen la dinámica desacoplada en cada actuador, es decir, cada grado de libertad es independiente y no se muestra restringido por los demás. Por último, se presentó un análisis importante sobre los centros de masa, ya que al dotar el sistema con contrapesos, se modificó la distancia del centro de masa del sistema en concreto provocando una notable reducción del torque generado por el peso de la carga que mueve la estructura diseñada, cabe señalar que el análisis se abordó de forma estática, brindando una aproximación sobre la fuerza necesaria para soportar la cabeza del robot humanoide en los rangos máximos de movimiento, ya que se espera que el modelo dinámico nos permita conocer el torque para seleccionar los actuadores del sistema.

Capítulo 3: Modelo Dinámico.

En el presente capítulo se deduce el modelo dinámico de un robot esférico de 3 grados de libertad (GDL). En primer lugar se obtiene la cinemática directa proponiendo ejes coordenados de referencia de cada articulación que permitan obtener los parámetros planteados en la metodología Denavit-Hartenberg, al utilizar las transformaciones homogéneas de traslación y rotación se conocerá la posición en el espacio del efector final en todo momento, como paso siguiente, se emplean las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange, para obtener el modelo dinámico. Por último se presenta un estudio de movimiento en el software SolidWorks, definiendo los mismos sistemas coordenados ocupados en el cálculo del modelo para obtener una aproximación de los parámetros físicos del robot tales como masa, momentos de inercia y longitud de los centros de masa de cada eslabón, para realizar una comparación del modelo dinámico.

El modelo dinámico de un robot manipulador permite explicar todos los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica, tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas y de Coriolis, par gravitacional y fricción. Un método estándar para obtener el modelo dinámico de un robot está basado en las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange. La ecuación (3.1) expresa el modelo dinámico de un robot manipulador en su forma compacta y con notación utilizada en el área de robótica.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (3.1)$$

3.1 Cinemática Directa.

Es la parte de la física que estudia el movimiento de sistemas mecánicos, sin tomar en cuenta las fuerzas que lo originan, por lo tanto, no involucra ecuaciones diferenciales como es el caso de los modelos dinámicos. Al estudio de la cinemática aplicado a los sistemas mecánicos que forman robots manipuladores se le denomina cinemática directa; se refiere al estudio analítico del movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$ relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares o generalizadas $q \in \mathbb{R}^n$ con las coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ [22].

El método de Denavit-Hartenberg es una herramienta ampliamente conocida en el área de ingeniería, ya que ofrece un procedimiento sencillo para obtener el modelo cinemático directo cuya estructura queda en términos de la transformaciones homogéneas.

Los cuatro parámetros DH se definen como sigue:

- d_i/β_i (Desplazamiento de la articulación). Es la posición relativa de los eslabones $i-1$ e i . Esto se mide como la distancia entre X_i y X_{i+1} a lo largo de Z_i .
- q_i (Ángulo de articulación). Es el ángulo relativo entre los eslabones $i-1$ e i . Esto se mide como el ángulo entre X_i y X_{i+1} alrededor de Z_i . La rotación es positiva cuando se realiza en el sentido contrario a las manecillas del reloj.
- l_i (Longitud del i -ésimo eslabón). La longitud entre O_i y O_{i+1} . Esto se mide como la distancia entre las perpendiculares comunes a los ejes Z_i y Z_{i+1} a lo largo de X_{i+1} .
- α_i (Ángulo de torsión). El ángulo entre las proyecciones ortogonales de los ejes de articulación Z_i y Z_{i+1} sobre un plano perpendicular a la perpendicular común. Esto se mide como el ángulo entre los ejes Z_i y Z_{i+1} alrededor del eje X_{i+1} para que se tome como positivo cuando la rotación se realiza en el sentido contrario a las manecillas del reloj.
-

Para posicionar los sistemas de coordenadas del mecanismo se utilizó la metodología propuesta por Denavit-Hartenberg [22], cabe resaltar que el CMC se toma como efector final y todos los ejes de rotación de las articulaciones se intersectan en un punto medio del mecanismo, se toma este como el origen del sistema de referencia fijo sobre el cual se medirá la posición en el espacio de efector final, como se observa en la figura 3.1.

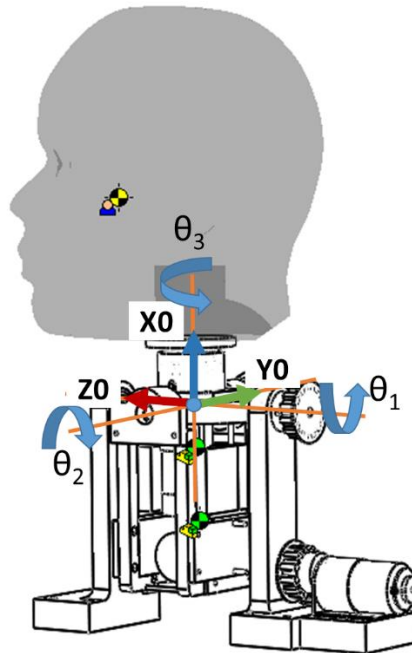


Figura 3.1: Sistema de referencia fijo $\sum O(x_0, y_0, z_0)$

Se muestra en la figura 3.2 los sistemas de coordenadas utilizados para definir los parámetros D-H.

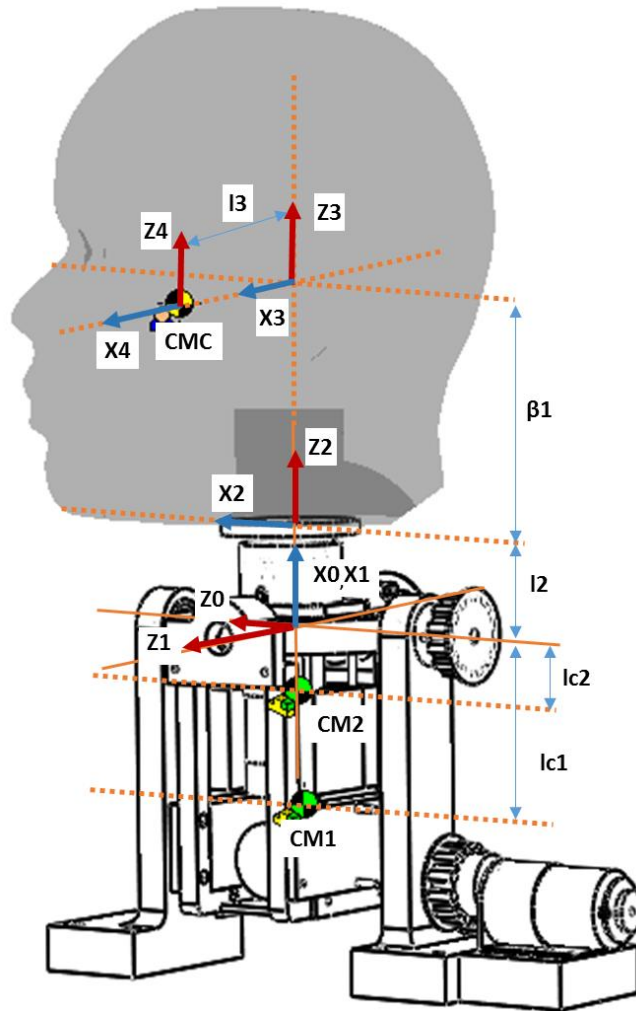


Figura 3.2: Sistemas coordenados de referencia.

Se muestran en la tabla 6 los parámetros D-H del mecanismo esférico.

Tabla 3.1: Parámetros Denavit-Hartenberg para encontrar la cinemática directa.

Eslabón	l_i	α_i	d_i/β_i	q_i
1	l_1	90°	0	q_1
2	l_2	0	0	q_2
2a	0	0	0	90°
2b	0	90°	0	0
3	0	0	β_1	q_3
3a	0	0	0	90°
4	l_3	0	0	0

El mecanismo solo cuenta con tres eslabones, pero es necesario realizar rotaciones auxiliares de los sistemas de referencia para poder expresar la longitud de los centros de masa de los eslabones sobre el eje x de cada sistema coordinado, de no ser así, la dinámica del mecanismo no tendría contemplado los efectos inerciales y las fuerzas que ejercen sobre el robot.

La representación de la cinemática es a través del producto de cuatro transformaciones básicas que definen cada eslabón, estas se describen en la ecuación (3.2).

$$\mathbf{H}_{n-1}^n = HR_z(q_i) HT_z(d_i; \beta_i) HT_x(l_i) HR_x(\alpha_i) \quad (3.2)$$

La cinemática directa es la forma general de transformaciones homogéneas que concatena los sistemas de referencia cartesianos asociados a los eslabones del robot, todos relativos al sistema de referencia fijo $\sum 0(x_0, y_0, z_0)$. La transformación homogénea total queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{H}_0^n = \mathbf{H}_0^1 \mathbf{H}_1^2 \mathbf{H}_2^3 \mathbf{H}_3^4 \mathbf{H}_4^5 \mathbf{H}_5^6 \quad (3.3)$$

Por tanto la cinemática directa que describe la posición de cada eslabón del robot es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) \\ l_1 \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q_1)(l_1 + \beta_1 \cos(q_2) + l_2 \cos(q_2)) \\ \sin(q_1)(l_1 + \beta_1 \cos(q_2) + l_2 \cos(q_2)) \\ \sin(q_2)(\beta_1 + l_2) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 (Cq_3 Sq_1 + Cq_1 Sq_2 Sq_3) + \beta_1 Cq_1 Cq_2 + \beta_2 Cq_1 Cq_2 \\ \beta_1 Cq_2 Sq_1 - l_3 (Cq_1 Cq_3 - Sq_1 Sq_2 Sq_3) + \beta_2 Cq_2 Sq_1 \\ \beta_1 Sq_2 + \beta_2 Sq_2 - l_3 Cq_2 Sq_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones (12-14) describen la cinemática directa de los eslabones que emulan los movimientos del cuello humano: flexión y extensión (eslabón 1), inclinación bilateral (eslabón 2) y rotación bilateral (eslabón 3), respectivamente.

3.2 Dinámica.

Se sustituye en la cinemática directa las longitudes del centro de masa (CM) de cada uno de los eslabones, como se ha mencionado en la cinemática se desprecian estos valores, pero se plantea la metodología D-H de tal forma que en la dinámica se contemplen los fenómenos físicos que proporcionan los contrapesos. Haciendo referencia al origen del sistema, los centros de masa de los eslabones que generan el movimiento de flexión-extensión (CM1) e inclinación bilateral (CM2), se encuentran en la zona negativa y el CMC se encuentra en la zona positiva del eje x, reduciendo la distancia del centro de masa del sistema general, como se visualiza en figura 3.3.

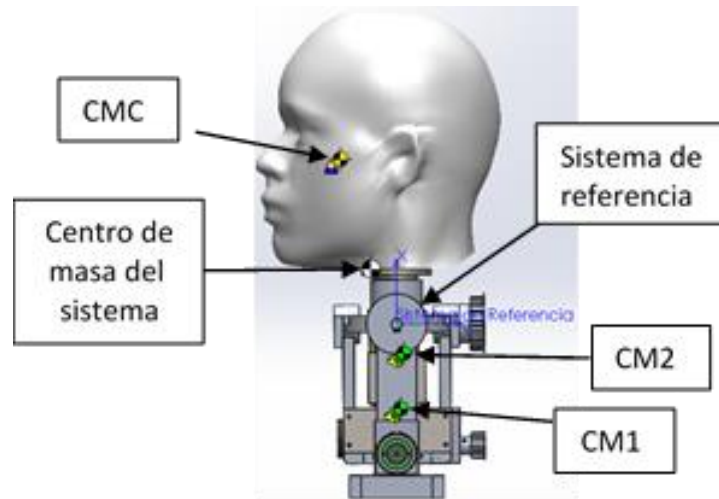


Figura 3.3: Centro de masa del mecanismo esférico en relación con el sistema de coordenadas de referencia.

La ecuación (3.7) hace referencia a la cinemática directa del centro de masa de cada eslabón, para el i -ésimo eslabón se toman en cuenta las longitudes anteriores l_{i-1} y ángulos q_i y q_{i-1} [8].

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = f_R(l_i, l_{i-1}, l_{ci}, q_{i-1}, q_i) \quad (3.7)$$

A partir de la ecuación (3.8) se deduce la velocidad lineal del centro de masa de cada eslabón:

$$\mathbf{v}_i = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

La rapidez al cuadrado se calcula a partir de la ecuación (3.9).

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2 \quad (3.9)$$

Por tanto se tiene la rapidez al cuadrado para cada eslabón:

$$\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 = lc1^2 \dot{q}_1^2 \cos(q1)^2 + lc1^2 \dot{q}_1^2 \sin(q1)^2 \quad (3.10)$$

$$\mathbf{v}_2^T \mathbf{v}_2 = (lc2\dot{q}_1\cos(q2)\sin(q1) + lc2\dot{q}_2\cos(q1)\sin(q2))^2 + (lc2\dot{q}_2\sin(q1)\sin(q2) - lc2\dot{q}_1\cos(q1)\cos(q2))^2 + lc2^2 \dot{q}_2^2 \cos(q2)^2 \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & (\dot{q}_2(b1\cos(q2) + l3\sin(q2)\sin(q3)) - l3\dot{q}_3\cos(q2)\cos(q3))^2 \\ & + (\dot{q}_2(b1\cos(q1)\sin(q2) - l3\cos(q1)\cos(q2)\sin(q3)) - \dot{q}_1(l3(\cos(q1)\cos(q3) \\ & - \sin(q1)\sin(q2)\sin(q3)) - b1\cos(q2)\sin(q1)) + l3\dot{q}_3(\sin(q1)\sin(q3) \\ & - \cos(q1)\cos(q3)\sin(q2)))^2 + (\dot{q}_1(l3(\cos(q3)\sin(q1) + \cos(q1)\sin(q2)\sin(q3)) \\ & + b1\cos(q1)\cos(q2)) - \dot{q}_2(b1\sin(q1)\sin(q2) - l3\cos(q2)\sin(q1)\sin(q3)) \\ & + l3\dot{q}_3(\cos(q1)\sin(q3) + \cos(q3)\sin(q1)\sin(q2)))^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Posteriormente se obtiene la energía cinética $K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ a partir de la ecuación (3.13), donde I_i es el momento de inercia y m_i la masa de cada eslabón.

$$K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \sum_1^n \left[\frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} I_i \dot{q}_i^2 \right] \quad (3.13)$$

Se tiene por tanto la energía cinética del sistema:

$$\begin{aligned} & (m3((\dot{q}_2(b1\cos(q2) + l3\sin(q2)\sin(q3)) - l3\dot{q}_3\cos(q2)\cos(q3))^2 \\ & - \dot{q}_2(b1\sin(q1)\sin(q2) + (\dot{q}_2(b1\cos(q1)\sin(q2) - l3\cos(q1)\cos(q2)\sin(q3)) \\ & - \dot{q}_1(l3(\cos(q1)\cos(q3) - \sin(q1)\sin(q2)\sin(q3)) - b1\cos(q2)\sin(q1)) \\ & + l3\dot{q}_3(\sin(q1)\sin(q3) - \cos(q1)\cos(q3)\sin(q2)))^2 + (I1\dot{q}_1^2) / 2 \\ & + (\dot{q}_1(l3(\cos(q3)\sin(q1) + \cos(q1)\sin(q2)\sin(q3)) + b1\cos(q1)\cos(q2)) \\ & - l3\cos(q2)\sin(q1)\sin(q3)) + l3\dot{q}_3(\cos(q1)\sin(q3) \\ & + \cos(q3)\sin(q1)\sin(q2)))^2) / 2 + (I2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2) / 2 \\ & + (m1(lc1^2 \dot{q}_1^2 \cos(q1)^2 + lc1^2 \dot{q}_1^2 \sin(q1)^2)) / 2 + (m2((lc2\dot{q}_1\cos(q2)\sin(q1) \\ & + lc2\dot{q}_2\cos(q1)\sin(q2))^2 + (lc2\dot{q}_2\sin(q1)\sin(q2) - lc2\dot{q}_1\cos(q1)\cos(q2))^2 \\ & + lc2^2 \dot{q}_2^2 \cos(q2)^2)) / 2 + (I3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2) / 2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

La energía potencial $U(\mathbf{q})$ no tiene una forma específica, depende de la geometría del robot en general, por tanto se considera la cinemática directa del centro de masa de cada eslabón y se definen los puntos para los cuales la energía potencial $U(\mathbf{q})=0$ para cada uno, en la figura 3.4 se denota con una línea roja para cada caso.

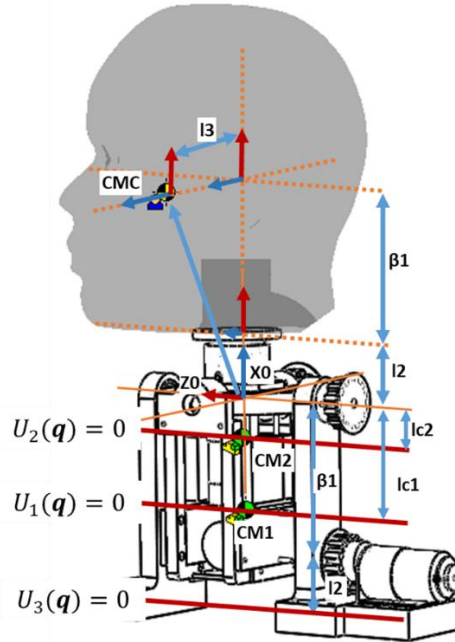


Figura 3.4: Referencia de energía potencial cero para cada eslabón.

Las ecuaciones (23-25) expresan la función de la energía potencial para los centros de masa de cada eslabón, donde se ocupa la cinemática directa de los centros de masa.

$$U_1(\mathbf{q}) = m_1 g (l_{c1} - l_{c1} \cos(q_1)) \quad (3.15)$$

$$U_2(\mathbf{q}) = m_2 g (l_{c2} - l_{c2} \cos(q_1) \cos(q_2)) \quad (3.16)$$

$$U_3(\mathbf{q}) = m_3 g \left(\begin{array}{l} \beta_1 + l_2 + l_3 (Cq_3 S q_1 + Cq_1 S q_2 S q_3) + \\ \beta_1 C q_1 C q_2 + \beta_2 C q_1 C q_2 \end{array} \right) \quad (3.17)$$

Utilizando el principio de superposición la ecuación (3.18) hace referencia a la energía potencial total del sistema, la cual está expresada por la ecuación (3.19).

$$U(\mathbf{q}) = U_1(\mathbf{q}) + U_2(\mathbf{q}) + U_3(\mathbf{q}) \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned}
 U(\mathbf{q}) = & gm2(lc2 - lc2\cos(q1)\cos(q2)) + gm1(lc1 - lc1\cos(q1)) \\
 & + gm3(b1 + l3(\cos(q3)\sin(q1) + \cos(q1)\sin(q2)\sin(q3))) \\
 & + l1\cos(q1) + b1\cos(q1)\cos(q2) + l2\cos(q1)\cos(q2)
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

A partir de las ecuaciones (3.14 y 3.19) se construye el modelo de energía (lagrangiano) y se encuentra definido por la ecuación (3.20)

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}) \quad (3.20)$$

Por tanto la ecuación (3.21) expresa el modelo de energía para el robot esférico.

$$\begin{aligned}
 & (m3((\dot{q}2(b1\cos(q2) + l3\sin(q2)\sin(q3)) - l3\dot{q}3\cos(q2)\cos(q3)))^2 \\
 & + (\dot{q}2(b1\cos(q1)\sin(q2) - l3\cos(q1)\cos(q2)\sin(q3)) \\
 & - \dot{q}1(l3(\cos(q1)\cos(q3) - \sin(q1)\sin(q2)\sin(q3)) - b1\cos(q2)\sin(q1)) \\
 & + l3\dot{q}3(\sin(q1)\sin(q3) - \cos(q1)\cos(q3)\sin(q2)))^2 + (\dot{q}1(l3(\cos(q3)\sin(q1) \\
 & + \cos(q1)\sin(q2)\sin(q3)) + b1\cos(q1)\cos(q2)) - \dot{q}2(b1\sin(q1)\sin(q2) \\
 & - l3\cos(q2)\sin(q1)\sin(q3)) + l3\dot{q}3(\cos(q1)\sin(q3) \\
 \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = & + \cos(q3)\sin(q1)\sin(q2)))^2) / 2 + (I2(\dot{q}1 + \dot{q}2)^2) / 2 \\
 & + (I1\dot{q}1^2) / 2 + (m1(lc1^2\dot{q}1^2\cos(q1)^2 + lc1^2\dot{q}1^2\sin(q1)^2)) / 2 \\
 & + (m2((lc2\dot{q}1\cos(q2)\sin(q1) + lc2\dot{q}2\cos(q1)\sin(q2))^2 \\
 & + (lc2\dot{q}2\sin(q1)\sin(q2) - lc2\dot{q}1\cos(q1)\cos(q2))^2 + lc2^2\dot{q}2^2\cos(q2)^2)) / 2 \\
 & + (I3(\dot{q}1 + \dot{q}2 + \dot{q}3)^2) / 2 - gm2(lc2 - lc2\cos(q1)\cos(q2)) \\
 & - gm1(lc1 - lc1\cos(q1)) - gm3(b1 + l3(\cos(q3)\sin(q1) + \cos(q1)\sin(q2)\sin(q3))) \\
 & + l1\cos(q1) + b1\cos(q1)\cos(q2) + l2\cos(q1)\cos(q2)
 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Aplicando las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange, ver ecuación (3.22), para cada una de las coordenadas angulares obtenemos el τ de cada articulación, denotadas por las ecuaciones (3.23-3.25).

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right] - \frac{\partial}{\partial q_i} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
 & I1\ddot{q}_1 + I2\ddot{q}_1 + I2\ddot{q}_2 + I3\ddot{q}_1 + I3\ddot{q}_2 + I3\ddot{q}_3 + I3^2 m3\ddot{q}_1 \\
 & + lc1^2 m1\ddot{q}_1 + b1^2 m3\ddot{q}_1 \cos(q2)^2 - I3^2 m3\ddot{q}_1 \cos(q2)^2 \\
 & + lc2^2 m2\ddot{q}_1 \cos(q2)^2 - gl1m3 \sin(q1) + glc1m1 \sin(q1) \\
 & + I3^2 m3\ddot{q}_3 \sin(q2) + gl3m3 \cos(q1) \cos(q3) - b1gm3 \cos(q2) \sin(q1) \\
 & - gl2m3 \cos(q2) \sin(q1) + glc2m2 \cos(q2) \sin(q1) + I3^2 m3\ddot{q}_1 \cos(q2)^2 \cos(q3)^2 \\
 & - I3^2 m3\ddot{q}_2^2 \cos(q3) \sin(q2) \sin(q3) - b1I3m3\ddot{q}_2^2 \cos(q2) \cos(q3) \\
 \tau_1 = & + b1I3m3\ddot{q}_3^2 \cos(q2) \cos(q3) - 2b1^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) \sin(q2) \\
 & + 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) \sin(q2) - 2lc2^2 m2\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) \sin(q2) \\
 & - gl3m3 \sin(q1) \sin(q2) \sin(q3) - 2b1I3m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \sin(q3) \\
 & + 2I3^2 m3\ddot{q}_2 \dot{q}_3 \cos(q2) \cos(q3)^2 + I3^2 m3\ddot{q}_2 \cos(q2) \cos(q3) \sin(q3) \\
 & - b1I3m3\ddot{q}_2 \cos(q3) \sin(q2) + b1I3m3\ddot{q}_3 \cos(q2) \sin(q3) \\
 & - 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) \cos(q3)^2 \sin(q2) - 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_3 \cos(q2)^2 \cos(q3) \sin(q3) \\
 & + 4b1I3m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2)^2 \sin(q3) + 2b1I3m3\ddot{q}_1 \cos(q2) \sin(q2) \sin(q3) \\
 & + 2b1I3m3\ddot{q}_1 \dot{q}_3 \cos(q2) \cos(q3) \sin(q2) \tag{3.23}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I2\ddot{q}_1 + I2\ddot{q}_2 + I3\ddot{q}_1 + I3\ddot{q}_2 + I3\ddot{q}_3 + I3^2 m3\ddot{q}_2 + lc2^2 m2\ddot{q}_2 \\
 & + b1^2 m3\ddot{q}_2 - I3^2 m3\ddot{q}_2 \cos(q3)^2 + b1^2 m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2) \sin(q2) \\
 & - I3^2 m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2) \sin(q2) + lc2^2 m2\ddot{q}_1^2 \cos(q2) \sin(q2) - b1gm3 \cos(q1) \sin(q2) \\
 & - 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_3 \cos(q2) + b1I3m3\ddot{q}_1^2 \sin(q3) + b1I3m3\ddot{q}_3^2 \sin(q3) \\
 \tau_2 = & - gl2m3 \cos(q1) \sin(q2) + glc2m2 \cos(q1) \sin(q2) - b1I3m3\ddot{q}_3 \cos(q3) \tag{3.24} \\
 & + gl3m3 \cos(q1) \cos(q2) \sin(q3) + 2I3^2 m3\ddot{q}_2 \dot{q}_3 \cos(q3) \sin(q3) \\
 & + I3^2 m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2) \cos(q3)^2 \sin(q2) + 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_3 \cos(q2) \cos(q3)^2 \\
 & - 2b1I3m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2)^2 \sin(q3) + I3^2 m3\ddot{q}_1 \cos(q2) \cos(q3) \sin(q3) \\
 & - b1I3m3\ddot{q}_1 \cos(q3) \sin(q2) + 2b1I3m3\ddot{q}_1 \dot{q}_3 \sin(q2) \sin(q3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I3\ddot{q}_1 + I3\ddot{q}_2 + I3\ddot{q}_3 + I3^2 m3\ddot{q}_3 + I3^2 m3\ddot{q}_1 \sin(q2) \\
 & - I3^2 m3\ddot{q}_2^2 \cos(q3) \sin(q3) + 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) - gl3m3 \sin(q1) \sin(q3) \\
 \tau_3 = & - b1I3m3\ddot{q}_2 \cos(q3) + gl3m3 \cos(q1) \cos(q3) \sin(q2) \tag{3.25} \\
 & + I3^2 m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2)^2 \cos(q3) \sin(q3) - 2I3^2 m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \cos(q2) \cos(q3)^2 \\
 & + b1I3m3\ddot{q}_1 \cos(q2) \sin(q3) - 2b1I3m3\ddot{q}_1 \dot{q}_2 \sin(q2) \sin(q3) \\
 & - b1I3m3\ddot{q}_1^2 \cos(q2) \cos(q3) \sin(q2)
 \end{aligned}$$

3.3 Simulación del modelo dinámico y estudio de movimiento en SolidWorks.

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema [23].

Para tener una referencia de la exactitud del modelo dinámico calculado en la sección anterior, se realizó una simulación en el software Matlab, en la cual se aborda el problema de control de posición ocupando un controlador ampliamente estudiado en la literatura, por otra parte, el mecanismo esférico modelado se diseñó en el software SolidWorks, lo cual nos es de gran ayuda ya que cuenta con herramientas de análisis y estudios de movimiento que permiten calcular fenómenos físicos en la estructura tales como el torque o momento de torsión, y así, comparar los resultados obtenidos por ambas pruebas.

El problema de control de posición o regulación radica en que el efector final del robot alcance una posición deseada desde cualquier punto inicial con la ayuda de una ley de control que proporcione los τ aplicados a las articulaciones o servomotores del robot, como lo muestra la ecuación (3.26)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Un algoritmo de control de posición o regulación bien documentado es la estructura tangente hiperbólica, la cual se expresa en la ecuación (3.27), por tal motivo en este apartado se utiliza para realizar una simulación del modelo dinámico anteriormente calculado. La principal característica del controlador es generar un atractor en la ecuación en lazo cerrado formada por el modelo dinámico del robot manipulador y la estructura matemática del algoritmo de control, ver ecuación (3.28).

$$\tau = K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) + g(q) \quad (3.27)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) - C(q, \dot{q}) \dot{q}] \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.3.1 Parámetros Físicos del Robot.

Para la simulación de un sistema se debe de contar con las características físicas del mismo tales como longitudes, peso, momentos de inercia, etc., esto es un problema cuando el robot no se ha construido o cuando es imposible medir dichos parámetros, por lo tanto se recurren a herramientas de diseño para obtener una aproximación de estos.

Con la ayuda del software SolidWorks se obtienen los parámetros físicos del robot, esto contemplando que la estructura mecánica se fabricó de aluminio 6063, el material de los contrapesos es acero 1018.

El programa de diseño proporciona el tensor de inercia de cada eslabón con respecto a un sistema de referencia, con esto podemos deducir el momento de inercia con respecto del eje de giro el cual es el eje Z, se presentan los parámetros en la tabla 7.

Tabla 3.2: Parámetros físicos del robot esférico

Eslabón	Masa (kg)	Momento de Inercia (Kg*m ²)	Distancia al CM (Metros)
1 (Movimiento de Flexo-extensión)	1.6013	0.0150	0.0831
2 (Movimiento de Inclinación Bilateral)	1.1613	0.002384	0.030
3 (Movimiento de Rotación)	3.3356	0.00774	0.050

Se realiza una simulación en Matlab con la ayuda de la función Ode45, la cual resuelve la ecuación (3.28), con los parámetros mostrados en la tabla 5 se programa una duración de 3 segundos, condiciones iniciales 0 y un tiempo de muestreo de 1.8 milisegundos, se consideran estas características de simulación para comparar los resultados obtenidos con el estudio de movimiento que se realiza en SolidWorks. La simulación se genera con ganancias proporcional (Kp) y derivativa (Kv) expresadas en las ecuaciones (3.29 y 3.30) respectivamente.

$$Kp = \begin{bmatrix} 0.48 & 0 & 0 \\ 0 & 0.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0.48 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$Kv = \begin{bmatrix} 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

La ecuación (3.31) muestra el vector de posición deseada para la simulación.

$$\mathbf{q}_d = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20^\circ \\ -10^\circ \\ -10^\circ \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Al generar los datos de la simulación se guarda la variable posición en un archivo con extensión (.csv) para posteriormente exportarlos al estudio de movimiento. SolidWorks brinda las herramientas de análisis de mecanismos, una de estas se conoce como “SolidWorks Motion”, la cual toma en consideración todos los parámetros físicos y la fuerza de gravedad, ver la figura 3.5.



Figura 3.5: Herramienta de análisis de mecanismos (SolidWork).

En el análisis de mecanismos se pueden asignar motores para brindar movimiento al sistema, se observa en la figura 3.6 encerrados en un cuadrado, así mismo, el programa contempla la acción de la fuerza de gravedad e indica la dirección de la misma, esto se ha encerrado en un ovalo rojo.

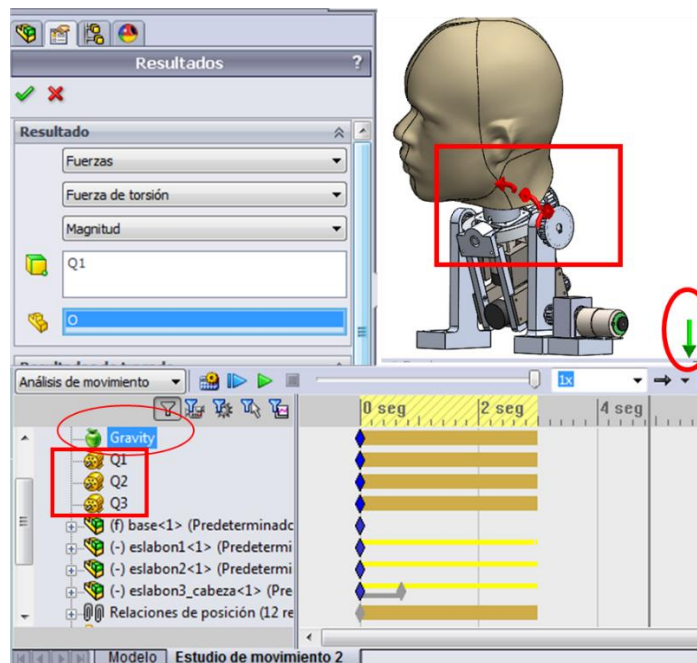


Figura 3.6: Asignación de motores y dirección de la fuerza de gravedad para el análisis de movimiento.

Anteriormente se menciona que el periodo de muestreo es 1.8 milisegundos, ya que el software maneja el mismo parámetro, las posiciones obtenidas de cada actuador en el apartado anterior se asignan a los motores que moverán el mecanismo, así mismo, se muestra en la parte superior izquierda de la figura 3.7 los datos de posición articular exportados a SolidWorks, en la parte superior derecha de la misma figura se observa la velocidad calculada por SolidWorks a partir de la posición, y en la parte inferior se visualiza la aceleración

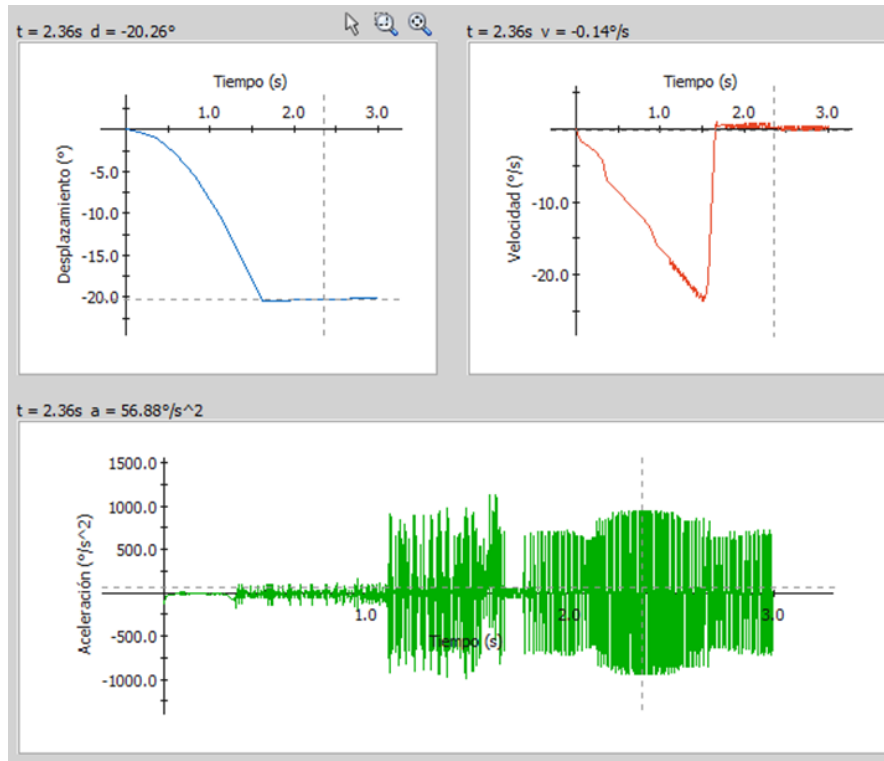


Figura 3.7: Gráficas de posición, velocidad y aceleración articular en SolidWorks.

Para calcular el torque se requirió posicionar un eje de coordenadas donde se obtendrán las mediciones, cabe mencionar que este sistema debe coincidir con el sistema de referencia fijo que se definió al inicio de la obtención del modelo dinámico, esto es, el sistema de referencia en el cual se mide la posición del efector final, lo cual se observa en la figura 3.8.

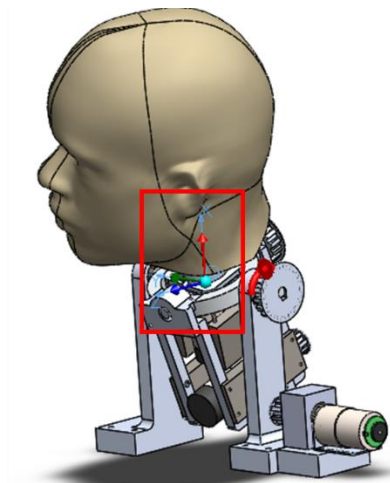


Figura 3.8: Sistema de referencia fijo.

Al realizar el estudio de movimiento para calcular el torque que requieren los actuadores, se encontró que las gráficas de cada articulación presentan ruido, esto debido a que la información de posición obtenida en Matlab se calculó con un periodo de muestreo de 0.0018

segundos y a que se desconoce la forma en que SolidWorks calcula la velocidad y aceleración, por tal motivo se exportaron los resultados del estudio de movimiento a Matlab para posteriormente ser filtradas con un filtro pasa bajas. Se muestra en la figura 3.9 los torques de cada motor, de lado izquierdo sin filtrar provenientes de SolidWorks y lado derecho filtradas en Matlab.

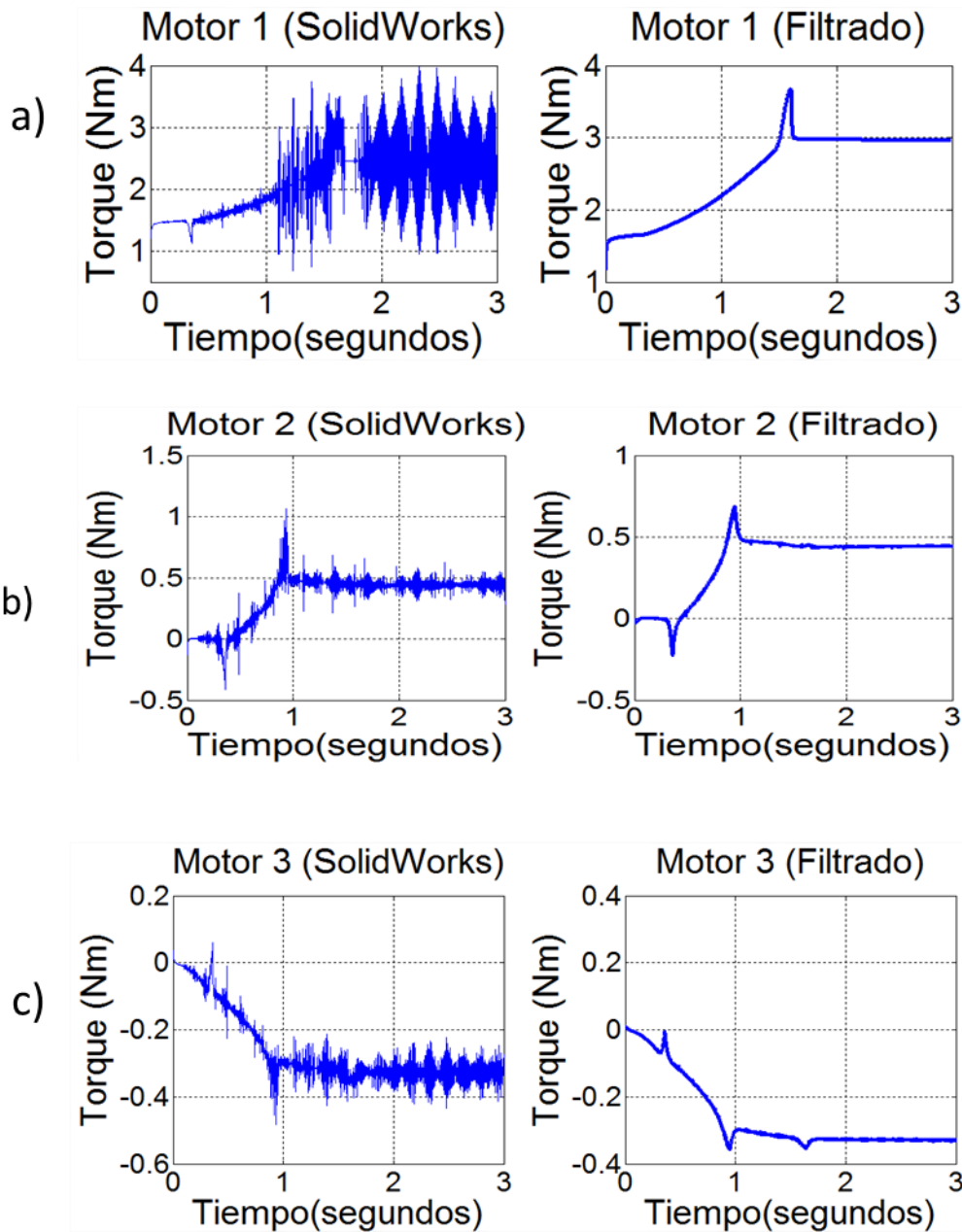


Figura 3.9: a) Torque Motor 1, b) Torque Motor 2 y c) Torque Motor 3.

3.4 Conclusiones.

En este capítulo se obtuvo la cinemática directa del mecanismo esférico de 3 GDL el cual fue diseñado para emular el movimiento del cuello de los seres humanos, demostrando que se logró implementar la convención de Denavit-Hartenberg para este tipo de mecanismos. Así mismo, se observó que al definir los sistemas coordenados de referencia, algunas configuraciones no eran convenientes para poder obtener el modelo dinámico, por lo tanto, se utilizaron rotaciones auxiliares que permitieron reubicar algunos sistemas coordenados con el fin de que el modelo dinámico describiera la mayor cantidad de fenómenos físicos posibles, al mismo tiempo que enfatizara el resultado de colocar contrapesos en cada eslabón para contrarrestar el efecto del peso de la cabeza del robot humanoide. Como consecuencia, se consiguió obtener el modelo dinámico a través de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange.

Por último, se realizó una simulación en Matlab, en la cual se ocupó un controlador de naturaleza tangente hiperbólica para el control de posición del mecanismo esférico, a su vez, los datos obtenidos se exportaron a SolidWorks donde se realizó un estudio de movimiento el cual corrobora el modelo dinámico, al ser este un software de diseño que nos brinda las herramientas para calcular el torque requerido por los actuadores y lograr compararlo con el modelo dinámico presentado en esta sección.

Capítulo 4: Sistema de Control.

En este capítulo se describe el hardware, firmware y software que se utilizó para controlar el sistema mecatrónico. La etapa de control consta de un microprocesador desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en el cual se realiza la programación en lenguaje ensamblador de la acción de control, el código de programa se almacena en una memoria ROM y también se cuenta con una memoria RAM para almacenar variables y datos calculados por el mismo, además cuenta con periféricos de entrada, que son decodificadores para la adquisición de datos de los codificadores de cuadratura, y registros donde se almacenan los datos enviados desde la interfaz gráfica de la PC, tanto la programación como la comunicación de datos es realizada mediante un módulo externo Wi-Fi, los periféricos de salida son generadores de señal PWM, lo anterior fue implementado en un FPGA Cyclone 4 y se realizó el firmware en lenguaje AHDL. Se diseñó un puente H para la etapa de potencia de cada motor, ya que las señales de control solo pueden entregar hasta 1mA a 3.3v, por este motivo se requiere un circuito con transistores BJT en configuración Darlington.

4.1 Hardware.

En la figura 4.1 se presenta un diagrama general de los elementos que conforman el hardware del sistema mecatrónico.

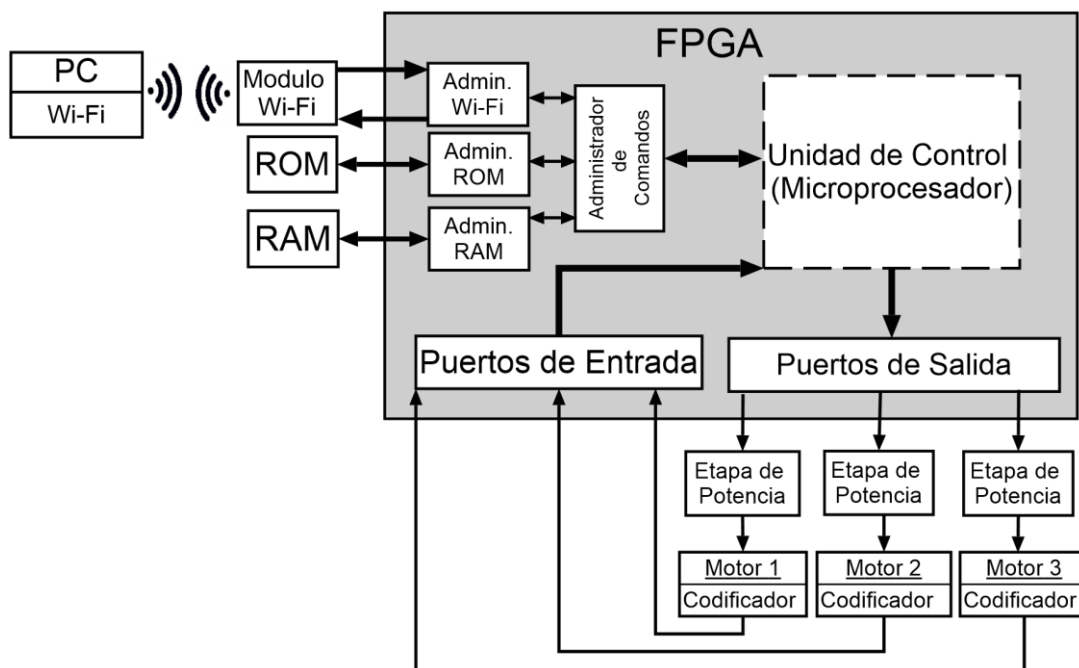


Figura 4.1: Elementos que conforman el Hardware del Sistema Mecatrónico

4.1.1 Módulo Wi-Fi.

El módulo electrónico conocido como “WiFLY” es una tarjeta con acceso a dispositivos inalámbricos LAN. El dispositivo cuenta con el protocolo de comunicación TCP/IP y para su aplicación requiere solamente 4 pines (Vcc, Tx, Rx y Tierra). Una vez la configuración inicial es aplicada, el dispositivo puede automáticamente tener acceso a redes Wi-Fi y enviar o recibir datos sobre UART.

Este módulo se encarga de comunicar al sistema con la interfaz en la computadora de forma inalámbrica bajo el protocolo TCP/IP, conectándose de la manera más simple al sistema embebido que se utiliza para el control del sistema mecatrónico, esto es, se utiliza la interfaz UART que trae adjunta para mandar y recibir la información en forma serial, esto reduce la complejidad de comunicación entre la interfaz de control que se encuentra en una PC y el sistema mecatrónico.

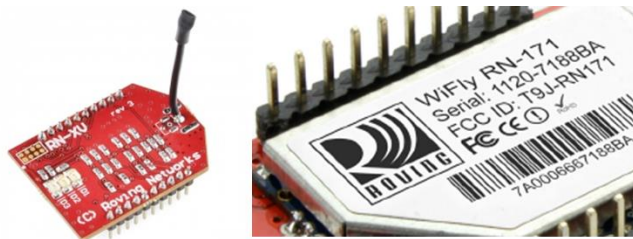


Figura 4.2: Modulo WiFly RN-XV

En la tabla 4.4 se muestran las características de radio comunicación que nos ofrece este módulo se muestran en la tabla 4.1, podemos transmitir información en la banda de frecuencia libre de 2.4 GHz.

Tabla 4.1: Especificaciones de comunicación inalámbrica del módulo Wi-Fi (RN-XV)

Parámetro	Especificaciones
Frecuencia.	2402-2480MHz
Modulación.	802.11: DSSS(CCK-11, CCK-5.5, DQPSK-2, DBPSK-1) 802.11g : OFDM
Intervalo de canal.	5MHz
Canales de transmisión.	1-14
Tasa de transmisión inalámbrica.	1-11Mbps para 802.11b/6 – 54Mbps para 802.11g
Sensibilidad de recepción	-83dBm

4.1.2 Motorreductor Pololu 37Dx57L de relación 131:1 con codificador 64 CPR.

Los motores representan una tecnología bien establecida que combinan eficiencia y alto desempeño para facilitar los procesos de automatización, los motores eléctricos pertenecen a una clase especial de transductores, debido a que convierten un tipo de energía (eléctrica) a otro tipo de energía (mecánica). En la gran mayoría de las aplicaciones de ingeniería mecatrónica se utilizan motores de corriente continua, hoy en día se utiliza el concepto de

servomotores para aquellos motores eléctricos que tienen incorporado un sensor de alta resolución y un sistema electrónico (servoamplificador o driver) que le permite funcionar con alto desempeño.

Este motor (Brushed) del fabricante Pololu es un motor de corriente continua, estos motores están destinados para su uso en 12 V, aunque en general, este tipo de motores pueden funcionar a tensiones por encima y debajo de la tensión nominal (comenzar a girar con tensiones tan bajas como de 1 V). Tensiones más bajas pueden no ser práctico, y voltajes más altos podrían comenzar a afectar negativamente a la vida útil del motor, se muestra el motor en la figura 4.3.



Figura 4.3: Motorreductor Pololu 131:1.

La relación exacta de la caja de reducción es la siguiente:

$$\frac{25 \times 30 \times 30 \times 28 \times 30}{10 \times 10 \times 10 \times 12 \times 12} = 131.25 : 1 \quad (4.1)$$

El fabricante brinda las características del motorreductor, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 4.2: Especificaciones del motorreductor.

Característica.	Valor
Voltaje nominal.	12V.
Corriente máxima.	5 A.
Torque máximo	250 oz-in (18Kg-cm)
Velocidad sin carga al voltaje nominal.	80 RPM

4.1.3 Caracterización de los motores.

Los servomotores son la evolución tecnológica del motor eléctrico que incorpora un sistema electrónico conocido como servoamplificador y un sensor de posición con alta resolución, siendo generalmente un codificador. Actualmente los servomotores representan la base de desarrollo que ha tenido la robótica.

Los componentes básicos de un servomotor son:

- Driver
- Motor
- Sensor de posición.

La integración del motor con un servoamplificador o driver genera que el torque entregado por el motor no esté en función de su voltaje de alimentación, sino que sea directamente proporcional, se puede decir que amplifica y la respuesta sea en forma lineal.

Para convertir un motor de corriente continua a un motor de transmisión directa se debe en primera instancia conocer el voltaje nominal al cual dicho motor entregue un máximo torque y que la potencia que consuma sea relativamente baja. Se considera un motorreductor de fabricante Pololu que tiene una relación en su caja de engranes de 131:1 y se monta sobre el mecanismo llamado freno prony, que básicamente consta de una estructura donde en la base se fija el motor con una mordaza o prensa y al vástago del motor se le acopla una polea donde se sujeta una cuerda de tal forma que esta tenga una orientación perpendicular al eje de giro del motor y dicha cuerda se sujeta verticalmente al dinamómetro que se encuentra a una altura determinada del motor, como se muestra en la figura 4.4.

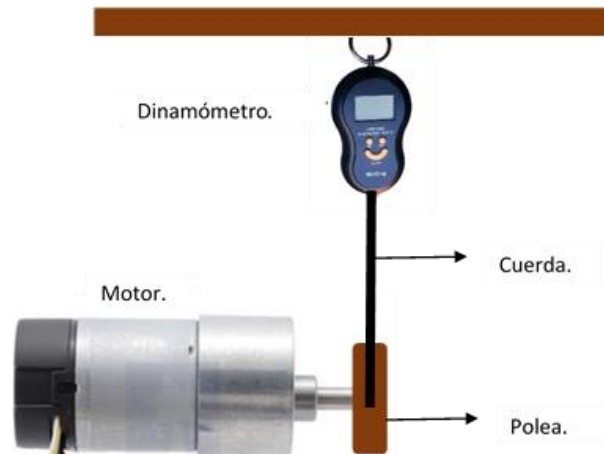


Figura 4.4: Montaje del motor en el freno Prony

La forma en la que se sujeta la cuerda de modo que se encuentre perpendicular al eje de giro del motor es debido a la ley de torque, es decir que en esa disposición la fuerza ejercida por el motor hacia el dinamómetro es la máxima.

Para determinar el voltaje nominal se mide la corriente y el dato que nos entrega el dinamómetro, este está dado en kg, ya que es una fuerza, por lo tanto debemos convertirlo a torque, se multiplica por la gravedad y por el radio de la polea donde se está midiendo dicha fuerza y como resultado obtenemos el torque. Además de esto debemos obtener un índice que describe cuanta potencia se inyecta al motor y cuanta energía mecánica entrega, esto es la eficiencia del motor y es clave para determinar el voltaje nominal pues se elige el voltaje en el cual entregue más torque y la eficiencia sea mayor.

El paso a seguir es encontrar una frecuencia de trabajo donde el motor entregue la mitad del torque máximo con la finalidad de que la respuesta del motor sea lineal.

Se procede a buscar la mitad del torque máximo, haciendo un barrido de frecuencia con un generador de ondas, además se le debe de sumar a la fuente de alimentación el voltaje que consume el transistor Darlington, se aplica una onda cuadrada con ciclo de trabajo al 50% y por lo tanto se tiene:

- Motor 1:

Se encontró que el voltaje nominal para este motor es de 10.5 v y la frecuencia de trabajo es de 110 Hz, en la tabla se muestra el barrido de ciclo de trabajo a esta frecuencia.

Tabla 4.3: Valores de torque del motor 1 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.

Ciclo de trabajo	Torque a 110Hz
10%	0.05481828
20%	0.51703605
30%	0.9344025
40%	1.27452501
50%	1.64579427
60%	1.95850764
70%	2.22014034
80%	2.58642612
90%	2.88045144
99%	3.2890968

- Motor 2:

Se encontró que el voltaje nominal para este motor es de 10.5 v y la frecuencia de trabajo es de 135 Hz, se muestra el barrido de ciclo de trabajo a esta frecuencia.

Tabla 4.4 Valores de torque del motor 2 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.

Ciclo de trabajo	Torque a 135Hz
10%	0.10091547
20%	0.51329844
30%	0.86961726
40%	1.1337417
50%	1.4202918
60%	1.70435016
70%	2.02080114
80%	2.31233472
90%	2.55777111
99%	2.86425513

- Motor 3:

Se encontró que el voltaje nominal para este motor es de 10.5 v y la frecuencia de trabajo es de 125 Hz, se muestra el barrido de ciclo de trabajo a esta frecuencia.

Tabla 4.5 Valores de torque del motor 3 al aplicar señal PWM variando el ciclo de trabajo.

Ciclo de trabajo	Torque a 125 Hz
10%	0.1121283
20%	0.46346364
30%	0.7724394
40%	1.09138212
50%	1.34055612
60%	1.61340165
70%	1.90867284
80%	2.1678138
90%	2.4045291
99%	2.7284553

4.1.4 Etapa de Potencia.

Se diseñó un puente H ocupando el software Altium Designer para la etapa de potencia de cada motor, sabiendo que el motor no sobrepasa los 6 Amperios a las frecuencias de trabajo designadas, el dispositivo FPGA en sus salidas solo puede entregar hasta 1mA a 3.3v por este motivo se requiere un circuito con transistores en configuración Darlington para diseñar la etapa de potencia (puente H). La estructura del puente H se observa en la figura 4.5.

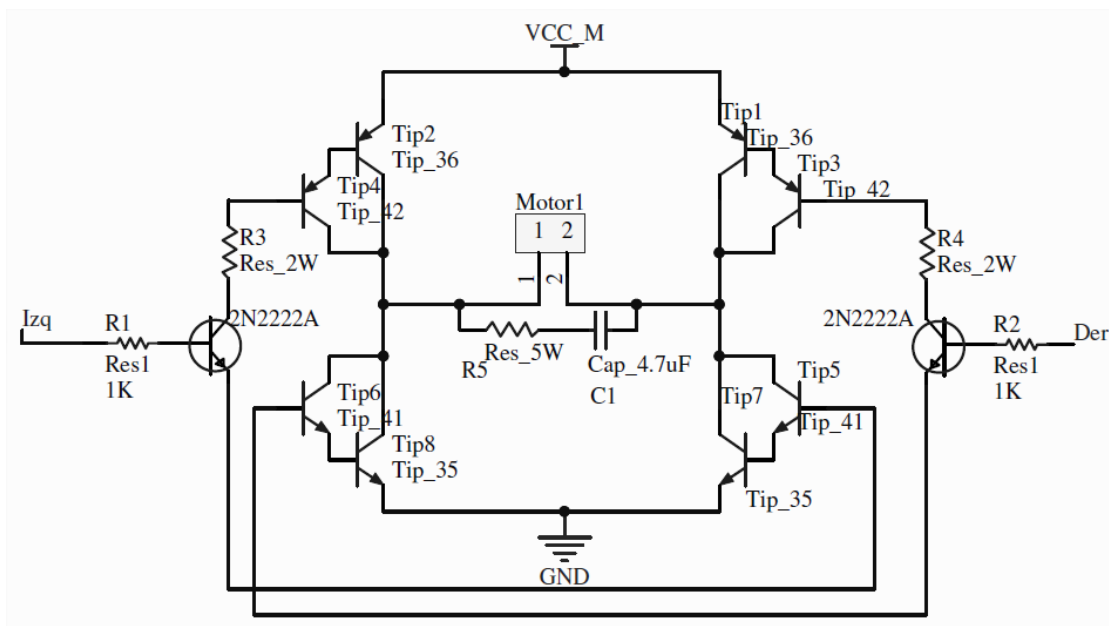


Figura 4.5: Diagrama Puente H.

Para conocer si la configuración Darlington es suficiente para poder activar 6 amperes que consume el motor, se calculó la corriente que deberá drenar cada uno de los transistores, esto es, cada transistor hasta llegar al que activa la salida del FPGA, además, se contempla un pico de corriente aproximadamente el doble, esto debido a que los motores al iniciar el movimiento tienen este comportamiento aunque es por un periodo muy breve, por lo tanto el puente H se diseñó para poder drenar 10 A.

Comenzando por el tip 36c que es un transistor de potencia, se calcula la corriente que drenara y la corriente que deberá existir en base para que entre en saturación. Para asegurar la saturación de un transistor se calcula la corriente con la beta forzada, que es mucho menor que la beta real del transistor, la hoja de características del transistor nos muestra que su beta es de 20 a 75, lo cual se ocupara una beta forzada de 15, como se muestra en la ecuación (4.2).

$$I_b = \frac{I_c}{\beta_f} = \frac{10A}{15} = 0.666 A \quad (4.2)$$

Para el tip 42c se conoce ahora la corriente que deberá drenar para que el transistor tip 36c entre en saturación, por lo tanto se considera esta como corriente de colector, la beta de este transistor es la misma que el tip 36c, así se tiene que:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta_f} = \frac{0.666 A}{15} = 44 mA \quad (4.3)$$

Conociendo ahora la corriente que activara el transistor tip 42c, se calcula la corriente del transistor que será activado por la salida de la FPGA es un 2N2222, la hoja de datos de este transistor nos muestra que su beta está en un rango de 100 a 300, por lo cual se toma una beta forzada de 50, ahora tenemos que:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta_f} = \frac{44 mA}{50} = 0.8 mA \quad (4.4)$$

Por lo tanto, la salida del FPGA solo puede suministrar 1 mA y teniendo la configuración anterior se garantiza que el puente H podrá drenar 10 A con una corriente de activación de 0.8mA, con lo anterior ratificamos el funcionamiento de la etapa de potencia.

A continuación se calculan las resistencias de base del transistor Darlington y 2N2222, que son las resistencias que generaran la corriente de activación.

Para el transistor Darlington se toma la malla que se muestra en la figura 4.6.

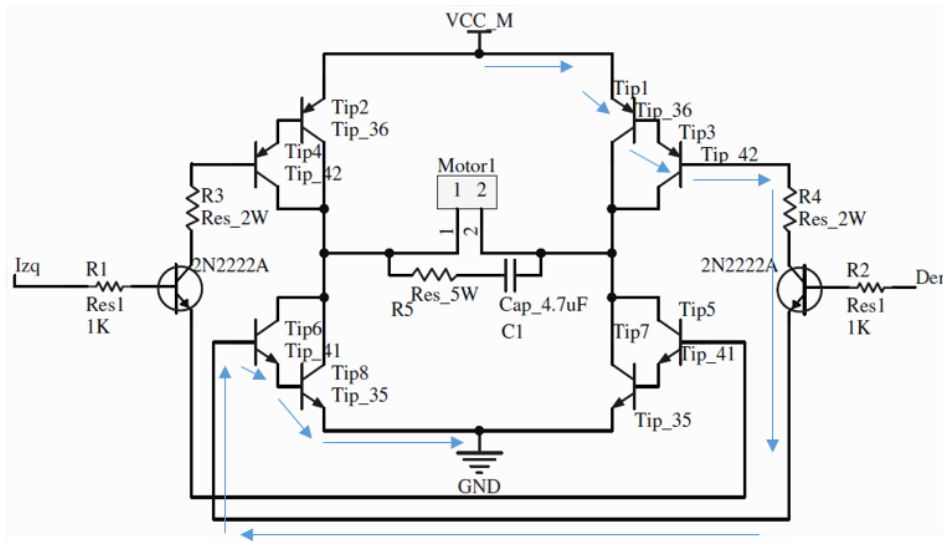


Figura 4.6: Malla para el calcuo de las resistencias de activacion del transistor Darlington.

Como existe una caída de potencial en cada transistor de 0.7v y en el transistor 2N2222 tiene una caída de potencial que es el voltaje colector-emisor de 0.2v, se tiene entonces para la resistencia 1 y 2 con un voltaje VDD igual a 10.5v:

$$R_1 = R_2 = \frac{V_{DD} - 4*(0.7) - 0.2}{0.044 A} = 170.45\Omega \quad (4.5)$$

Para el cálculo de la potencia de esta resistencia se toma en cuenta el voltaje a suministrar al motor, que es de 10.5 V, como lo muestra la ecuación (4.6).

$$Potencia = Voltaje * Corriente = 10.5 * 0.044 = 0.462W \quad (4.6)$$

Para el transistor 2N2222 se tiene la siguiente malla:

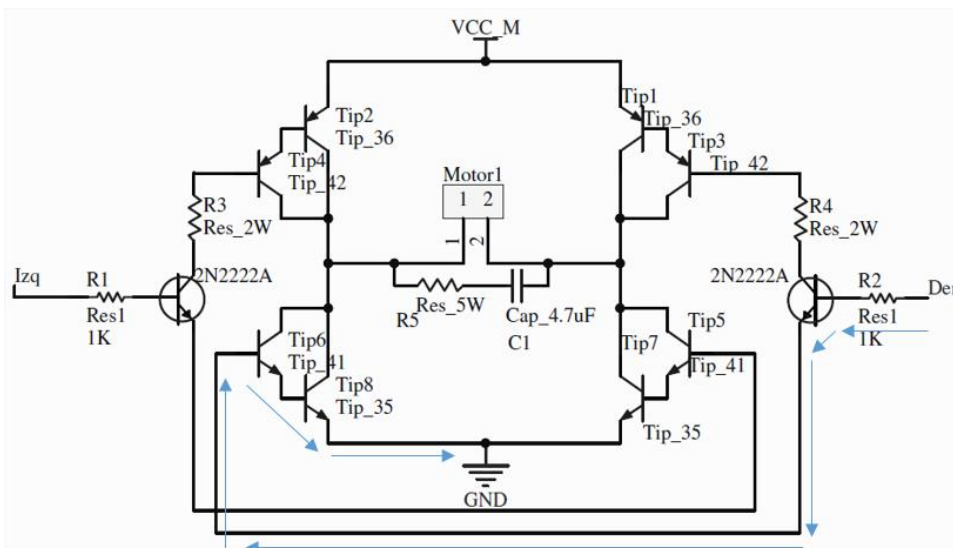


Figura 4.7: Malla para el calcuo de las resistencias de activacion del transistor 2N2222.

La caída de potencial de cada transistor es de 0.7 v y el voltaje de que suministra la FPGA es de 3.3v, por tanto se tiene para las resistencias 3 y 4 la ecuación (4.7)

$$R_1 = R_2 = \frac{V_{fpga} - 3*(0.7)}{0.8mA} = 1.5 K\Omega \quad (4.7)$$

Para el cálculo de la potencia de esta resistencia se toma en cuenta el voltaje a suministrar por el FPGA, que es de 3.3 V, como lo muestra la ecuación (4.8).

$$Potencia = Voltaje * Corriente = 3.3v * 0.8mA = 0.00264W \quad (4.8)$$

Por último, se diseñó la placa PCB en el software Altium Designer, el tamaño de cada placa es de 10X10 cm., ver figura 4.8.

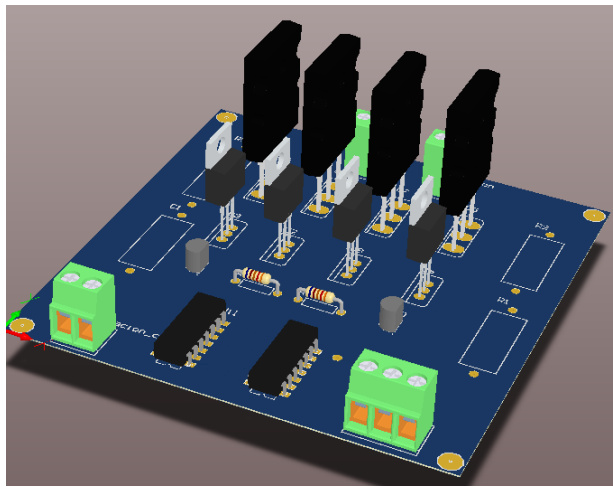


Figura 4.8: PCB de la etapa de potencia para cada motor.

4.1.5 Memoria ROM.

La memoria FLASH-NOR de 32Mb de almacenamiento que se utilizó es del fabricante Microchip con número de matrícula SST26VF032B104I/SN, se muestra en la figura 4.9.

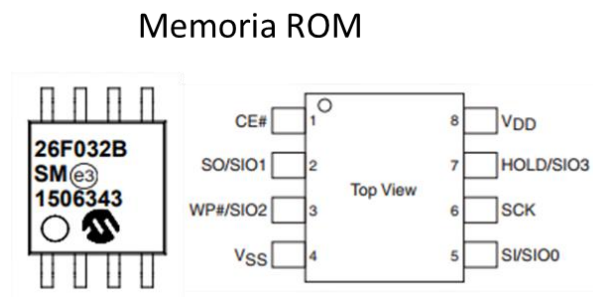


Figura 4.9: Memoria ROM.

4.1.6 Memoria RAM

La memoria SRAM de 1Mb de almacenamiento que se utilizó es del fabricante Microchip con número de matrícula 23LC1024-I/SN, se muestra en la figura 4.10.

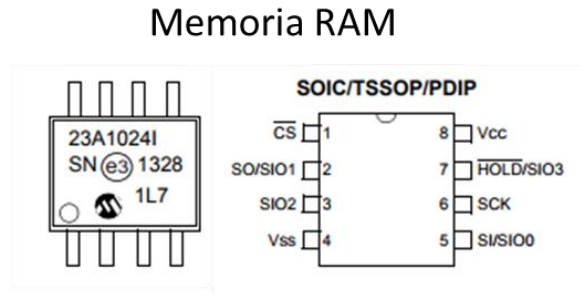


Figura 4.10: Memoria RAM.

4.2 Firmware.

Para la etapa de firmware implementado en el FPGA se cuenta con diversidad de módulos ya que la arquitectura del dispositivo programable nos permite realizar acciones en paralelo, es decir, que se ejecutan los módulos al mismo tiempo, en la figura 4.11 se muestran los módulos que conforman el firmware del sistema.

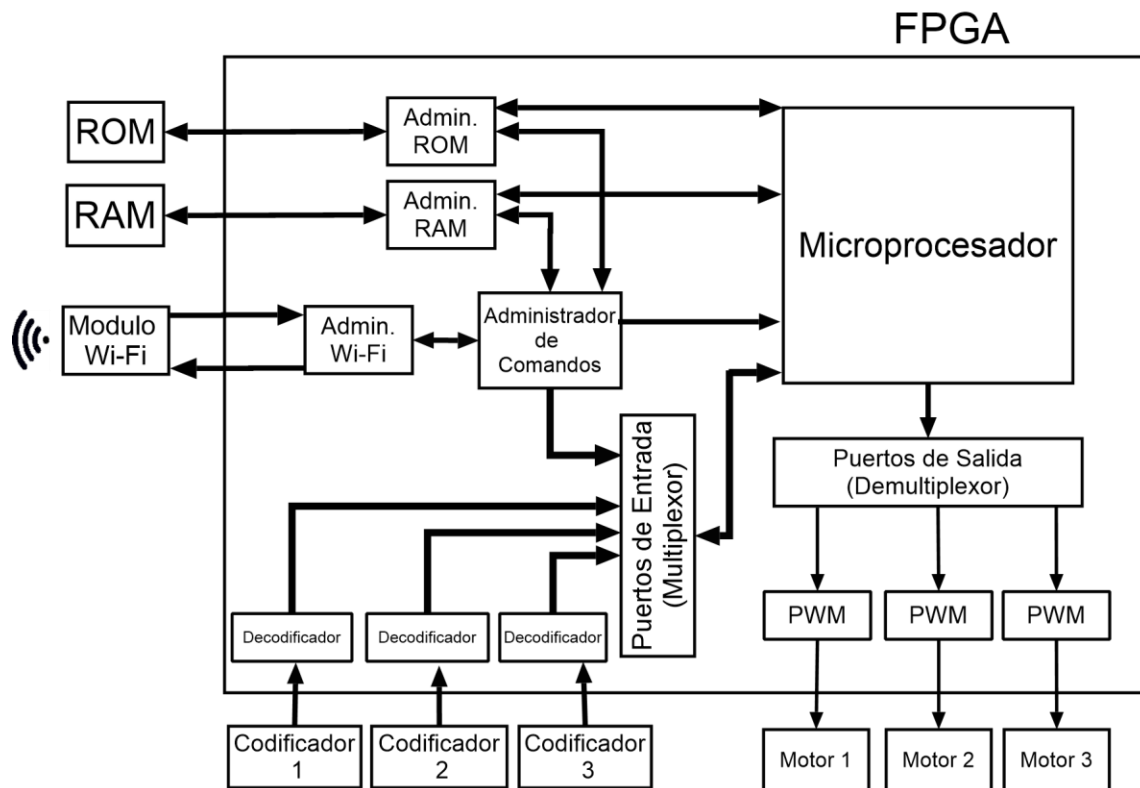


Figura 4.11: Diagrama general del firmware.

4.2.1 Decodificador de señales.

Para generar un firmware que pueda adquirir los datos generados por el codificador de cuadratura que tiene integrado los motores, se debe primero conocer la frecuencia máxima de los canales A y B, que son las señales proporcionadas por el codificador de efecto hall, al suministrar el voltaje máximo al cual puede trabajar el motor de forma óptima, esto se medirá por medio de un osciloscopio la frecuencia máxima que tienen estas señales, lo cual permite obtener el periodo mínimo (T_{min}) al cual deberemos muestrear las señales, esto es en función de la mayor revolución del motor, como se muestra en la figura 4.12.

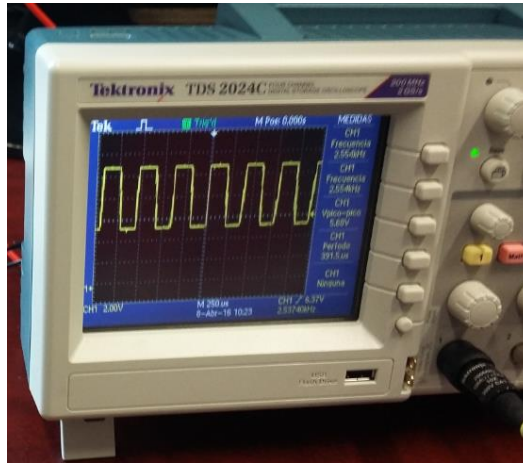


Figura 4.12: Frecuencia de la señal A del codificador.

La frecuencia de las señales A y B del codificador resulto ser de 2.56 KHz a un voltaje nominal de 10.5 volts.

Se necesita establecer la frecuencia de muestreo para las señales del codificador de cuadratura, como dicha frecuencia será variable y dependerá de la velocidad a la cual trabaje cada motor, además como se requiere tomar las muestras a la máxima resolución del codificador, se debe tomar cuatro lecturas por periodo de una señal del codificador, como se aprecia en la figura 4.13, en este caso estamos determinando la frecuencia de la señal A (f_A), esto es:

$$f_{muestreo} = 4 * f_A \quad (4.9)$$

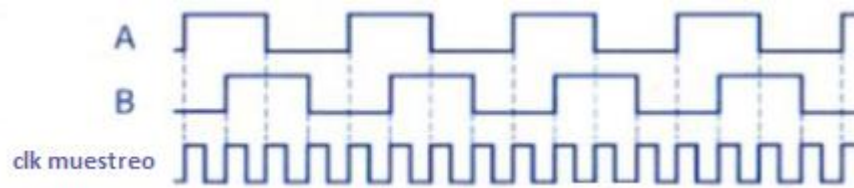


Figura 4.13: Muestras por periodo de la señal A.

Para generar este reloj que este en función de las señales A y B, es decir que cambie también la frecuencia de muestreo en función de la velocidad del motor, se necesita el circuito mostrado en la figura 4.14.

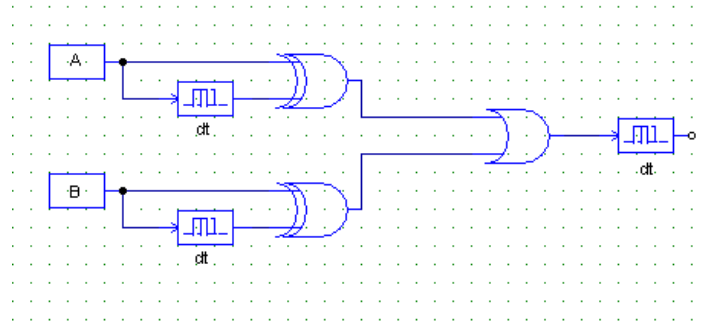


Figura 4.14 Circuito que genera clk de muestreo.

Donde dt será un retraso de la señal tanto para A, B y para la señal de salida de este circuito, ya que ocuparemos un FPGA, realizando el circuito como firmware, tenemos que para generar el retraso de cada señal del codificador dependerán de flip flops tipo D, que se encargaran de generar el retraso de la señal un ciclo de reloj, además como será una señal asíncrona se deberá ocupar al menos tres flip flops, esto para garantizar que exista dicho retraso de la señal, por lo anterior debemos ahora generar un reloj el cual se conecte a estos flip flop, esto se realizara con un divisor de frecuencia, porque ocuparemos el reloj interno del FPGA de 100MHz, para generar el desfase de las señales A y B, se deberá calcular el periodo de dicho reloj el cual se tiene que, para generar el desfase de 45° de cada señal del codificador se necesita:

$$\Delta t = \frac{T_{min}}{8} \quad (4.10)$$

Y para el periodo del reloj que se conecta a los flip flop, como serán tres retardos para garantizarlos se tiene:

$$T_{CLK} = \frac{\Delta t}{3} \quad (4.11)$$

Por lo tanto el periodo nos queda el periodo del clk que se conecta a los flip flop reemplazando las ecuaciones:

$$T_{CLK} = \frac{T_{min}}{24} \quad (4.12)$$

Como sabemos que:

$$T_{min} = \frac{1}{f_{Amax}} = \frac{1}{2560 \text{ Hz}} = 390 \mu s \quad (4.13)$$

$$T_{CLK} = \frac{390 \mu s}{24} = 16.2 \mu s \quad (4.14)$$

Al generar el divisor de frecuencia del reloj del FPGA de 100MHz se debe contemplar que el periodo tiene dos estados (alto y bajo), esto es al 50% cada uno del periodo completo de T_{CLK} , por tanto se dividirá este periodo entre el reloj de 100MHz y como tiene dos estados se divide entre dos, esto para obtener el número de pulsos de reloj del fpga que deberán ser contabilizados para generar el reloj de los flip flops, tenemos que:

$$T_{CLK} = \frac{16.2 \mu s}{10ns} = 1620 \text{ ciclos de reloj fpga} \quad (4.15)$$

Y para cada estado de T_{CLK} tenemos:

$$\frac{T_{CLK}}{2} = \frac{1620}{2} = 810 \text{ ciclos de reloj fpga} \quad (4.16)$$

Para generar el código del bloque que será el divisor de frecuencia del reloj del FPGA ya que contamos con los datos de las cuentas por semi-ciclo del reloj que se conectara a los flip flops, tenemos el diagrama de flujo de la máquina de estados, ver figura 4.15, que define este divisor de frecuencia en función de un contador el cual se incrementa cada ciclo de reloj del FPGA, con la finalidad de contabilizarlos y generar el reloj necesario para los flip flip de retardo.

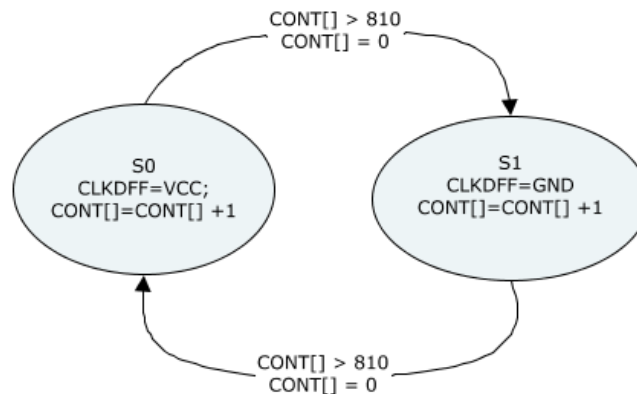


Figura 4.15: Diagrama de estados divisor de frecuencia.

Una vez generado este bloque, ya se cuenta con el circuito con el cual generamos el reloj que será el que se conecte a una máquina de estados que contará los cambios en las señales A y B del codificador, así mismo, esta máquina de estados tendrá la capacidad de reconocer en qué sentido se encuentra girando el motor. Se muestra el circuito en la figura 4.16.

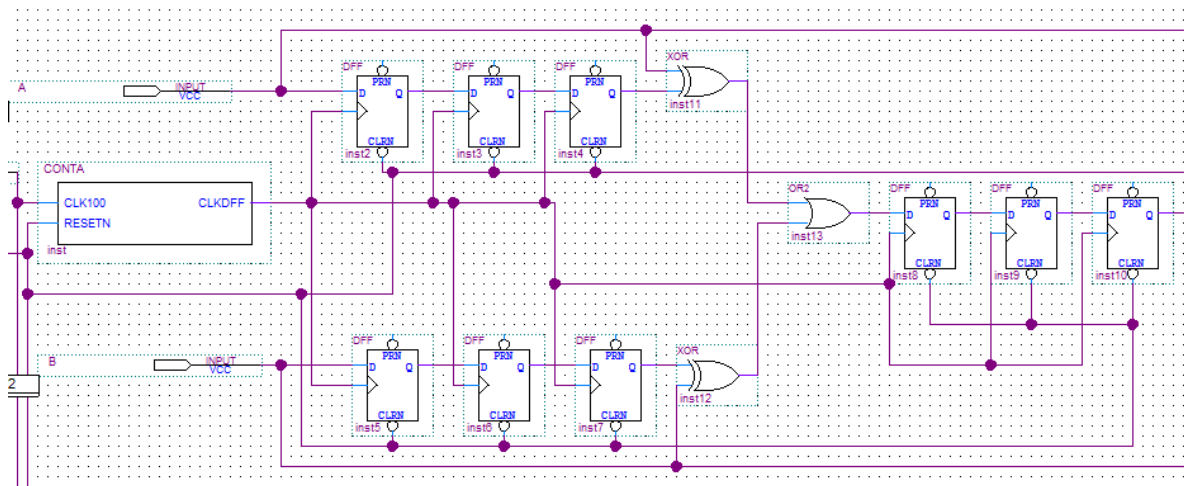


Figura 4.16: Circuito generador del CLK de adquisición.

A continuación se presenta el diagrama de la máquina de estados que se encargara de leer las salidas del codificador de cuadratura, determinando el sentido de giro del motor.

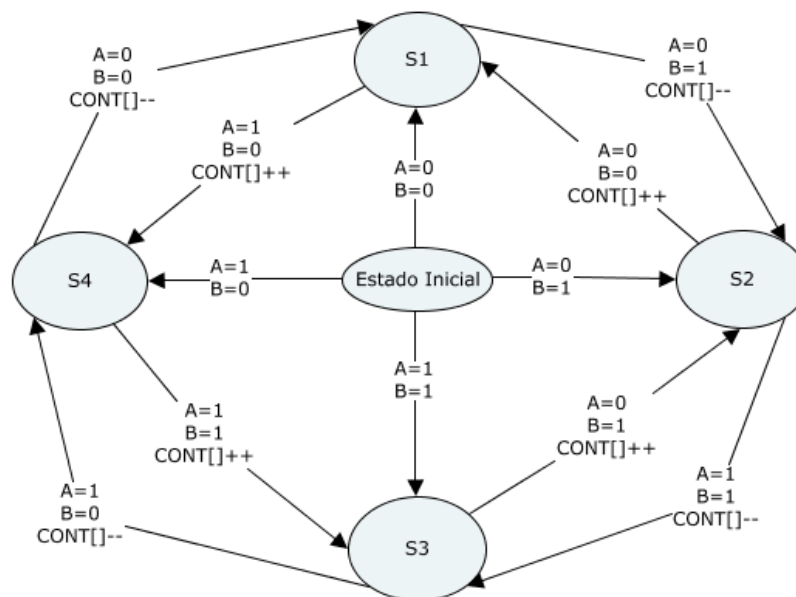


Figura 4.17: Diagrama de estados para lectura del codificador de cuadratura.

Con lo anterior se puede leer correctamente las señales generadas del codificador de cuadratura, se descargó el firmware desarrollado en un FPGA y se muestra en la figura 4.18 el reloj de muestreo de color morado junto con las señales A y B de color azul y amarillo respectivamente.

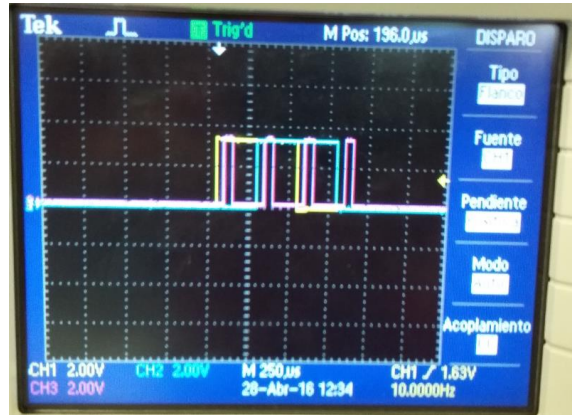


Figura 4.18: Reloj de muestreo y señales A y B.

4.2.2 Generador de señal PWM.

Ahora se desea generar una señal PWM que tenga la frecuencia de trabajo óptima de cada motor, estas son 135 Hz, 125Hz y 110Hz, para lograr esto se requiere un divisor de frecuencia del reloj del FPGA de 100MHz, este será el reloj que se conectara a la máquina de estados que genere la salida PWM, dicho reloj deberá estar en función de los 8 bits de resolución del PWM, esto nos permitirá que la máquina de estados que genere la salida del PWM también se encuentre en función de los 8 bits, es un mapeo para generar la resolución del PWM, por lo tanto tenemos:

Para el motor 1:

$$f_{CLK\ PWM} = (135\ Hz) * 255 = 34425\ Hz \quad (4.17)$$

$$T_{CLK\ PWM} = \frac{1}{34425\ Hz} = 29.04\ \mu s \quad (4.18)$$

Para el motor 2:

$$f_{CLK\ PWM} = (125\ Hz) * 255 = 31875\ Hz \quad (4.19)$$

$$T_{CLK\ PWM} = \frac{1}{31875\ Hz} = 31.37\ \mu s \quad (4.20)$$

Para el motor 3:

$$f_{CLK\ PWM} = (110\ Hz) * 255 = 28050\ Hz \quad (4.21)$$

$$T_{CLK\ PWM} = \frac{1}{28050\ Hz} = 35.65\ \mu s \quad (4.22)$$

Para generar el divisor de frecuencia se necesita un contador el cual deberá registrar cada ciclo de reloj del FPGA, en base a esto debemos saber cuántos ciclos de reloj del son necesarios para obtener el periodo del reloj del PWM, tenemos entonces que:

Motor 1:

$$\text{ciclos de reloj fpga} = \frac{29.04\mu s}{10ns} = 2904.86 \text{ ciclos} \quad (4.23)$$

Motor 2:

$$\text{ciclos de reloj fpga} = \frac{31.37\mu s}{10ns} = 3137.25 \text{ ciclos} \quad (4.24)$$

Motor 3:

$$\text{ciclos de reloj fpga} = \frac{35.65\mu s}{10ns} = 3565.06 \text{ ciclos} \quad (4.25)$$

Pero el periodo del reloj del PWM tiene dos estados, los cuales son alto y bajo, por lo cual el número de ciclos del reloj del FPGA se divide entre dos, entonces tenemos para cada estado que:

Motor 1:

$$\text{ciclos reloj fpga} = \frac{2904.82}{2} = 1452.43 \cong 1452 \text{ ciclos} \quad (4.26)$$

Motor 2:

$$\text{ciclos reloj fpga} = \frac{3137.25}{2} = 1568.62 \cong 1569 \text{ ciclo} \quad (4.27)$$

Motor 3:

$$\text{ciclos reloj fpga} = \frac{3565.06}{2} = 1782.53 \cong 1782 \text{ ciclos} \quad (4.28)$$

Una vez obtenidos los datos para generar el reloj del PWM de cada motor se procede a obtener el diagrama de estados del divisor de frecuencia, este solo varia en el valor de ciclos para cada motor, se muestra en la figura 4.19.

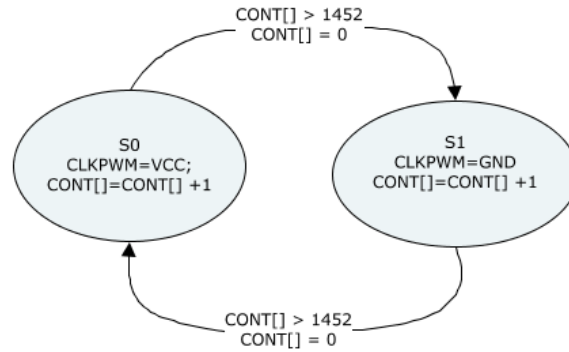


Figura 4.19: Diagrama de estados del divisor de frecuencia.

Una vez generado el reloj del PWM se procede a generar la salida PWM de 8 bits de resolución, esto se realiza comparando una entrada la cual es el valor de 0 a 255 que se desea a la salida y nos debe de generar una salida con frecuencia fija que será la que ocupe cada motor, es decir, 135 Hz, 125Hz y 110Hz, se muestra en la figura 4.20 el diagrama de estaos.

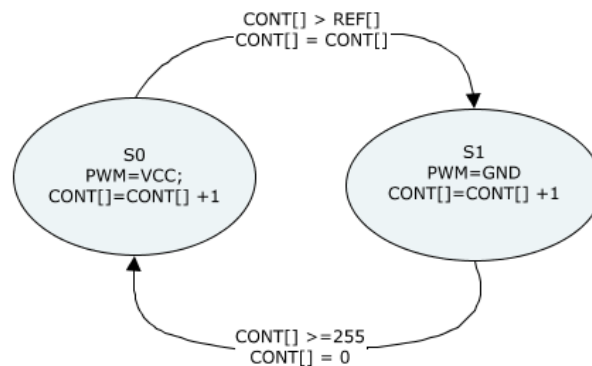


Figura 4.20: Diagrama de estados de generador de PWM.

Por último se presenta en la figura 4.21 el diagrama a bloques en el programa Quartus II de lo anteriormente descrito, cabe mencionar que este diagrama es para un solo motor, lo cual significa que se necesitan tres de este tipo.

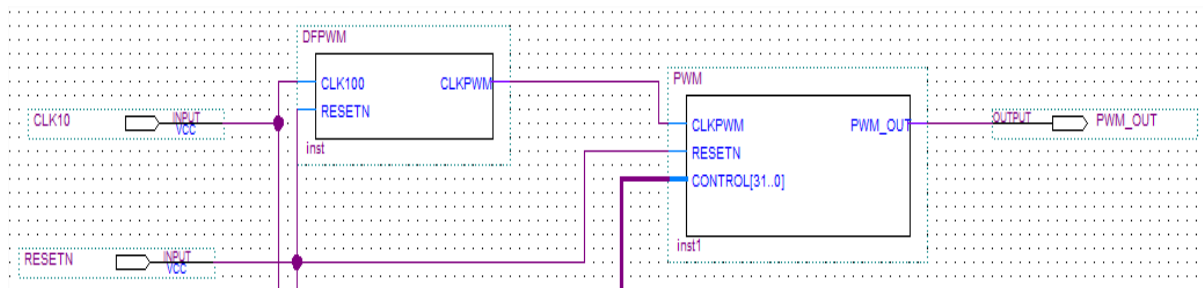


Figura 4.21: Diagrama a bloques del firmware generador de PWM.

4.2.3 Firmware comunicación Wi-fi:

Para la programación de nuestro FPGA, ocupamos el software Quartus II versión 13.0 web edition, realizando toda la programación en lenguaje AHDL. El firmware elaborado, tiene como parte principal el protocolo de comunicación Wi-Fi (lectura y escritura).

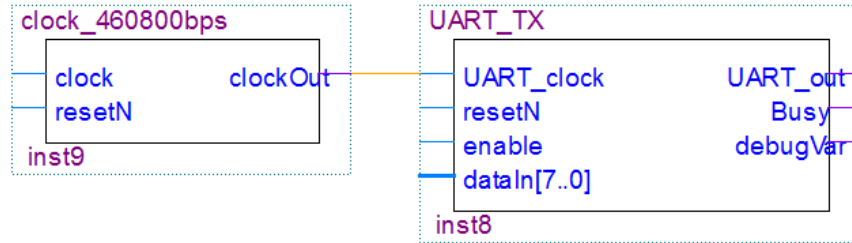


Figura 4.22: Firmware del Protocolo de comunicación Wi-Fi.

El FGPA se comunica con protocolo serial al dispositivo Wifly, el cual se comunica inalámbricamente a una computadora, esto nos sirve como interfaz entre nuestro sistema físico y el software de control de nuestra Robot esférico.

El UART se eligió como protocolo de comunicación de datos, puesto que el módulo RN-XV es el único que tiene habilitado para enviar y recibir datos. Para llevar a cabo la comunicación entre el FPGA y el módulo Wi-Fi, se desarrolló el firmware del protocolo UART. El formato serial de los datos del UART puede variar, dependiendo si se hace uso de bits de paridad para control de error. Para este caso, se usarán 10 bits: 1 bit de inicio + 8 bits de datos + 1 bit de paro. La señal está inactiva a un “1” lógico y activa a un “0” lógico. En la figura 4.23 se puede observar el formato de la transmisión de bits. A la tasa de transferencia se le llama “baudrate” o tasa de bits por segundo.

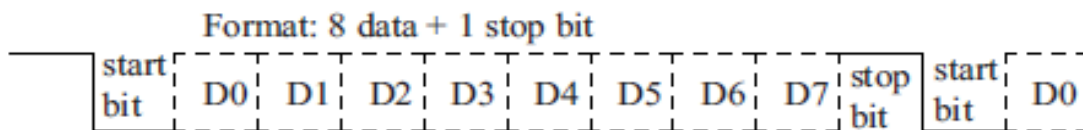


Figura 4.23: Trasmisión UART.

El Receptor/Emisor Asíncrono Universal, UART por sus siglas en ingles (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) permite establecer una comunicación serial entre dos dispositivos. Puede ser de 2 líneas o 4 si se hace uso del control de flujo. El cableado es mostrado en la figura 4.24.

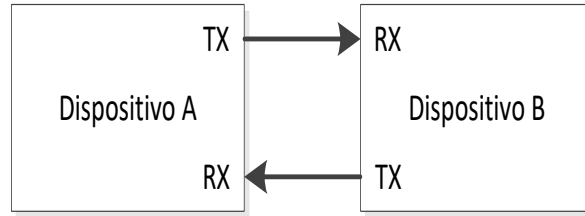


Figura 4.24: Comunicación UART.

En la nomenclatura del UART, TX es para la transmisión y RX es para la recepción. La principal característica de este medio de transmisión es que no usa una señal de reloj para sincronizar el flujo de datos, caso contrario del bus SPI o el USART. El hecho de no contar una señal de reloj simplifica la operación y facilita la implementación de hardware. Sin embargo, hay un precio a pagar y este es que sacrifica velocidad de transmisión. Puesto que no existe una señal de reloj, ambos dispositivos deben de ser configurados para que funcionen a un flujo de datos predeterminado, de tal forma que se podría decir que existe una sincronización, pero independiente. Dicho lo anterior, se recomienda muestrear los bits al menos 16 veces más rápido que la velocidad de transferencia en uso, esto es con el propósito de tener una tolerancia de lectura, ver figura 4.25.

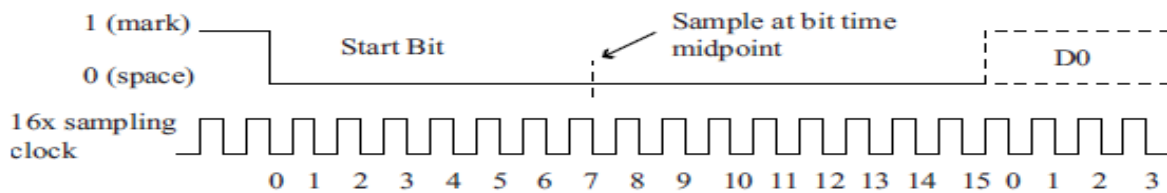


Figura 4.25: Muestreo de bits.

Tomando en cuenta la frecuencia de muestreo mínima recomendada, se implementó una frecuencia de 100 MHz. El Firmware del UART incluye las funciones de transmisión y recepción de datos serial, así como la interfaz de interpretación de datos. En la figura 4.26 se observa el diagrama a bloques del firmware del UART

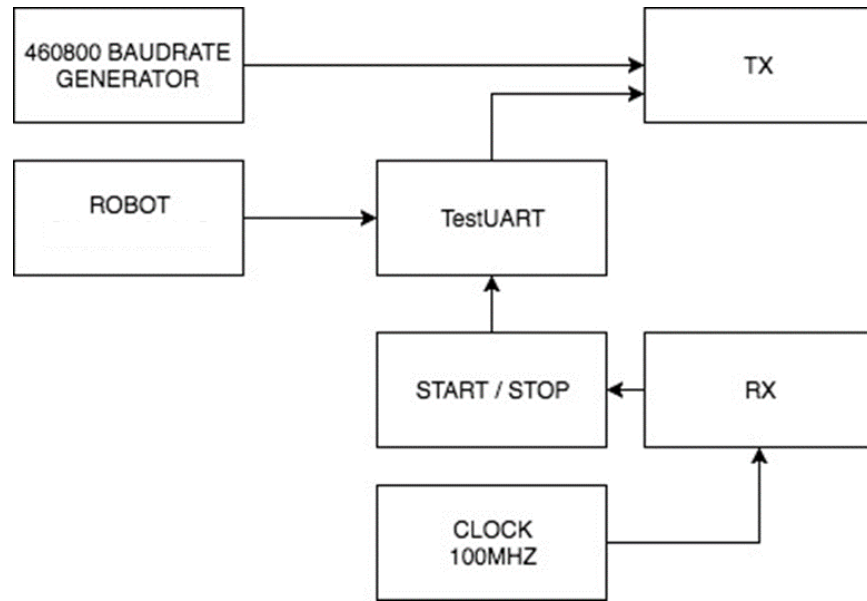


Figura 4.26: Estructura a bloques del Firmware del UART.

Receptor (RX): Representado por máquinas de estados, en donde se tienen las tareas de detectar el bit de inicio, encontrar el punto intermedio para el muestreo, tomar la muestra, esperar a que termine de transmitirse el bit en cuestión y recibir el bit de paro. Se utiliza un reloj de 100Mhz para el muestreo, con lo que 217 cuentas se requieren para que transcurra una transición de un bit.

Transmisor (TX): Representado por máquinas de estados en donde se tienen las tareas de esperar a que se inicie la transmisión, enviar el bit de inicio “0”, esperar a que se termine de transmitir el bit en cuestión, convertir la señal de paralelo a serial y transmitirla y por ultimo enviar el bit el paro. Cuenta con un reloj que genera una tasa de transferencia de 460800 baudios.

StartStop: Este bloque revisa el dato recibido desde el UART, si un comando fue recibido, y decide si deshabilita o habilita el módulo UART_TX.

TestUART: Controla al transmisor, decide cuándo y que dato debe ser enviado.

En la figura 4.27 se observan las máquinas de estados del firmware correspondientes a los módulos de transmisión y recepción.

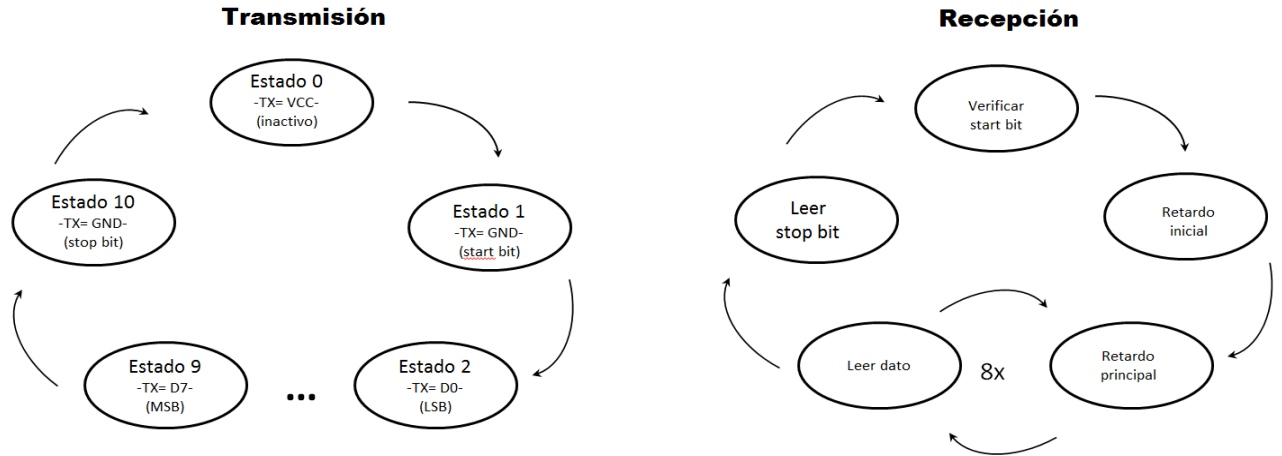


Figura 4.27: Máquinas de estados de la transmisión y recepción del UART.

El módulo de transmisión cuenta con un reloj configurado a 460800 baudios. Cuenta con una entrada de habilitación, entrada de datos y una salida que indica que el módulo está ocupado. El módulo generado se puede observar en la figura 4.28.

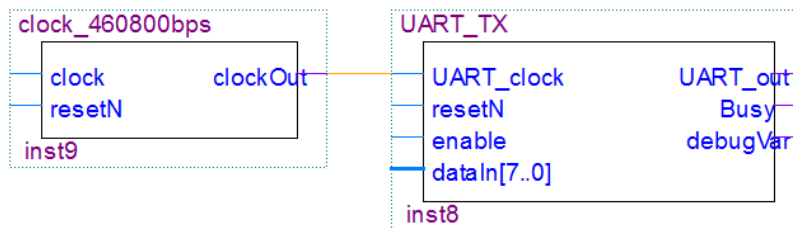


Figura 4.28: Módulo UART TX.

El módulo de recepción toma los datos a 100Mhz, sincronizándose a los baudios de transmisión mediante retardos. Esto es debido a que, para llevar a cabo una lectura confiable, se leen los datos a la mitad de la transmisión de cada bit. Sus salidas son el byte recibido, se muestra en la figura 4.29 el bloque correspondiente.

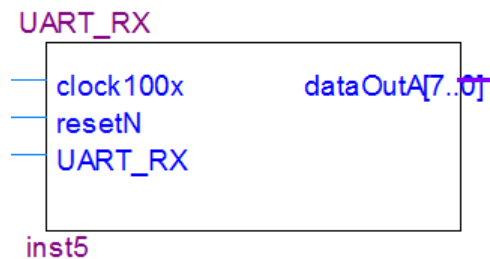


Figura 4.29: Módulo UART RX.

El módulo testUART, tiene como entrada la señal del reloj de 100 MHz, los datos a ser transmitidos, una entrada “enableIn” la cual proviene del módulo starStop y habilita el testUART para el envío del dato, el cual divide en tres palabras, la señal “UARTrdy” verifica que el módulo este libre con un estado lógico en bajo (GND).

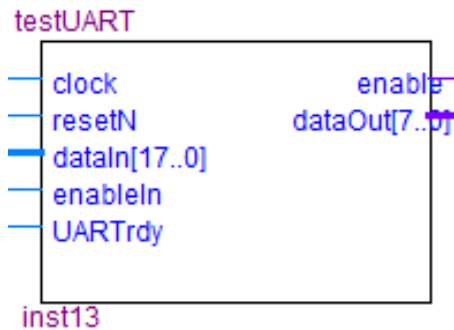


Figura 4.30: Módulo tesUART

El starStop como se había mencionado anteriormente, deshabilita o habilita el módulo UART_TX, mediante la habilitación de la señal de salida enableOut para controlar el módulo testUART.

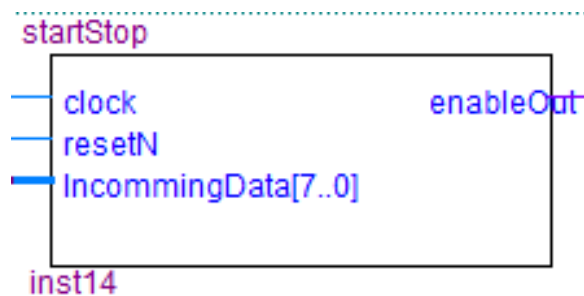


Figura 4.31: Módulo StartStop.

4.2.4 Microprocesador.

Nuestro firmware cuenta con un microprocesador [24], en el cual se realiza el algoritmo de control para manipular nuestro robot. Este microprocesador tiene su propio lenguaje en ensamblador el cual consta de 19 instrucciones con las cuales se logra leer puertos de entrada, hacer operaciones aritméticas, guardar valores en la memoria RAM y escribir en los puertos de salida. Su estructura consta de dos bloques de los cuales el primero se encarga de traducir los datos en binario recibidos que corresponden a cada instrucción y el segundo bloque es una unidad de operaciones aritméticas la cual puede calcular funciones básicas (suma, resta, multiplicación y el inverso de un número), funciones especiales (senoidal y exponencial) y funciones de comparación (igualdad, menor que y menor igual). En la figura 4.32 se muestran los bloques del firmware empleado.

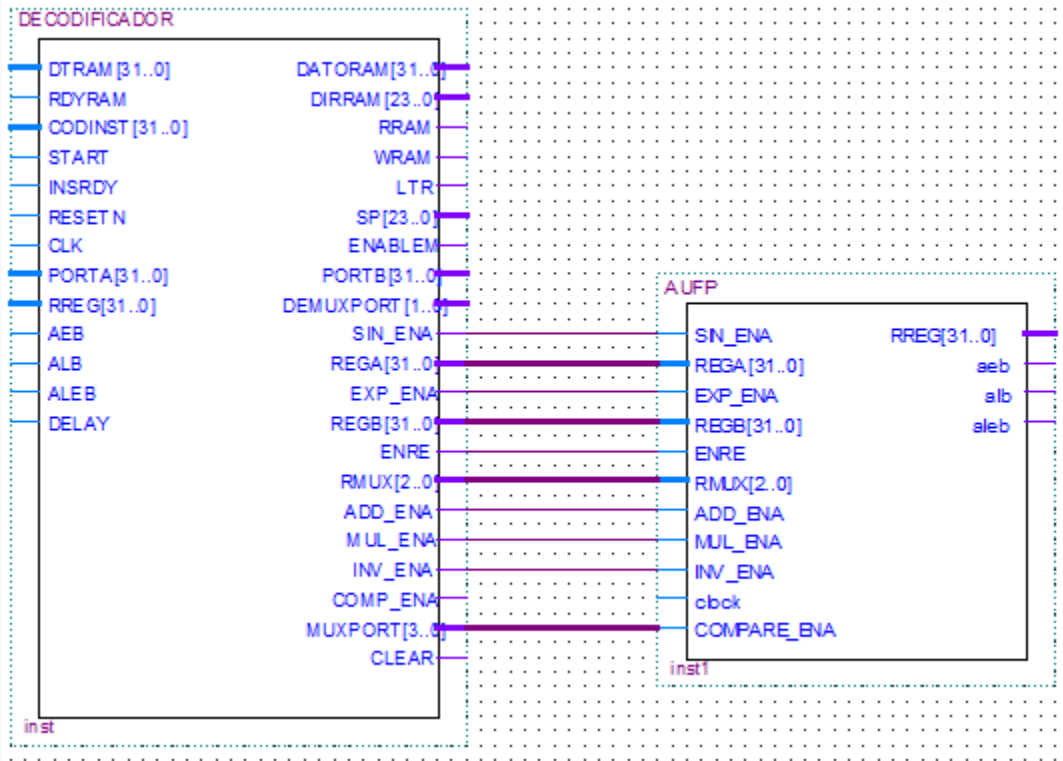


Figura 4.32: Bloques que conforman el Microprocesador.

Se cuenta con una tabla de instrucciones, ver tabla 4.6, para facilitar su uso.

Tabla 4.6: Instrucciones del microprocesador en lenguaje ensamblador.

INST.	COD. INST.	REG. F1	REG F2	REG. D	SHAMT	FUNC.	DESCRIPCIÓN
MOV.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000000	X->Y
MOVC.S	110010	00000	00000	XXXXX	00000	000001	CTE->X
RIO.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000010	PORTIN->X
WIO.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000011	X->PORTOUT
MOVRX	100011	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	MEMORIA RAM[DIR]=>X
MOVWX	101011	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	X=>MEMORIA RAM[DIR]
C.EQ.S	000100	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	IF (X==Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
C.LE.S	000101	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	IF (X<=Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
C.LT.S	000110	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	IF (X<Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
ADD.I	001000	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	00000	X=X+Y
SUB.I	001000	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	00001	X=X-Y
ADD.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000000	X=X+Y
SUB.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000001	X=X-Y
MUL.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000010	Z=X*Y
DIV.S	010001	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000011	Y=1/X
SIN.S	010001	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000100	Y=SIN(X)
EXPS	010001	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000101	Y=EXP(X)
DELAY	001111	00000	00000	00000	00000	000000	ESPERA 2.5 MILISEGUNDOS
JUMP	000010	00XXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	IR A DIRECCIÓN.

Gracias a la tabla de instrucciones se puede desarrollar el control necesario para manipular nuestro robot, cabe mencionar que esto es de mucha ayuda ya que si el usuario desearía emplear un controlador diferente bastaría con saber interpretar dichas instrucciones para poder hacer uso de ellas y de esta forma implementar el controlador que se dese usar, en este caso se empleó un controlador Proporcional con par gravitacional, se muestra el código realizado con las instrucciones el cual es un archivo con extensión .txt, el cual posteriormente se cargará en el compilador y finalmente se descarga en la memoria ROM.

4.2.5 Firmware de un controlador proporcional para el robot esférico.

Para realizar acciones de control de posición se generó un firmware en lenguaje ensamblador que denote la ecuación del controlador proporcional como lo muestra la ecuación (4.29).

$$\tau = k_p \tilde{q} + g(q) \quad (4.29)$$

Anteriormente se obtuvo el modelo dinámico del robot esférico, lo cual nos proporciona el par gravitacional y sustituyendo los parámetros del robot físico podemos tener una aproximación del par gravitacional que se requiere para lograr controlar adecuadamente el sistema, en la ecuación (4.30) se muestra el par gravitacional utilizado.

$$g(q) = \begin{bmatrix} 1.31S_{q_1} - 1.64S_{q_1} - 4.73S_{q_1} + 1.64C_{q_3} \\ -4.73S_{q_2}C_{q_1} + 1.64S_{q_3}C_{q_2}C_{q_1} \\ 1.64S_{q_2}C_{q_3}C_{q_1} - 1.64S_{q_1}S_{q_3} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

A continuación se presenta el firmware utilizado en el microprocesador:

Dirección Memoria ROM	Instrucción en lenguaje Ensamblador		
		68	RIO.S PT1 R8
		72	RIO.S PT2 R9
		76	MUL.S R7 R14 R7
0	MOVC.S R0	80	MUL.S R8 R14 R8
4	CTE.S 1.31	84	MUL.S R9 R14 R9
8	MOVC.S R1	88	SIN.S R7 R10
12	CTE.S 1.64	92	SIN.S R8 R11
16	MOVC.S R2	96	SIN.S R9 R12
20	CTE.S -4.73	100	MUL.S R0 R10 R6
24	MOVC.S R3	104	MUL.S R1 R10 R13
28	CTE.S 1.57079632	108	MUL.S R13 R11 R13
32	MOVC.S R4	112	MUL.S R13 R12 R13
36	CTE.I 0	116	SUB.S R6 R13 R6
40	MOVC.S R5	120	MUL.S R2 R10 R13
44	CTE.I 4	124	ADD.S R7 R3 R7
48	MOVC.S R14	128	ADD.S R8 R3 R8
52	CTE.S 0.0007479	132	ADD.S R9 R3 R9
56	MOVC.S R15	136	SIN.S R7 R10
60	CTE.S 20	140	SIN.S R8 R11
64	RIO.S PT0 R7		

DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA ROBOT HUMANOIDE QUE PERMITA EMULAR EL MOVIMINETO DEL CUELLO DE LOS SERES HUMANOS.

144	SIN.S R9 R12	316	CTE.S 1.64
148	MUL.S R13 R11 R13	320	MOVC.S R2
152	ADD.S R6 R13 R6	324	CTE.S -4.73
156	MUL.S R1 R10 R13	328	MOVC.S R3
160	MUL.S R13 R12 R13	332	CTE.S 1.57079632
164	ADD.S R6 R13 R6	336	MOVC.S R14
168	MOVWX R4 R6 0	340	CTE.S 0.000747998250
172	ADD.I R4 R5 R4	344	MOVC.S R15
176	MOVC.S R0	348	CTE.S 21.25
180	CTE.S 1.31	352	RIO.S PT0 R7
184	MOVC.S R1	356	RIO.S PT1 R8
188	CTE.S 1.64	360	RIO.S PT2 R9
192	MOVC.S R2	364	MUL.S R7 R14 R7
196	CTE.S -4.73	368	MUL.S R8 R14 R8
200	MOVC.S R3	372	MUL.S R9 R14 R9
204	CTE.S 1.57079632	376	SIN.S R7 R10
208	MOVC.S R14	380	SIN.S R8 R11
212	CTE.S 0.000747998250	384	SIN.S R9 R12
216	MOVC.S R15	388	MUL.S R1 R10 R6
220	CTE.S 21.25	392	MUL.S R6 R12 R6
224	RIO.S PT0 R7	396	ADD.S R7 R3 R7
228	RIO.S PT1 R8	400	ADD.S R9 R3 R9
232	RIO.S PT2 R9	404	SIN.S R7 R10
236	MUL.S R7 R14 R7	408	SIN.S R9 R12
240	MUL.S R8 R14 R8	412	MUL.S R1 R11 R13
244	MUL.S R9 R14 R9	416	MUL.S R13 R12 R13
248	ADD.S R7 R3 R7	420	MUL.S R13 R10 R13
252	SIN.S R8 R10	424	SUB.S R13 R6 R6
256	SIN.S R7 R11	428	MOVWX R4 R6 0
260	MUL.S R2 R10 R6	432	ADD.I R4 R5 R4
264	MUL.S R6 R11 R6	436	MOVC.S R8
268	SIN.S R9 R12	440	CTE.S 0
272	ADD.S R8 R3 R8	444	MOVC.S R7
276	SIN.S R8 R8	448	CTE.S 1
280	MUL.S R1 R12 R13	452	RIO.S PT10 R6
284	MUL.S R13 R8 R13	456	RIO.S PT11 R5
288	MUL.S R13 R11 R13	460	RIO.S PT0 R4
292	ADD.S R6 R13 R6	464	MUL.S R4 R14 R4
296	MOVWX R4 R6 0	468	SUB.S R5 R4 R5
300	ADD.I R4 R5 R4	472	MUL.S R5 R6 R0
304	MOVC.S R0	476	MOVC.S R1
308	CTE.S 1.31	480	CTE.I 0
312	MOVC.S R1	484	MOVX R1 R2 0

488	ADD.S R0 R2 R0	548	RIO.S PT4 R6
492	MUL.S R0 R15 R0	552	RIO.S PT5 R5
496	WIO.S R0 PT0	556	RIO.S PT2 R4
500	RIO.S PT7 R1	560	MUL.S R4 R14 R4
504	RIO.S PT8 R2	564	SUB.S R5 R4 R5
508	RIO.S PT1 R3	568	MUL.S R5 R6 R0
512	MUL.S R3 R14 R3	572	MOVC.S R8
516	SUB.S R2 R3 R2	576	CTE.I 8
520	MUL.S R2 R1 R9	580	MOVRX R8 R7 0
524	MOVC.S R8	584	ADD.S R0 R7 R0
528	CTE.I 4	588	MUL.S R0 R15 R0
532	MOVRX R8 R7 0	592	WIO.S R0 PT2
536	ADD.S R9 R7 R9	596	DELAY
540	MUL.S R9 R15 R9	600	JUMP 0
544	WIO.S R9 PT1		

4.3 Software.

El software utilizado para el control del sistema mecatrónico se implementó en LabVIEW, lo cual permite que el usuario tenga una interfaz visual amigable y logre controlar el sistema mecatrónico sin ningún problema, se muestra en la figura 4.33.

La interfaz principal de control consta de una ventana donde se encuentra una sección para programar el sistema embebido y otra para iniciar la acción de control. La pestaña que contiene las herramientas para programar el sistema embebido puede cargar un archivo de texto con las instrucciones para controlar el sistema en formato hexadecimal, las cuales se programan directamente en la memoria ROM. Así mismo, la interfaz contiene una pestaña de control, la cual contiene nueve casillas para ingresar datos, esto es de ayuda para el usuario ya que puede controlar el sistema en tiempo real y no es necesario programar el microprocesador, ya que estas casillas fueron diseñadas como puertos de entrada.

Para programar el microprocesador se necesita el archivo que contiene las instrucciones en formato hexadecimal, una vez obtenido se procede a iniciar el software con el botón “inicio” con lo que se encenderá el indicador “conectado” cuando la comunicación Wi-Fi sea establecida con éxito, el siguiente paso es borrar la memoria ROM con el botón “borrar memoria” para que no se generen errores como el tener una instrucción de algún firmware que se haya programado con anterioridad, se comprueba que la memoria este vacía con el botón “leer” y en la casilla lectura deberá mostrar el dato en hexadecimal “FFFFFFFF”, por lo tanto presionamos el indicador “archivo completo” y con el botón “escritura secuencial” se despliega una ventana para que seleccionemos el archivo hexadecimal, la barra indicadora “grabado ROM” representa el porcentaje de avance de grabado. Por último, se proporcionan los parámetros de posiciones, ganancias para iniciar el proceso de control con el botón “Start” y para terminar el proceso se presiona el botón “Stop”.



Figura 4.33: Interfaz visual que controla el sistema mecatrónico.

4.3.1 Compilador

Se utilizó un compilador implementado en LabVIEW, ver figura 4.34, el cual tiene la función de traducir un archivo de texto que contenga instrucciones en lenguaje ensamblador denominado “código fuente”, a un archivo que contiene cada instrucción en formato hexadecimal denominado “código objeto”. El código fuente debe ser formato “.txt”, además debe seguir algunas reglas para su compilación, las cuales son:

- El texto debe estar en mayúsculas.
- Los parámetros de cada instrucción deben estar separados por solo un espacio.
- El número de registro que se ocupará deberá empezar con el indicador “R”.
- El número de puerto que se ocupará deberá empezar con el indicador “PT”.
- Para las instrucciones de comparación se necesita un parámetro de salto de programa, este deberá comenzar con el indicador “L”.
- El compilador acepta comentarios por línea de programa, solo basta con dejar un espacio al final de cada instrucción.
- El compilador no reconoce errores de sintaxis en los parámetros de las instrucciones por lo que se debe cuidar este tipo de errores.

El software diseñado no despliega ningún mensaje de advertencia cuando se tienen errores de sintaxis, la forma en la cual nos podemos percatar de ello es observando la sección que muestra las instrucciones en formato binario, puesto que, cuando el compilador no reconoce una instrucción, se visualiza una fila con números “9”, el formato binario solo maneja “0” y “1” por lo tanto sabremos que existe un error.

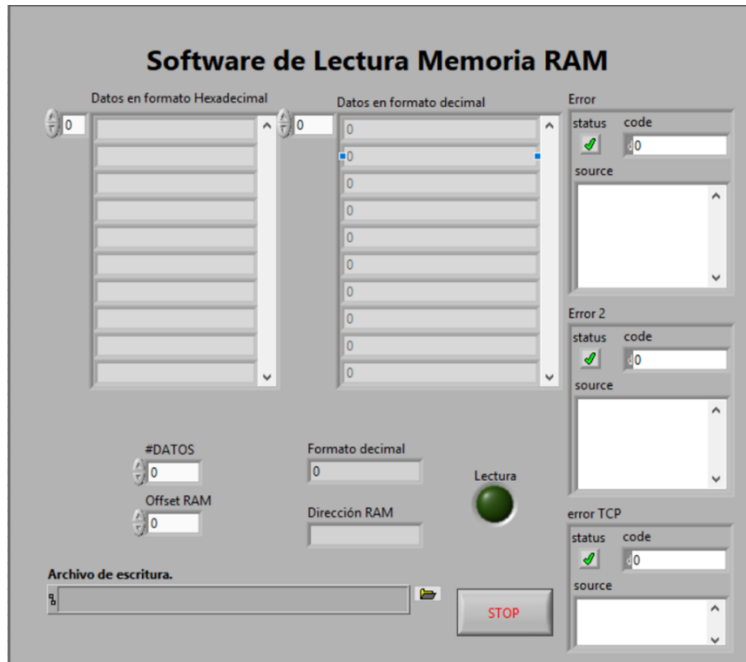


Figura 4.35: software de adquisición de datos de la memoria RAM

Para utilizar este software se necesita en primer lugar estar conectado a la red que genera el módulo Wi-Fi, una vez conectado se procede a brindarle la ubicación del archivo que se creará con la información obtenida, el cual será el resultado final, se procede a proporcionar el número de datos que se desean obtener, esto en la casilla “#DATOS”. Con lo anterior se logra obtener la información contenida en la memoria RAM.

4.4 Conclusiones.

En este capítulo se logró diseñar la etapa de control para el sistema mecatrónico presentado en esta tesis. Se utilizó satisfactoriamente un microprocesador diseñado en la Maestría en Ciencia de la Electrónica Opción Automatización, el cual se implementó en un FPGA Cyclone IV de la familia Altera, además la electrónica de potencia cumple los requerimientos de los actuadores y el sistema embebido. Por último, se logró implementar la interfaz visual en el software LabVIEW para el control del sistema mecatrónico mediante comunicación inalámbrica Wi-Fi, lo cual permite reducir las conexiones físicas y da la pauta para implementar un control a distancia por medio de una red de internet.

Resultados Experimentales.

En este capítulo se presentan los resultados de las metodologías propuestas anteriormente. En primer lugar, se puede observar en la figura 5.1 que se logró alcanzar el objetivo de diseñar una estructura que emule el movimiento de flexión y extensión del cuello humano, cabe mencionar que los límites o rangos máximos de este movimiento son cuando la cabeza humanoide llega a la base, por tal motivo excede los límites de la morfología humana, basta con limitarlos mecánicamente para un buen funcionamiento. Se aprecia también los rangos de movimiento propuestos al inicio de este trabajo.

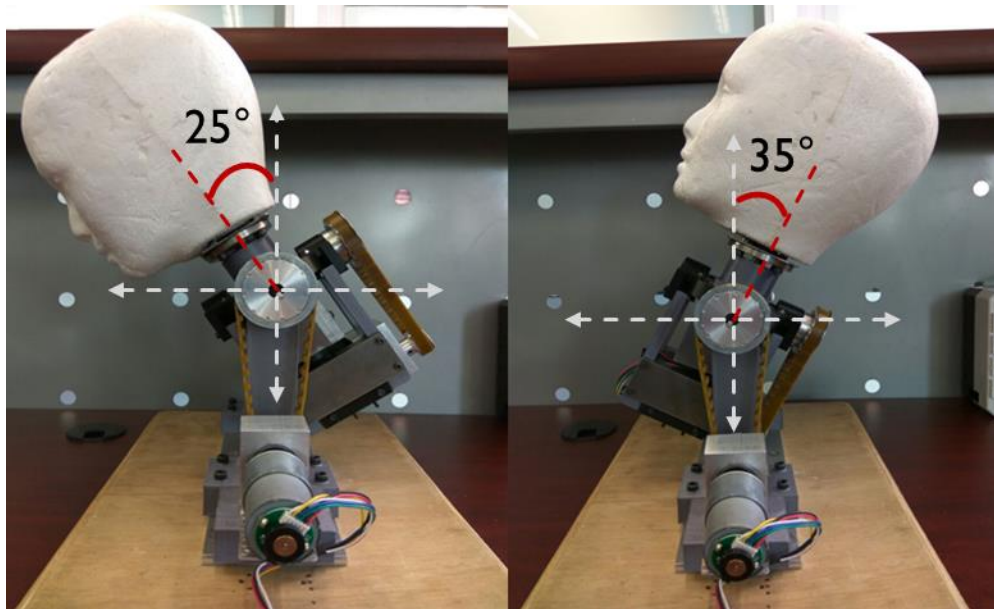


Figura 5.1: Movimiento de Flexión (Izquierda) y Extensión (derecha)

Para el movimiento de inclinación bilateral se presenta que la estructura mecánica excede nuevamente los límites de la morfología humana, se observa que los contrapesos adjuntos a esta estructura sirven de tope mecánico, con lo cual no es necesario restringirlos con alguna otra pieza. Se observa en la figura 5.2 el movimiento de inclinación bilateral.



Figura 5.2: Movimiento de inclinación Bilateral.

Para el movimiento de rotación se tiene que el mecanismo diseñado no presenta ningún límite en su movimiento, esto es un inconveniente pues la cabeza del robot humanoide cuenta con cables que podrían enredarse, por tal motivo, se restringirá su movimiento con un tope mecánico. Se observa en la figura 5.3 el movimiento de rotación.

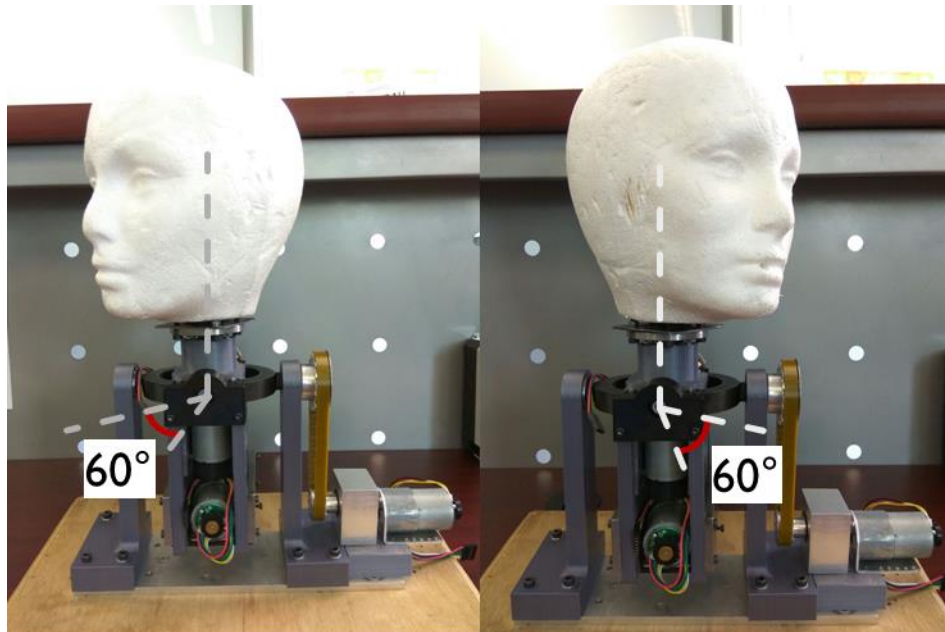


Figura 5.3: Movimiento de Rotación.

En la figura 5.4 se pueden observar las poleas dentadas que se diseñaron para la transmisión de movimiento, así mismo, se observan las cajas de baleros que liberan a los motores de la tensión provocada por la banda dentada.

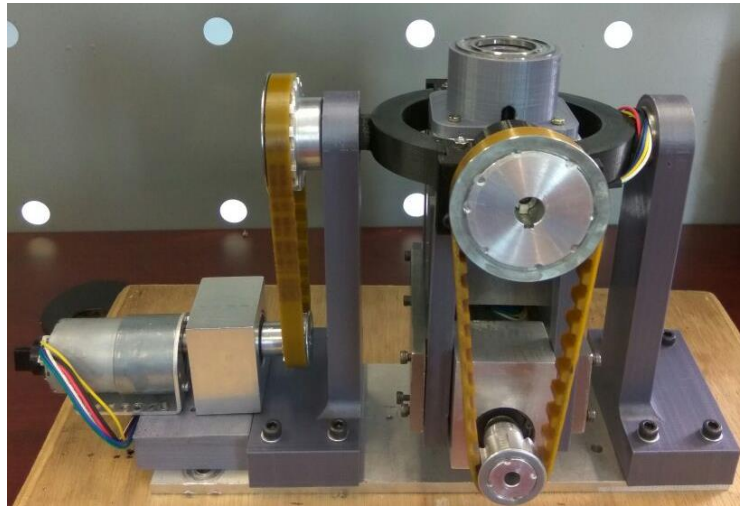


Figura 5.4: Mecanismo esférico de 3 GDL.

En la figura 5.5 se observa la integración del sistema mecatrónico.

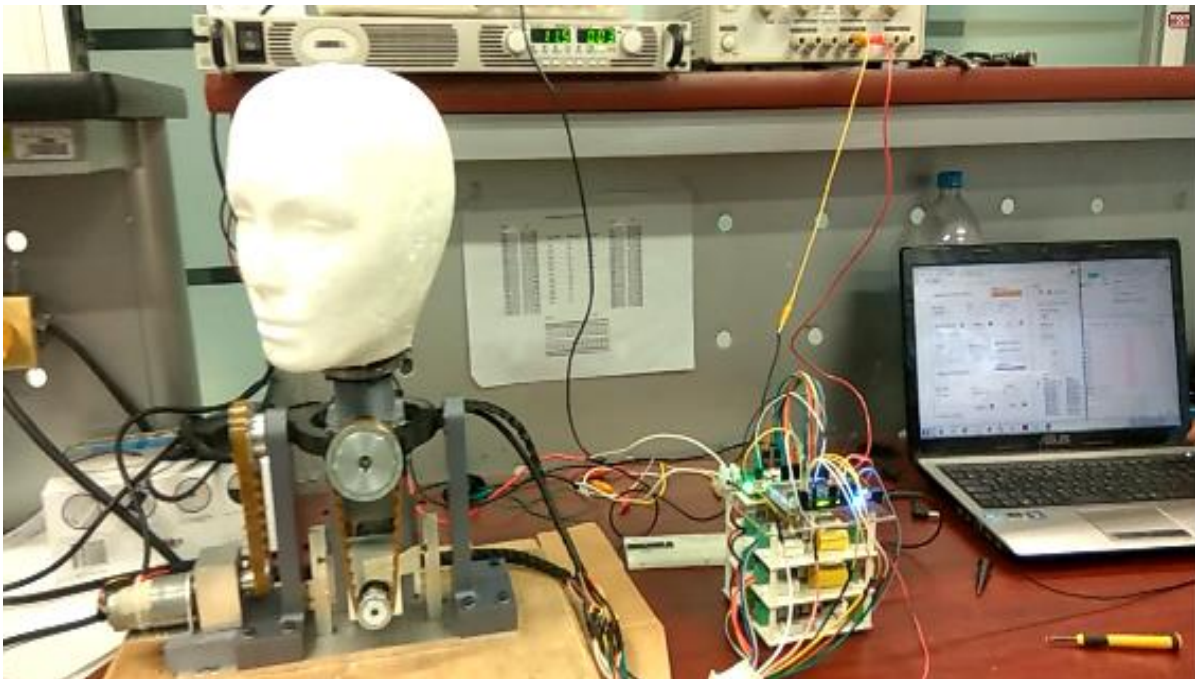


Figura 5.5: Sistema mecatrónico que emula el movimiento del cuello de los seres humanos.

5.1 Simulación y estudio de movimiento en SolidWorks.

Al realizar el estudio de movimiento se encontró que los datos de torque generados por SolidWorks contenían ruido, por tanto se realizó un filtrado pasa bajas en Matlab, obteniendo así gráficos más detallados. Para la simulación del torque requerido por los actuadores al designar las posiciones deseadas expresadas en el capítulo 3 se encontró para q_1 se tiene un error de cálculo de 0.25 Nm, también se aprecia una variación entre los datos comparados en el segundo 0.35, ver figura 5.6.

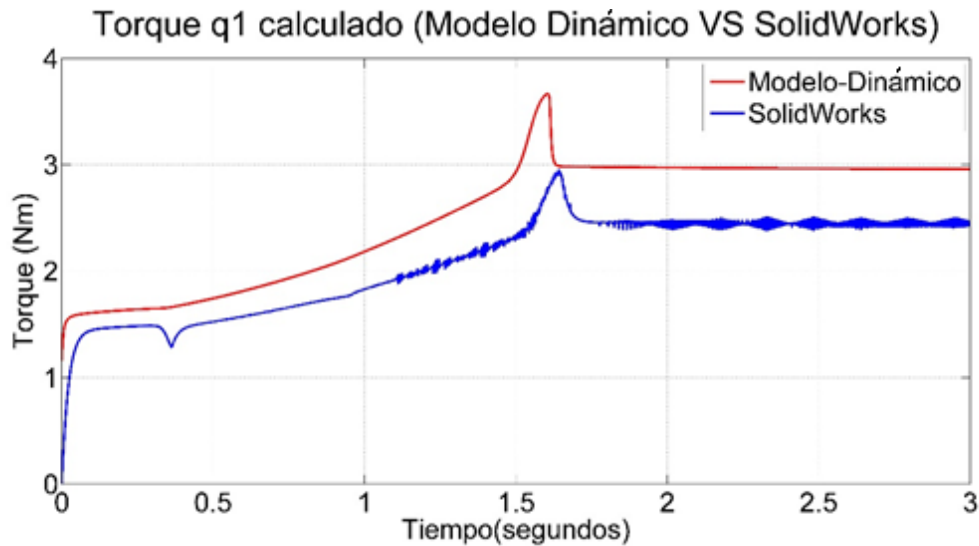


Figura 5.6: Comparación torque motor 1.

Para q_2 se encontró un error de cálculo de 0.073 Nm, se aprecia una variación en el segundo 0.35 y 1.6, aunque el modelo dinámico presenta el mismo comportamiento, ver figura 5.7.

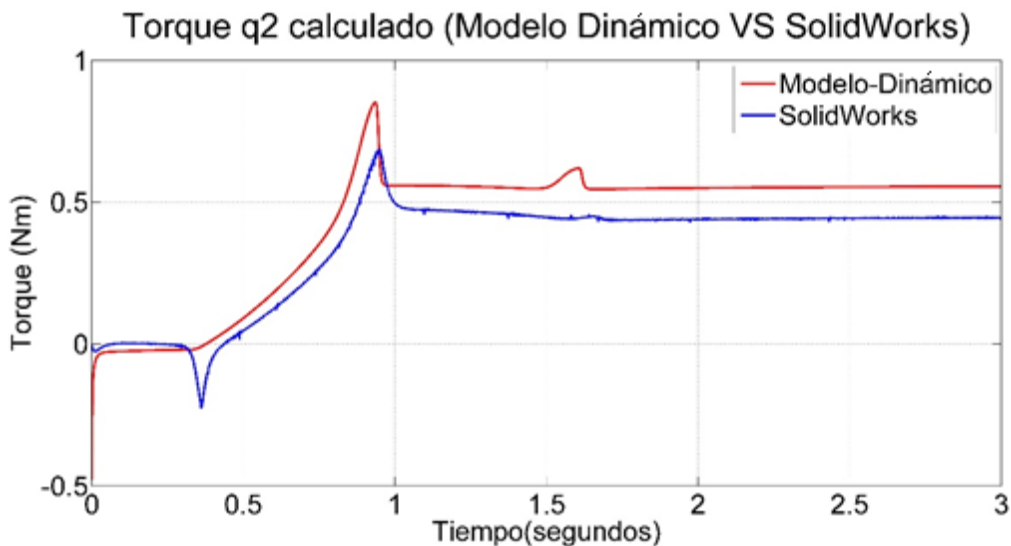


Figura 5.7: Comparación torque motor 2.

Para q3 se encontró un error de cálculo de 0.03 Nm, se aprecia una variación en el segundo 0.35 y 1.6, el modelo dinámico tiene el mismo comportamiento que el estudio de movimiento, aunque presenta un pico de torque de magnitud 0.35 Nm, ver figura 5.8.

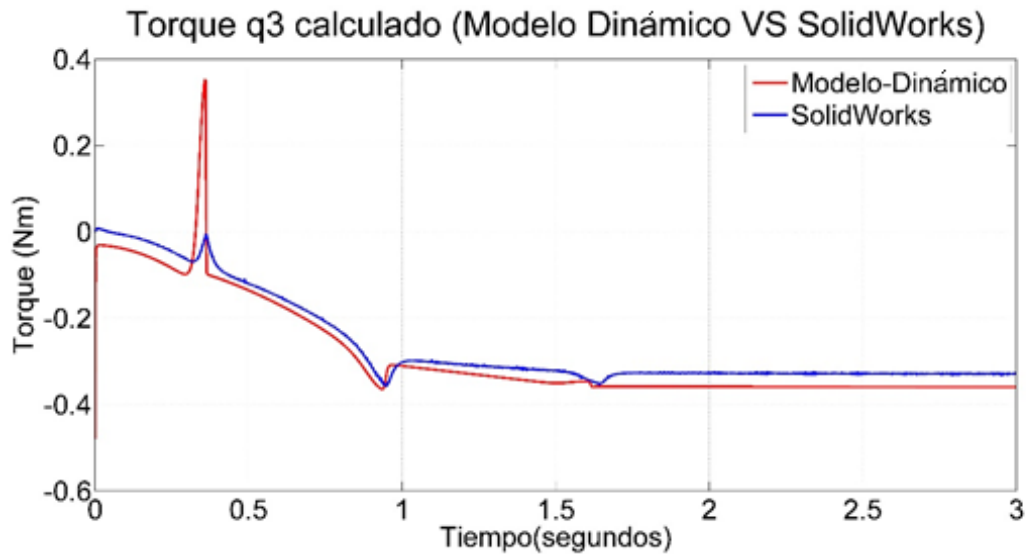


Figura 5.8: Comparación torque motor 3.

5.2 Caracterización de los motores.

Gráfica del comportamiento del torque variando el ciclo de trabajo del PWM a un voltaje nominal con una frecuencia de 110Hz para el motor 1.

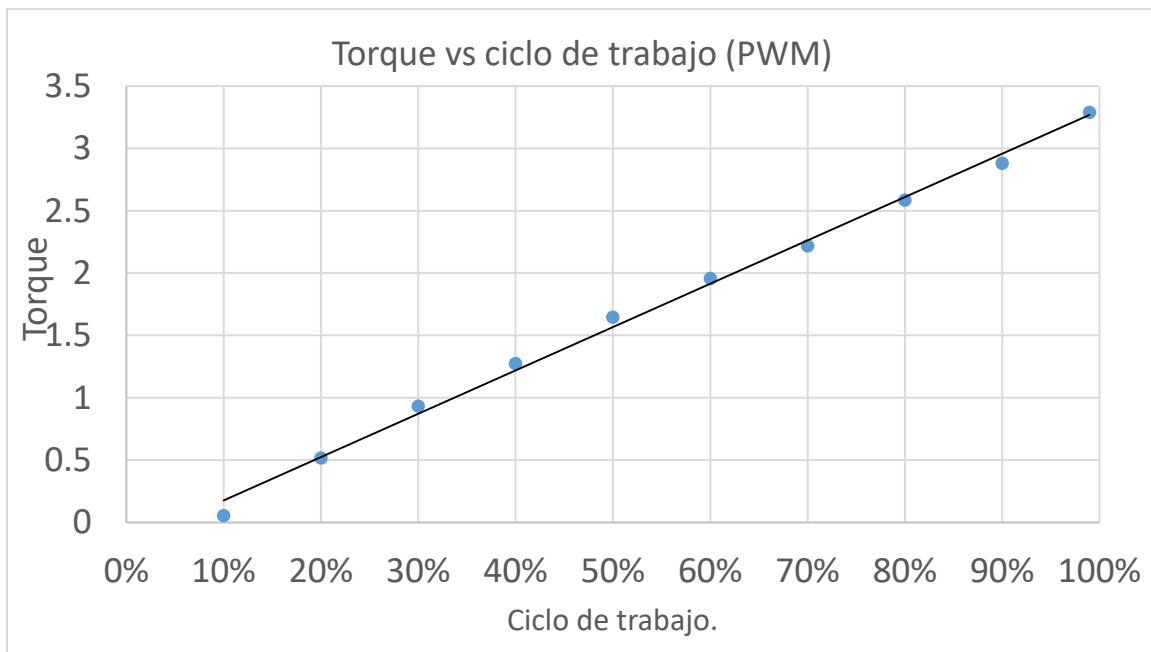


Figura 5.9: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 1.

Gráfica del comportamiento del torque variando el ciclo de trabajo del PWM a un voltaje nominal de 10.5 V con una frecuencia de 135Hz para el motor 2.

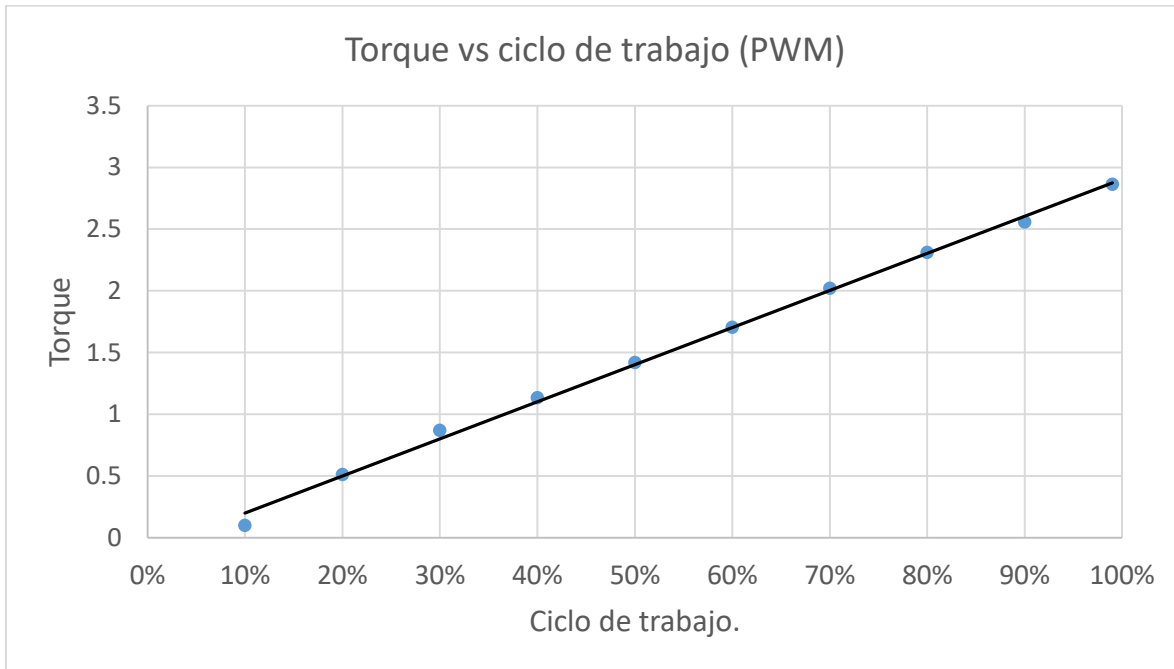


Figura 5.10: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 2.

Gráfica del comportamiento del torque variando el ciclo de trabajo del PWM a un voltaje nominal de 10.5 V con una frecuencia de 125Hz para el motor 3.

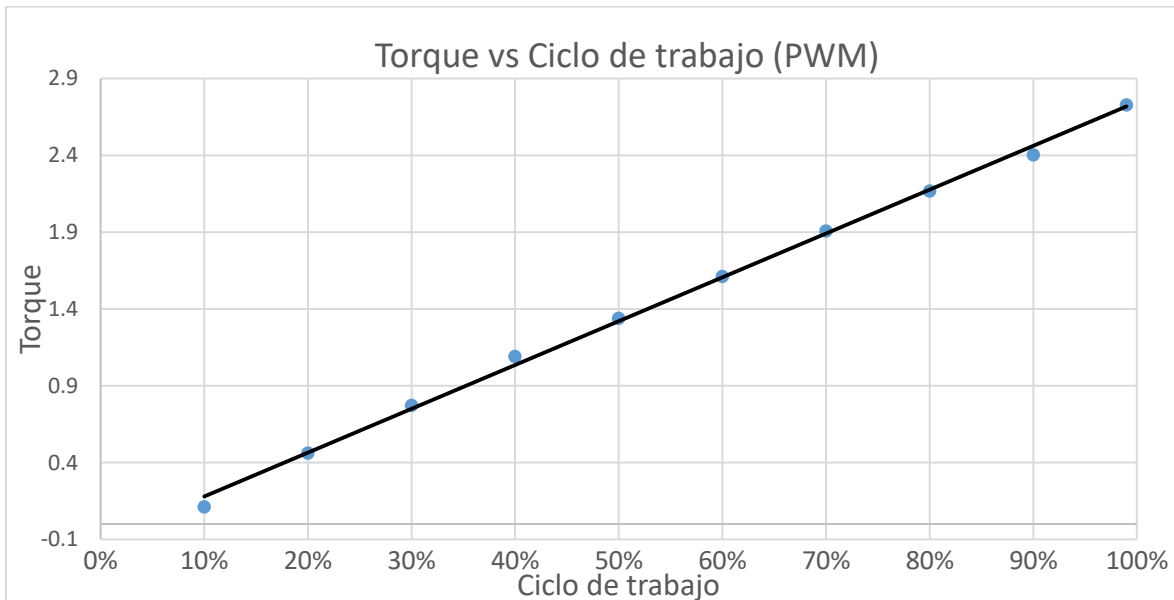


Figura 5.11: Gráfica de la respuesta de Torque lineal ante una señal PWM del motor 3.

5.3 Control de posición (Controlador Proporcional con Par Gravitacional).

Se realizaron pruebas con el sistema mecatrónico diseñado con el firmware presentado en la sección 4.2, donde se implementó un controlador proporcional con par gravitacional, cabe mencionar que el modelo dinámico obtenido en este trabajo nos proporciona el elemento de par gravitacional. Una vez programado el microprocesador se realizaron pruebas y posteriormente se adquirieron los datos guardados en la memoria RAM, cabe mencionar que los datos de velocidad se calcularon posteriormente a las pruebas, ya que no se cuenta con un sensor de velocidad, por tanto, se conoce la posición y se deriva aplicando el método sencillo de Euler.

En la figura 5.12 se presenta la respuesta del sistema al realizar control de posición en el eslabón de flexo-extensión, la posición deseada es de 10° y se utilizó una ganancia de 0.3, se logra observar que la respuesta del torque tiene la misma trayectoria que el error de posición, esto indica que la energía entregada por los actuadores se comporta de manera lineal y corrobora la metodología presentada anteriormente que muestra la caracterización de estos elementos electromecánicos. Además se observa un error en estado estacionario de 0.8° , esto es característico de un controlador proporcional ya que se debe sintonizar las ganancias y es un método que se realiza de manera empírica.

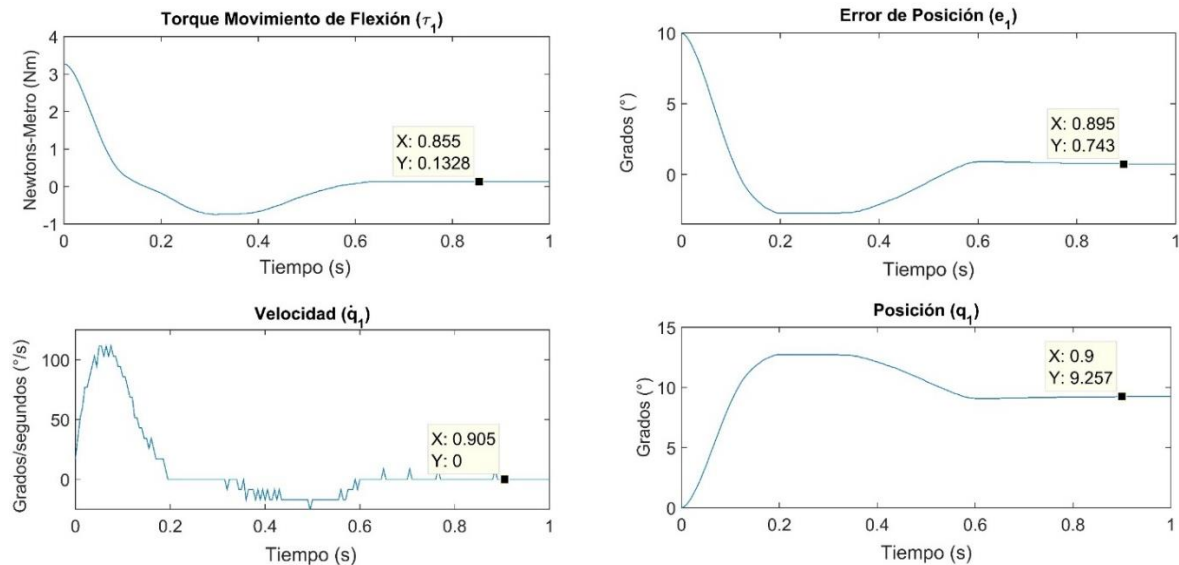


Figura 5.12: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de flexión

En la figura 5.13 se presenta la respuesta del sistema al realizar control de posición en el movimiento de inclinación bilateral, la posición deseada es de 10° y se utilizó una ganancia de 0.3, se puede apreciar que el comportamiento de este movimiento del sistema es oscilante, debido a las bandas de transmisión de potencia que actúan de esta manera, se observa un error en estado estacionario de 1.1° , aunque para esta aplicación la magnitud del error puede ser despreciable ya que no es un sistema de precisión

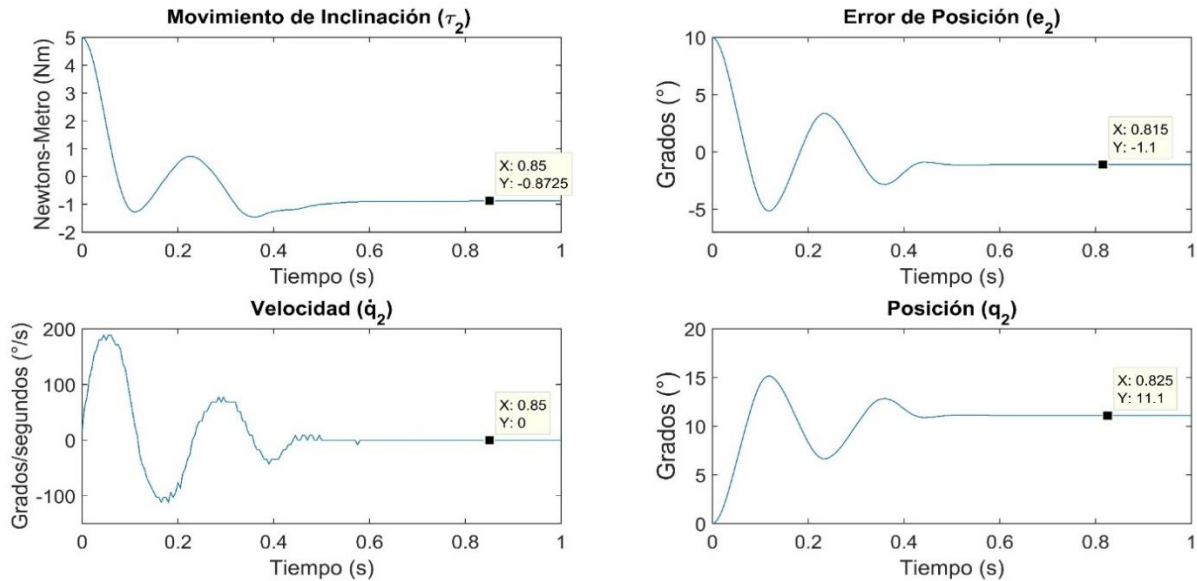


Figura 5.13: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de flexión.

En la figura 5.14 se presenta la respuesta del sistema al realizar control de posición en el movimiento de rotación, la posición deseada es de 35° y se utilizó una ganancia de 0.07, se puede observar que en este movimiento el sistema responde efectivamente sin ningún tipo de perturbación ya que es el movimiento que menos dinámica representa, cabe mencionar que el torque entregado por el actuador se comporta de forma lineal, el error en estado estacionario es de 1.4° lo que representa que la ganancia ocupada en este movimiento es poca y se deben sintonizar para mejores efectos de control.

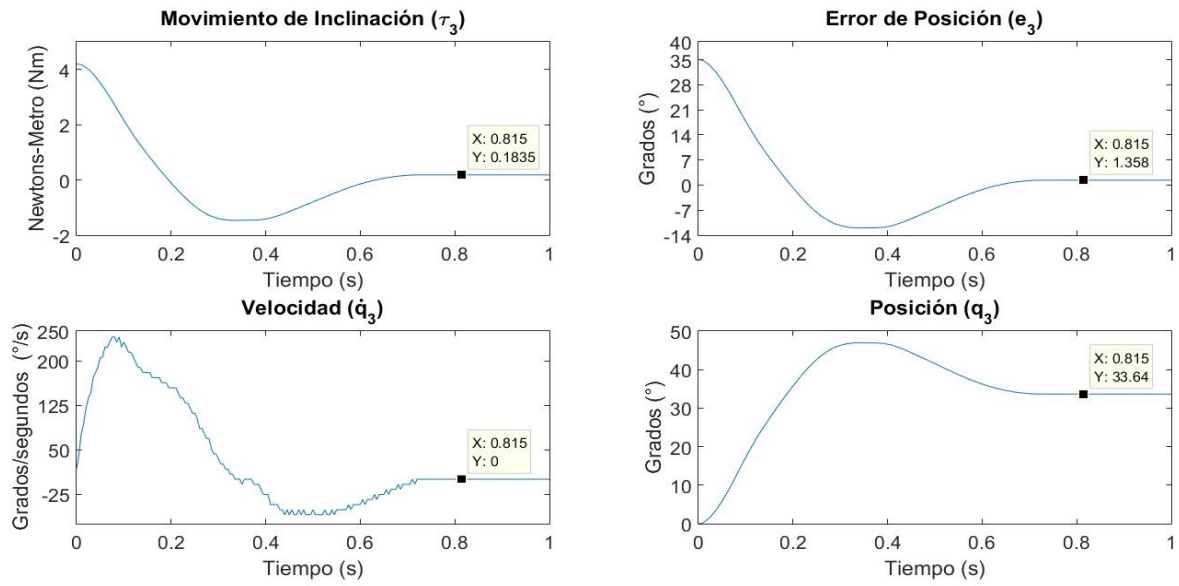


Figura 5.14: Datos de la acción de control del sistema para el movimiento de rotación.

Conclusiones Generales.

Se lograron cumplir los objetivos de esta tesis, tanto el general como los específicos, ya que el sistema mecatrónico desarrollado permite sostener el peso de la cabeza del robot humanoide, emulando el movimiento del cuello de los seres humanos y realizando acciones de control de posición con un controlador proporcional a través de una interfaz gráfica por comunicación Wi-Fi.

La estructura mecánica está basada en los mecanismos esféricos ya que el espacio de trabajo de estos son análogos a los tres principales movimientos del cuello de los seres humanos, por otra parte, presenta rigidez para soportar una carga de 3.2 Kg, logrando adecuar la mecánica para reducir el centro de masa de la cabeza del robot humanoide con contrapesos.

El modelo dinámico de un robot es muy importante para representar los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica, tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas y de coriolis y pares gravitacionales que son propios del robot, además es fundamental para el diseño y construcción del sistema mecánico, ya que permite comprobar si son convenientes los cambios en la estructura mecánica del robot, por tal motivo se obtuvo satisfactoriamente la cinemática del robot esférico propuesto en este trabajo, a través de la metodología Denavit-Hartenberg que es válida para robots de estructura serial, logrando posicionar los sistemas de referencia adecuadamente para expresar los fenómenos inerciales que producen la cabeza robótica como los contrapesos propuestos, cabe resaltar que el sistema desarrollado en esta tesis se contempla como un sistema híbrido, ya que la estructura mecánica tiene soportes que se conectan a la base del sistema siendo esto una característica de los robots paralelos pero la dinámica de cada actuador está desacoplada, es decir, el movimiento de cada articulación no restringe a las demás.

El estudio de movimiento realizado en SolidWorks, corrobora el modelo matemático desarrollado, aunque se desconoce el método por el cual calcula el torque el software CAD, el comportamiento del modelo matemático es idéntico al estudio de movimiento.

Aplicando un controlador con estructura tangente hiperbólica, se realizó control de posición del mecanismo de manera efectiva.

Se logró diseñar una estructura mecánica que emule los movimientos del cuello de los seres humanos, que es de gran importancia para la interacción robot-humano. La interfaz gráfica, la cual se comunica por protocolo Wi-Fi a una computadora donde el usuario programa el microprocesador, proporciona la posición deseada y las ganancias para cada actuador, es una forma simple de controlar el sistema, además, la comunicación inalámbrica es una característica que reduce la complicación de tener conexiones físicas y esto reduce la dificultad de implementar el sistema mecatrónico en el robot humanoide.

Apéndices.

Apéndice A: Ponencias

1º Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología ECITEC 2017.



Universidad Autónoma de Baja California
Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas

1er. Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología 2017

Otorga la siguiente

CONSTANCIA

a

**Francisco José López Cortés, Sergio Vergara Limón,
María Aurora Diozcora Vargas Treviño, A. Palomino, David Eduardo Pinto
Avedaño, Darnes Vilariño Ayala**

Por su participación en el Eje Temático Electrónica y Bioinstrumentación con el trabajo titulado
**Desarrollo de un Sistema Mecatrónico para Robot Humanoide que
permite Emular el Movimiento del Cuello de los Seres Humanos**
Tijuana, Baja California, México, del 20 al 23 de septiembre del 2017



Mtro. Alonso Hernández Guitrón
Director de la ECITEC

Dr. María de los Angeles Zárate López
Coordinadora de Posgrado e Investigación

Dr. Luis Jesús Villarreal Gómez
Presidente del Comité Organizador

Dr. Alberto Hernández Maldonado
Presidente del Comité Científico

XXIII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.



**La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
otorga el presente reconocimiento al:
Ing. Francisco José López Cortés**

Como Participante en su XXIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL

Al haber presentado el artículo A1_187: "Disco y modelo dinámico de robot esférico de 3-DOF para cuello robótico de robot humanoide". Publicado en la Memorias del Congreso.

Cuernavaca, Morelos a 20 de Septiembre 2017.

DR. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ
Presidente de la SOMIM



Apéndice B: Publicaciones.



Desarrollo de un sistema mecatrónico para robot humanoide que permita emular el movimiento del cuello de los seres humanos.

F.J. López¹, S. Vergara¹, M.A. Vargas¹, A. Palomino¹, D. Pinto², D. Vilariño²

¹Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

²Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

Resumen. - En el presente trabajo se muestra el diseño de un sistema mecatrónico, el cual emula los movimientos del cuello humano, ya que sostendrá la cabeza de un robot humanoide (Arthur) desarrollado por la empresa Hanson Robotics. El diseño mecánico se basa en un robot esférico de 3 grados de libertad (3-GDL), se desarrolla el modelo dinámico a través de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange. La etapa de control es una tarjeta de desarrollo FPGA (arreglos de compuertas programables en campo) de la familia Cyclone IV, la etapa de potencia se basa en transistores BJT, se implementa el controlador Tangente hiperbólico y una interfaz de comunicación WiFi para configurar el robot desde una PC con ayuda del software Labview. Como resultado se muestra la integración del sistema mecatrónico, la interfaz desarrollada junto con la comunicación FPGA-PC y control de posición. El trabajo futuro será la implementación del sistema en el robot humanoide.

Palabras clave: Sistema mecatrónico, Robot humanoide, Modelo dinámico, FPGA, WiFi.

Abstract. - The present work shows the design of a mechatronic system, which emulates the movements of the human neck, as it will support the head of a humanoid robot (Arthur) developed by Hanson Robotics. The mechanical design is based on a spherical robot of 3 degrees of freedom (3-GDL), the dynamic model is developed through the Euler-Lagrange equations of motion. The control stage is a FPGA (Field Programmable Gate Arrays) development board, the power stage is based on BJT transistors, the hyperbolic tangent controller and a WiFi communication interface are implemented to configure the robot From a PC with the help of Labview software. As a result, the integration of the mechatronic system, the interface developed together with the FPGA-PC communication and position control, is shown. Future work will be the implementation of the system in the humanoid robot.

Key words: Mechatronic system, Humanoid robot, Dynamic model, FPGA, WiFi.

1. Introducción

Los avances de la robótica en la actualidad no se limitan a entornos industriales, también se han revolucionado los semblantes y las funciones de los robots, logrando introducirlos a un entorno social, dando pie a los robots de servicio, denominados humanoides por su apariencia, los cuales realizarán

tareas en beneficio de la sociedad, labores cotidianas o con fines terapéuticos, por ejemplo, la rehabilitación de niños con problemas de lenguaje, la detección de desórdenes de comportamiento en jóvenes y en terapia ocupacional geriátrica. Se han desarrollado robots humanoides capaces de replicar las expresiones faciales del ser humano y lograr entablar una conversación, tal es el caso de Arthur, desarrollado por la empresa Hanson Robotics [1].

Tema A3b. Mecanismos y Robótica: Diseño y modelado mecanismo esférico.

“Diseño y modelo dinámico de robot esférico de 3-DOF para cuello robótico de robot humanoide”

F.J. López^a, S. Vergara^a, M.A. Vargas^a, A. Palomino^a, D. Pinto^b, D. Vilariño^b

^aFacultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72570, México.

^bFacultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72570, México.

*Autor contacto: lopcorp.z@gmail.com

RESUMEN.

En el presente trabajo se muestra el diseño mecánico, los parámetros Denavit-Hartenberg, la cinemática directa y el modelo dinámico de un robot esférico de 3-GDL, el cual se implementará como cuello en un robot humanoide (Arthur) desarrollado por la empresa Hanson Robotics[1]. El diseño de la estructura del robot permite emular los principales movimientos que realiza el cuello humano y contempla una capacidad de carga de 3.2 kilogramos. Mediante uso del software SolidWorks, se adquieren los parámetros físicos del sistema y se realiza un estudio de movimiento graficando el torque de los actuadores, así mismo, se genera una simulación de control de posición en Matlab utilizando un controlador (Tangente hiperbólica). Los resultados obtenidos corroboran el modelo dinámico, obteniendo así una base para la construcción del sistema.

ABSTRACT.

This paper shows the mechanical design, Denavit-Hartenberg parameters, direct kinematics and the dynamic model of a 3-DoF spherical robot, which will be implemented as a neck in a humanoid robot (Arthur) developed by Hanson Robotics. The design of the robot structure allows emulate the main movements of the human neck and contemplates a load capacity of 3.2 kilograms. Using SolidWorks software, the physical parameters of the system are acquired and a motion study is performed, graphing the torque of the actuators. In the other hand, a position control simulation in Matlab is generated using a controller (Hyperbolic Tangent). The results obtained corroborate the dynamic model, thus obtaining a basis for the construction of the system.

Palabras Clave: Robot esférico 3GDL, Modelo dinámico, Cuello robótico, Cinemática directa.

Nomenclatura:

g	Fuerza de gravedad.	τ	Torque.
H_{n-1}^n	Matriz de transformación homogénea.	$\mathcal{L}(q, \dot{q})$	Lagrangiano.
HR_z	Matriz de rotación pura alrededor del eje z.	$K(q, \dot{q})$	Energía Cinética.
HT_z	Matriz de traslación pura sobre el eje z.	$U(q)$	Energía Potencial.
HT_x	Matriz de traslación pura sobre el eje x.	q	Vector de coordenadas generalizadas.
HR_x	Matriz de rotación pura alrededor del eje x.	q_d	Vector de posición articular deseada.
I	Momento de inercia.	q	Vector de error de posición.
kp	Ganancia proporcional.	\dot{q}	Vector de velocidades articulares.
k_v	Ganancia derivativa.	\ddot{q}	Vector de aceleraciones articulares.
m_1	Masa del eslabón 1.	$M(q)$	Matriz de inercia.
m_2	Masa del eslabón 2.	$C(q, \dot{q})$	Matriz de fuerzas centrífugas y de coriolis.
m_3	Masa del eslabón 3.	$g(q)$	Vector de par gravitacional.
Nm	Newton-metro.	v	Velocidad.
lc_1	Distancia al centro de masa del eslabón 1		
lc_2	Distancia al centro de masa del eslabón 2.		

Apéndice C: Certificado TOEFL.

DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA ROBOT HUMANOIDE QUE PERMITA EMULAR EL MOVIMINETO DEL CUELLO DE LOS SERES HUMANOS.

TOEFL ITP Score Report

Name of Institution:	FACULTAD DE LENGUAS DE LA BUAP		
Name:	LOPEZ FRANCISCO JOSE	Student Number:	215471012
DOB:	03/21/1990	Sex:	M
		Degree:	
Native Country:	Mexico	Times Taken TOEFL:	1
Native Language:	Spanish		
Scaled Scores:	Listening Comprehension:	57	Test Date: 04/21/2017
	Structure & Written Expression:	44	Form: TOEFL ITP
	Reading Comprehension:	55	
	Total Score:	520	



The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL® ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL® ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

113319-16573 • FB516R100 • Printed in U.S.A.

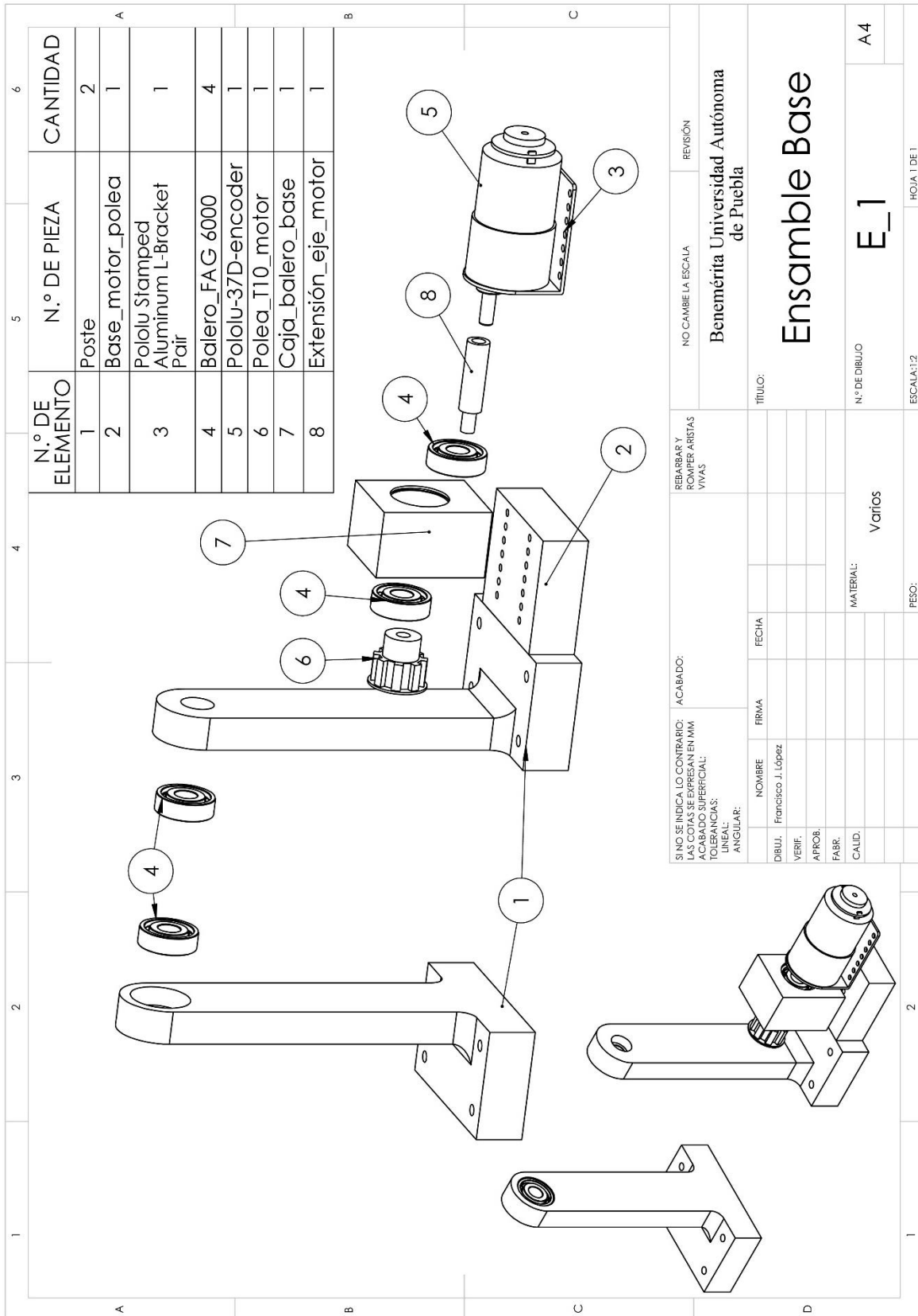
I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Sen

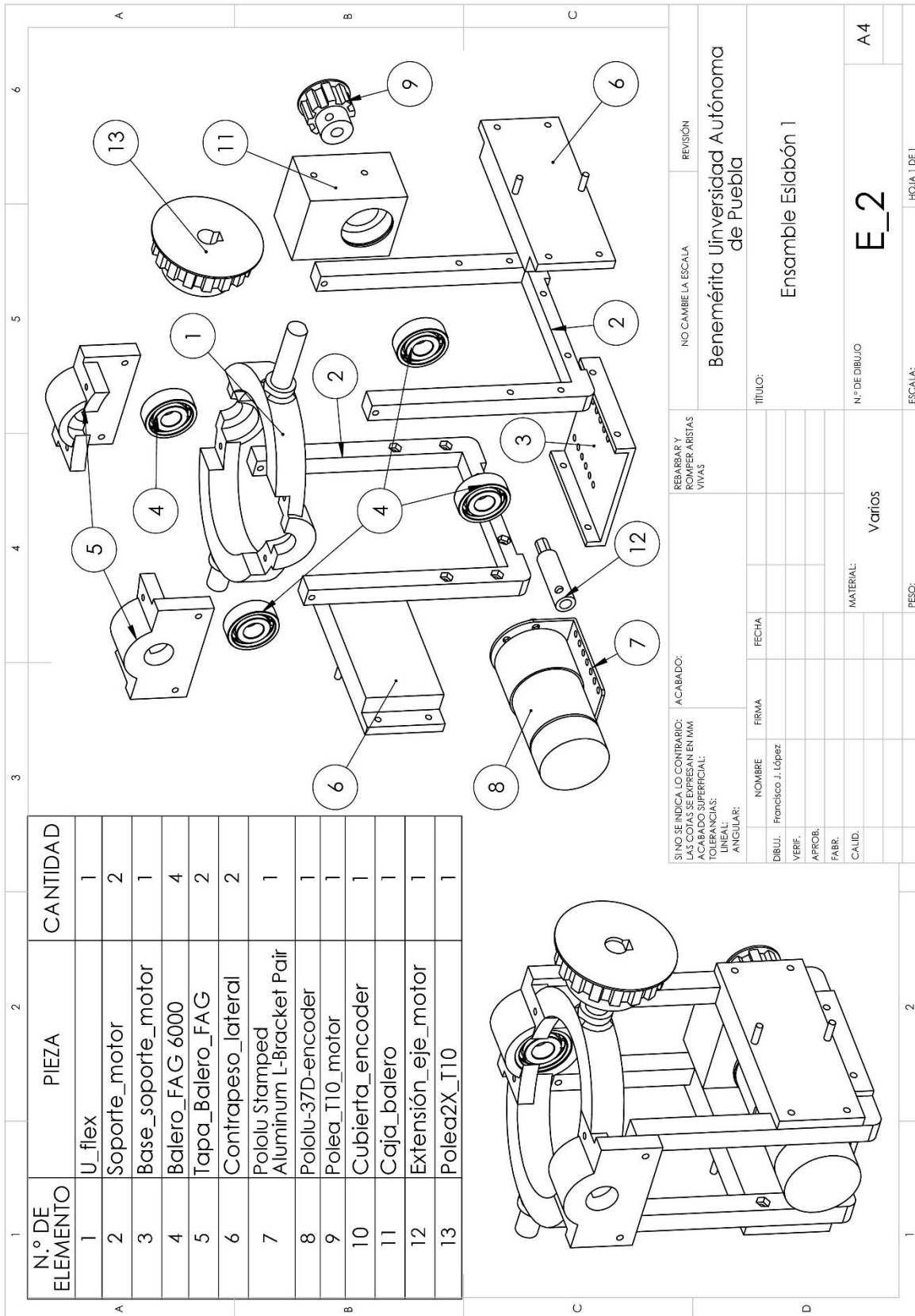
Student's File C
Do Not C

Apéndice D: Planos

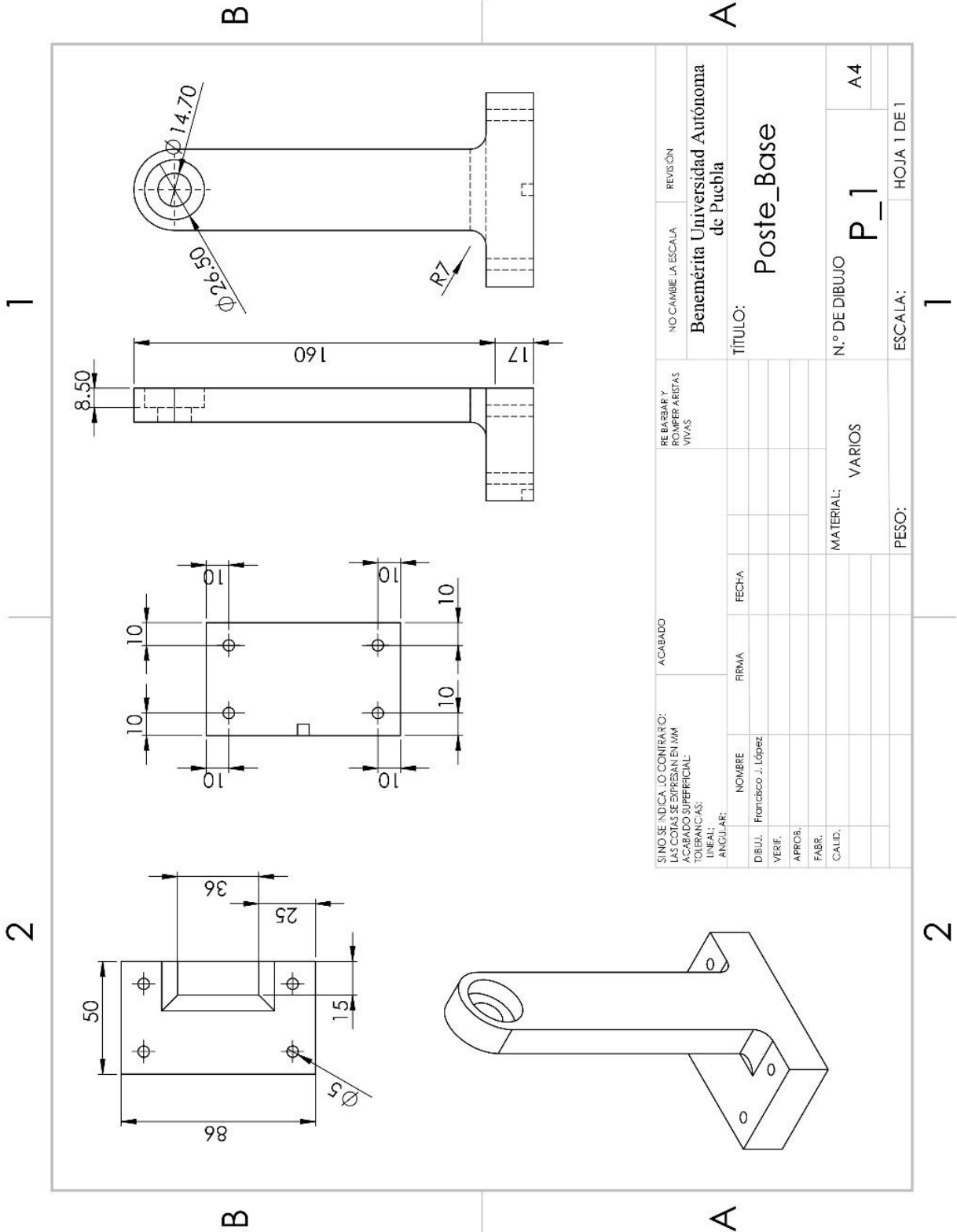
Ensamble Base.



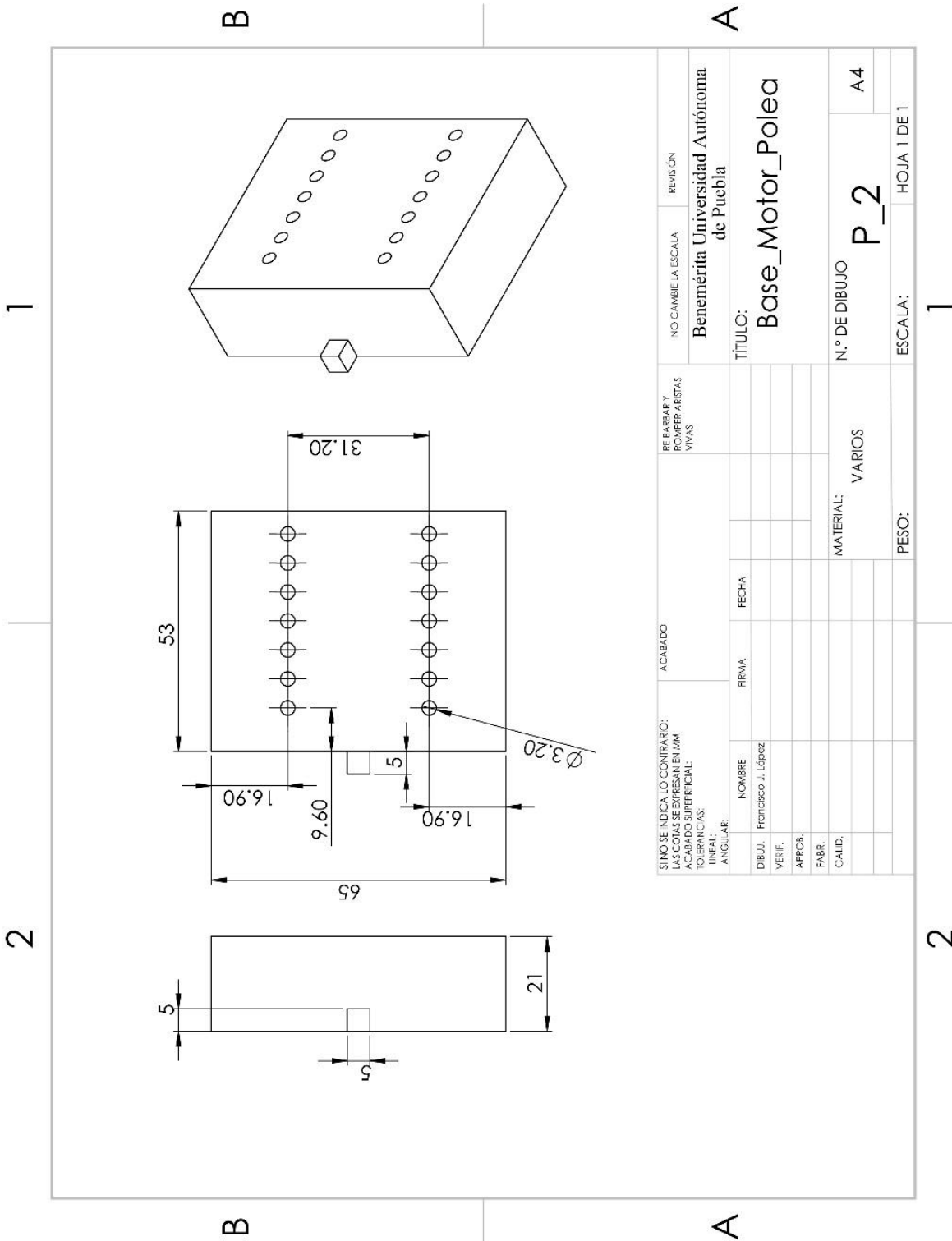
Ensamble eslabón 1.



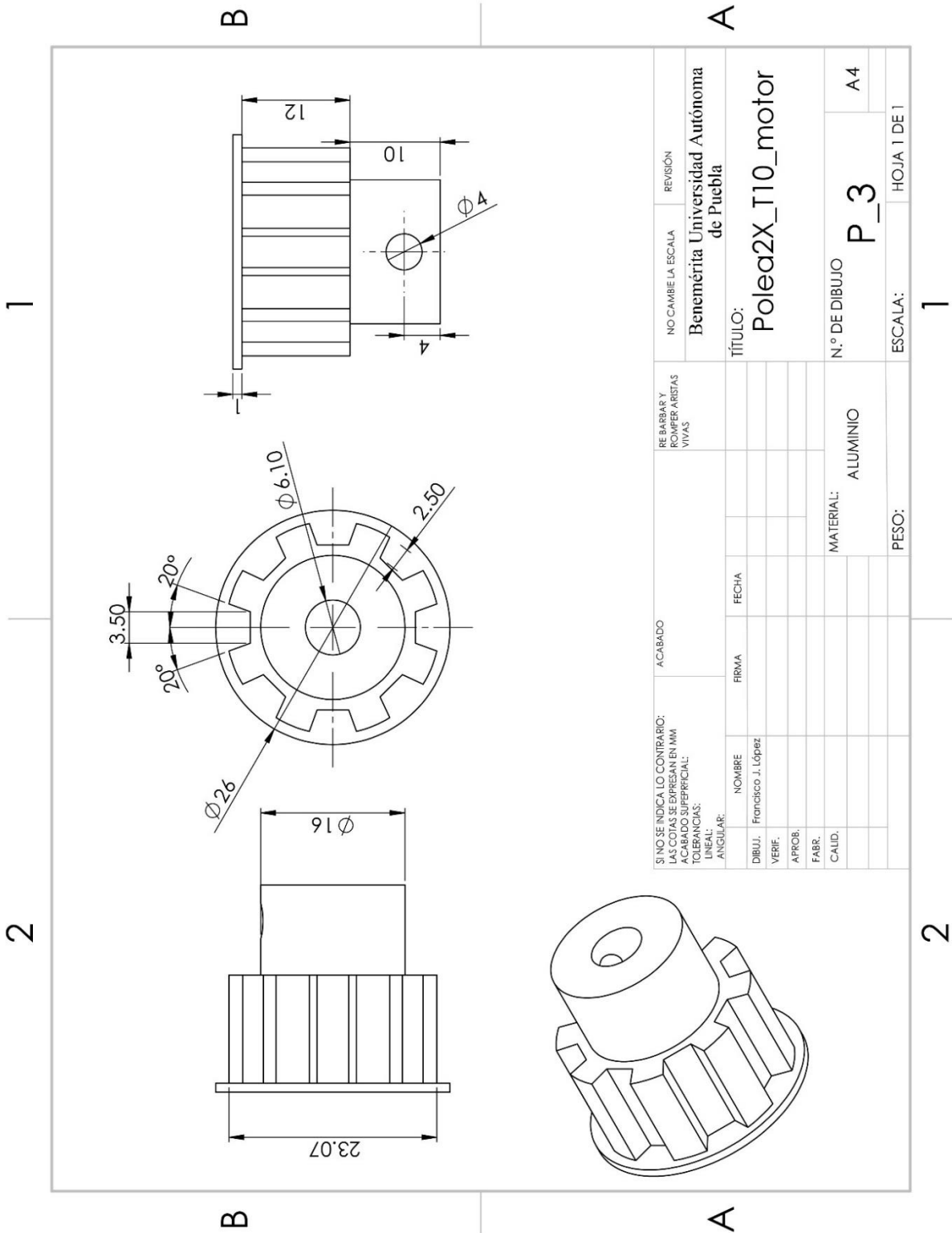
Poste Base.



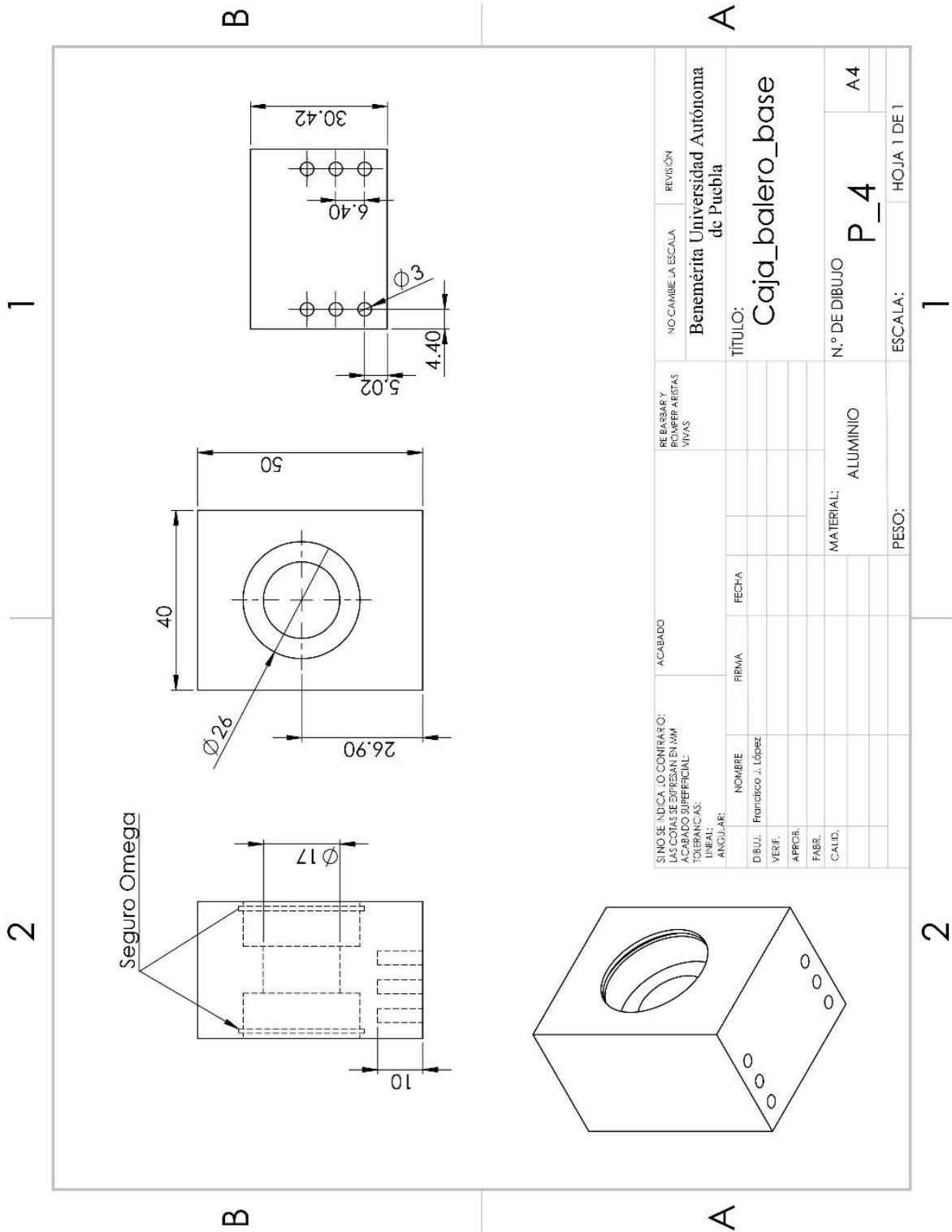
Base Motor Polea.



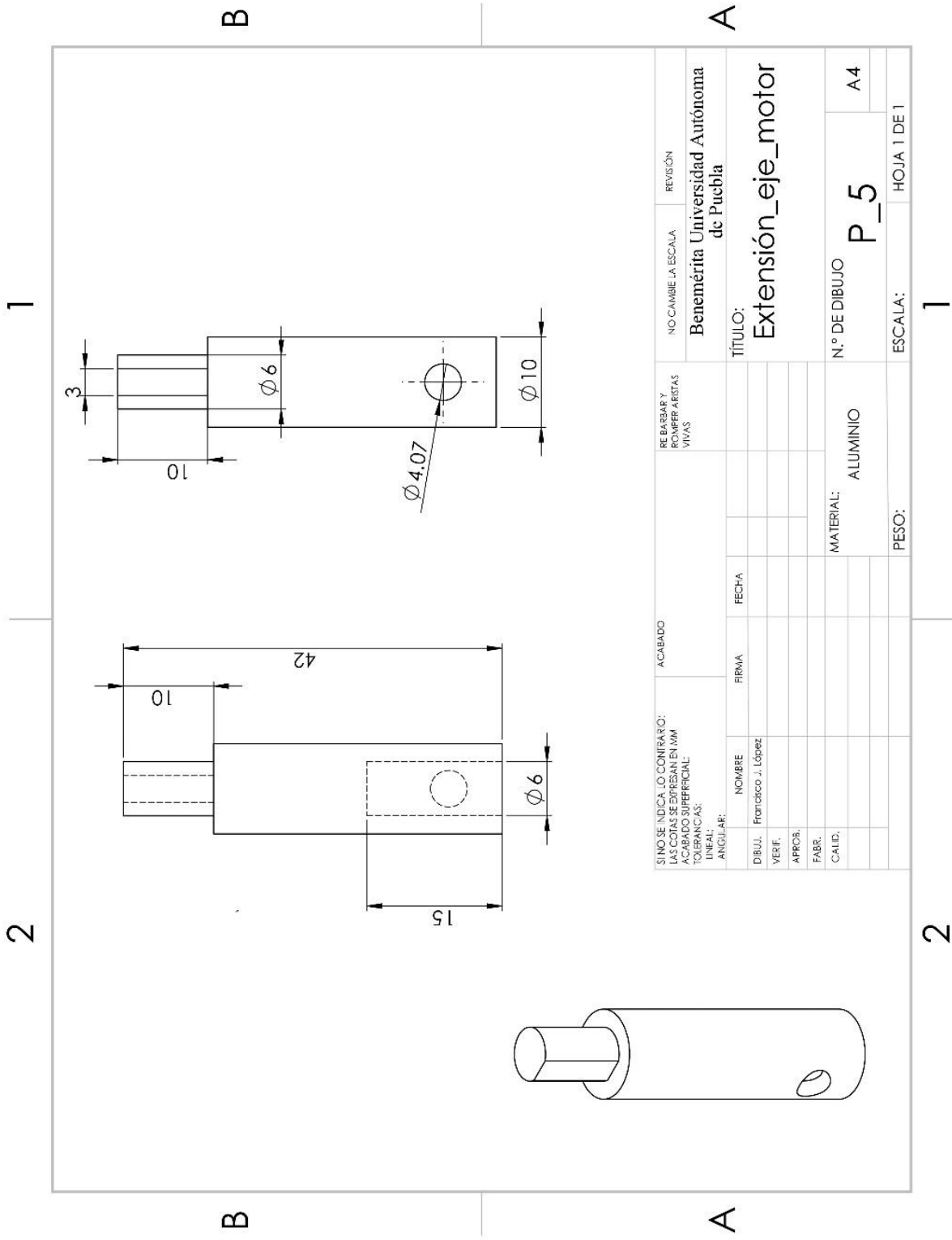
Polea dentada T10 motor.



Caja Balero Base.

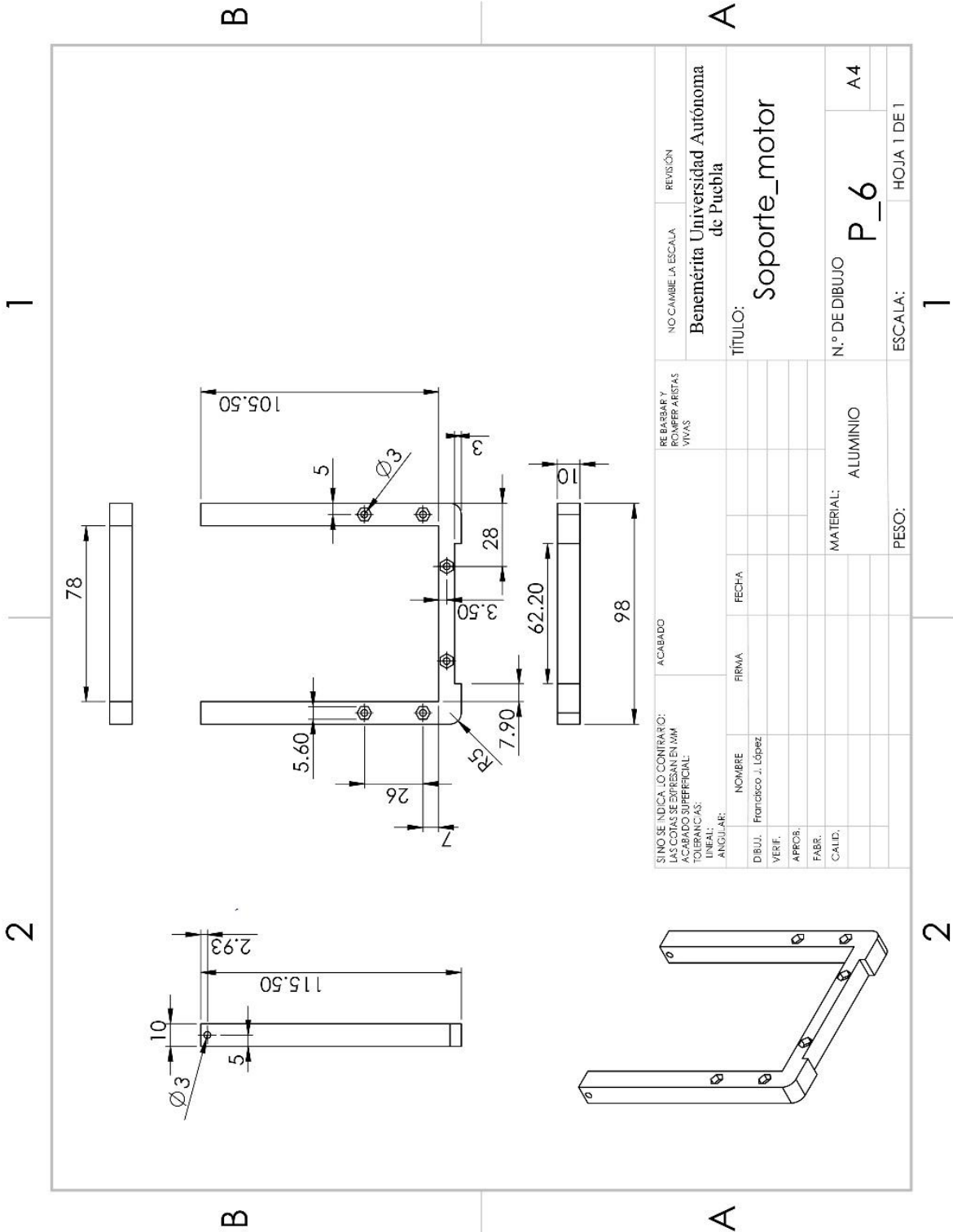


Extensión Eje Motor.

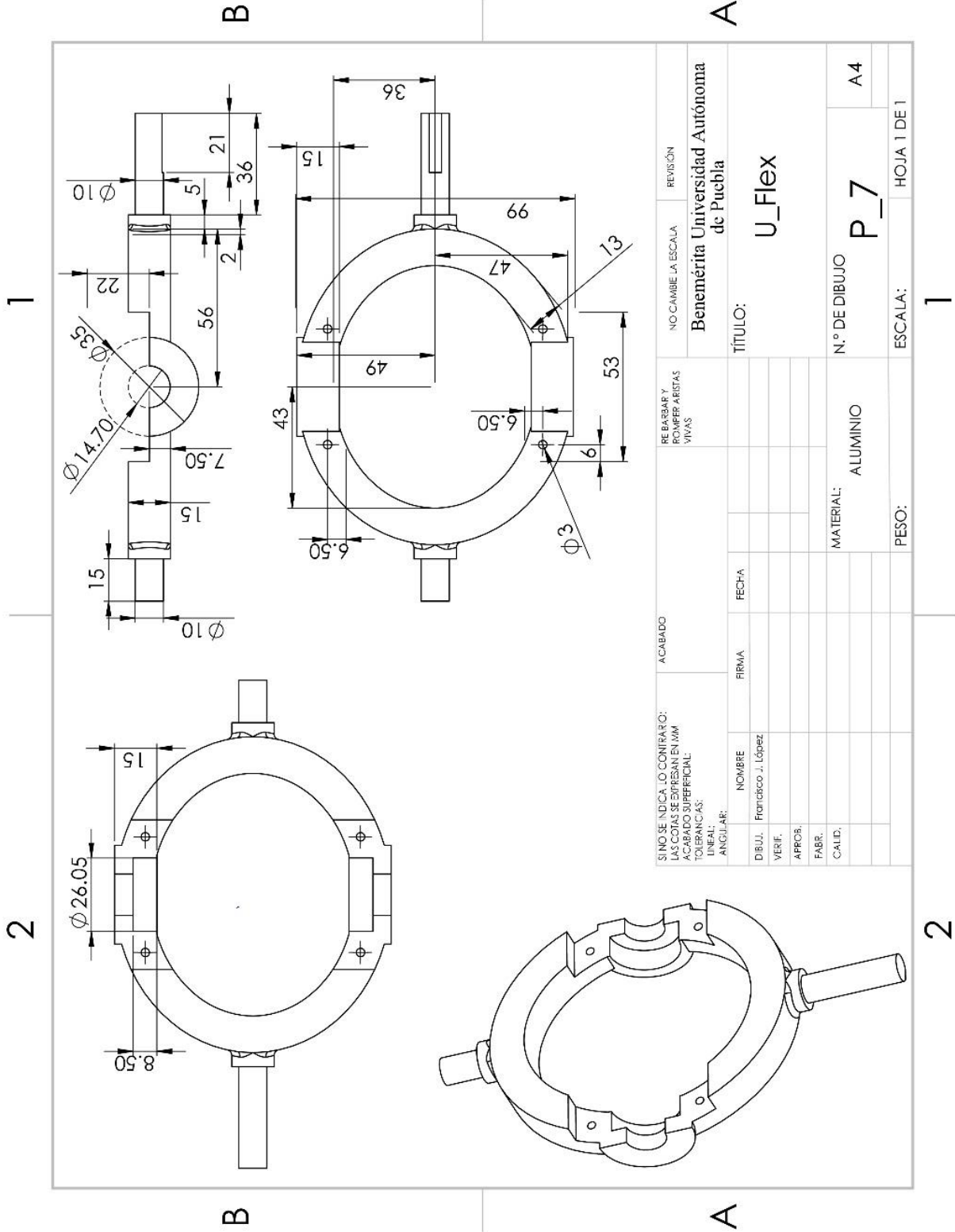


SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ. FRANCISCO J. LÓPEZ		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
VERIF.		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
APROB.		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
FABR.		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
CALID.		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
MATERIAL: ALUMINIO		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
PESO:		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
ESCALA: 1		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
HOJA 1 DE 1		ACABADO		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	

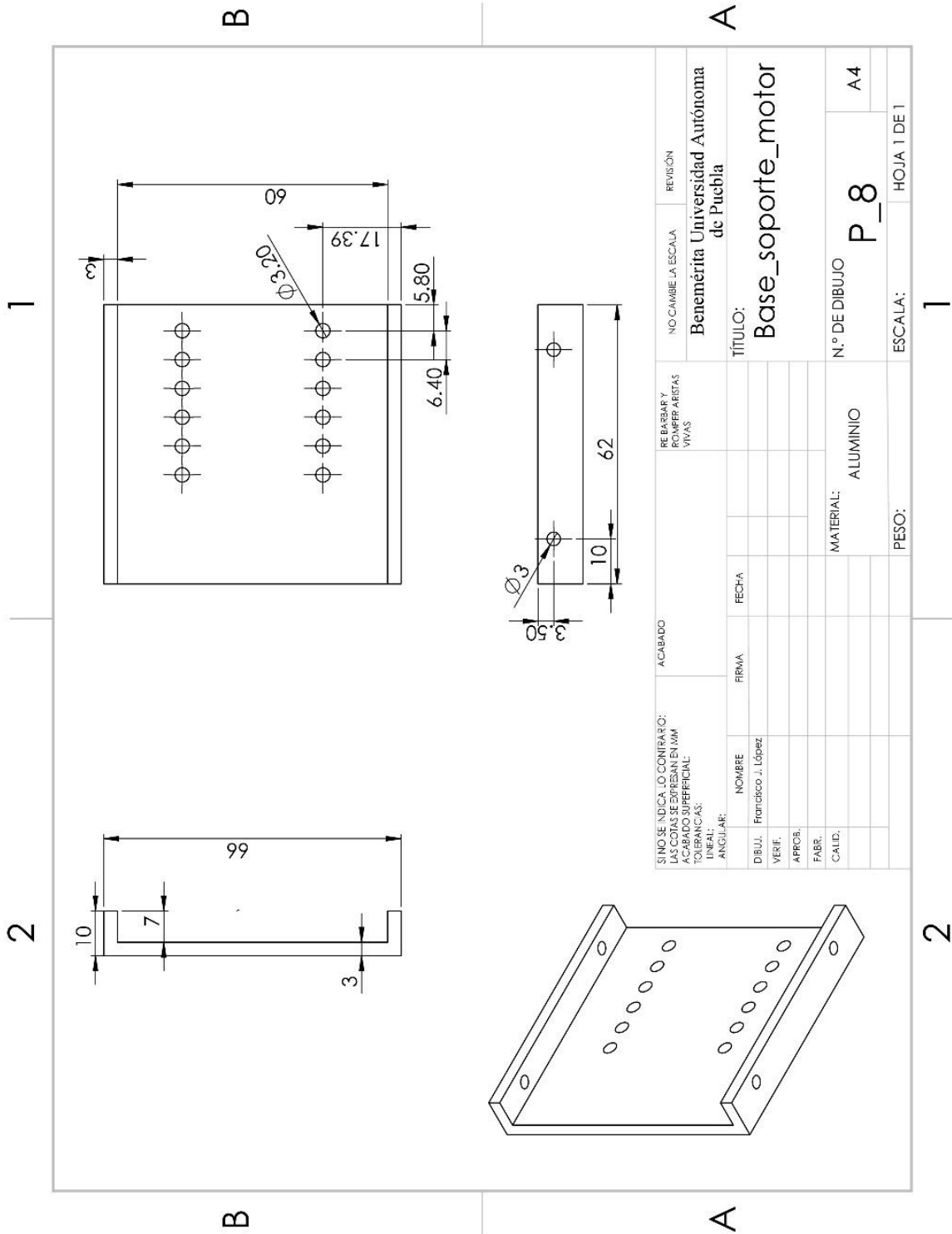
Soporte Motor.



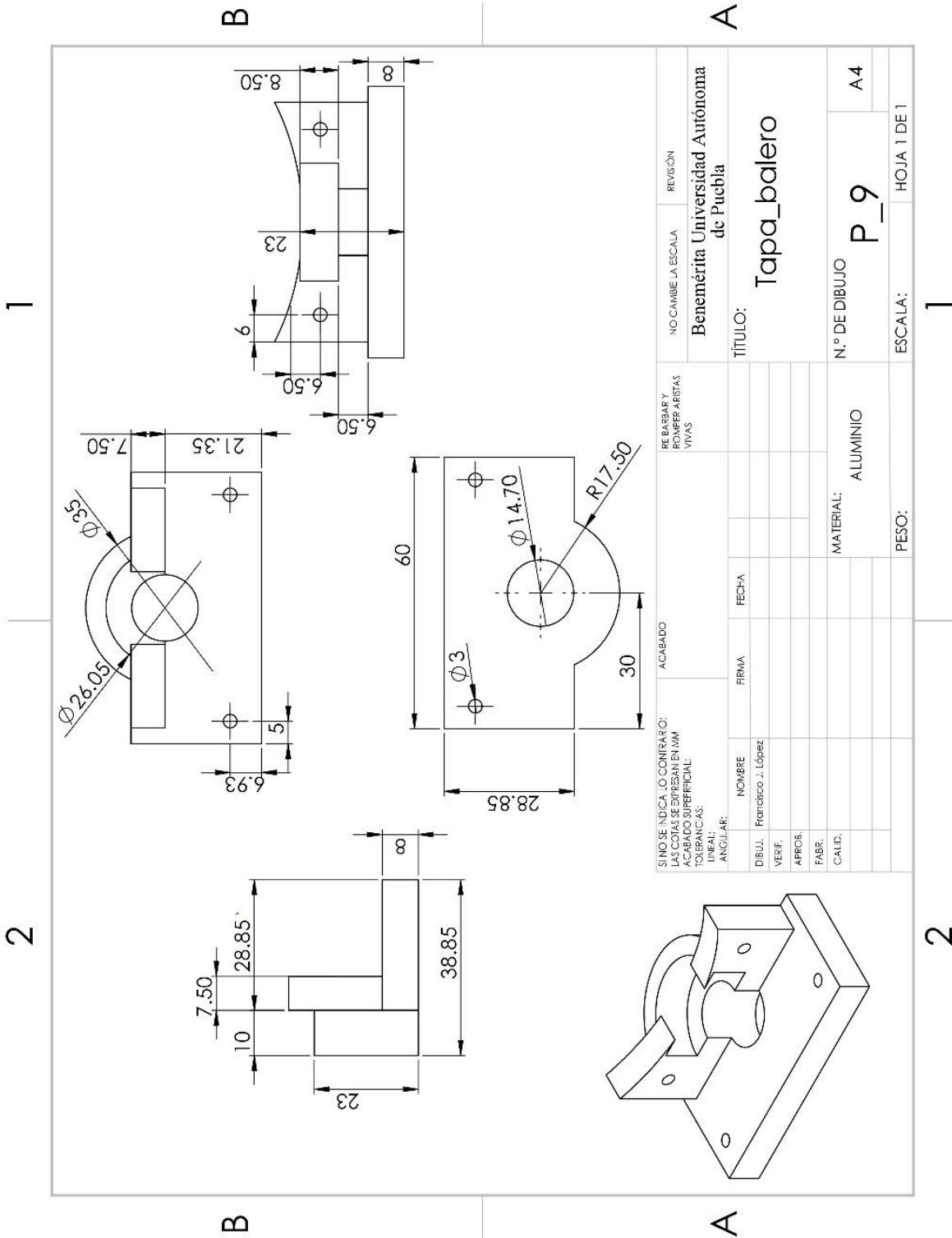
U Flex.



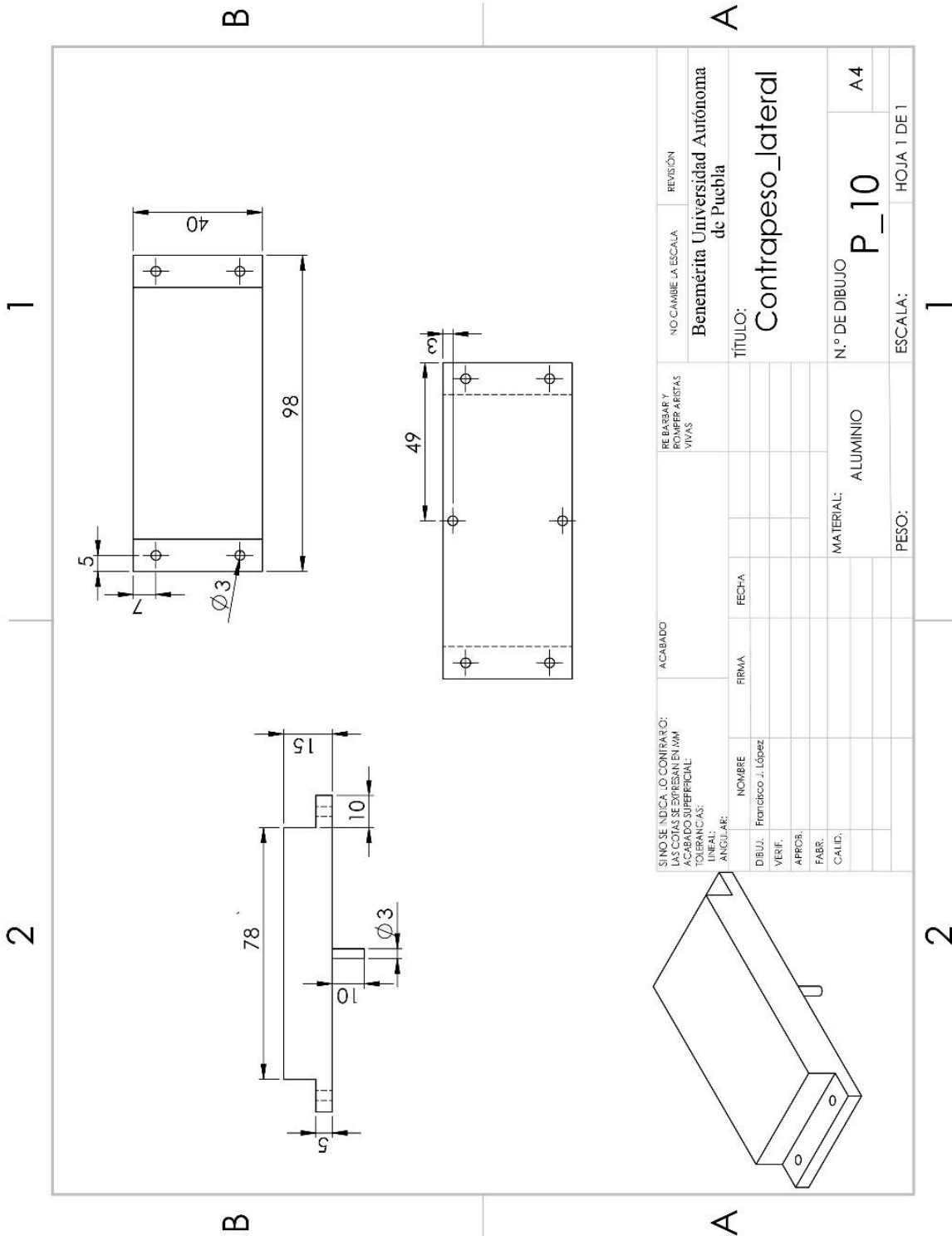
Base Soporte Motor.



Tapa Balero.

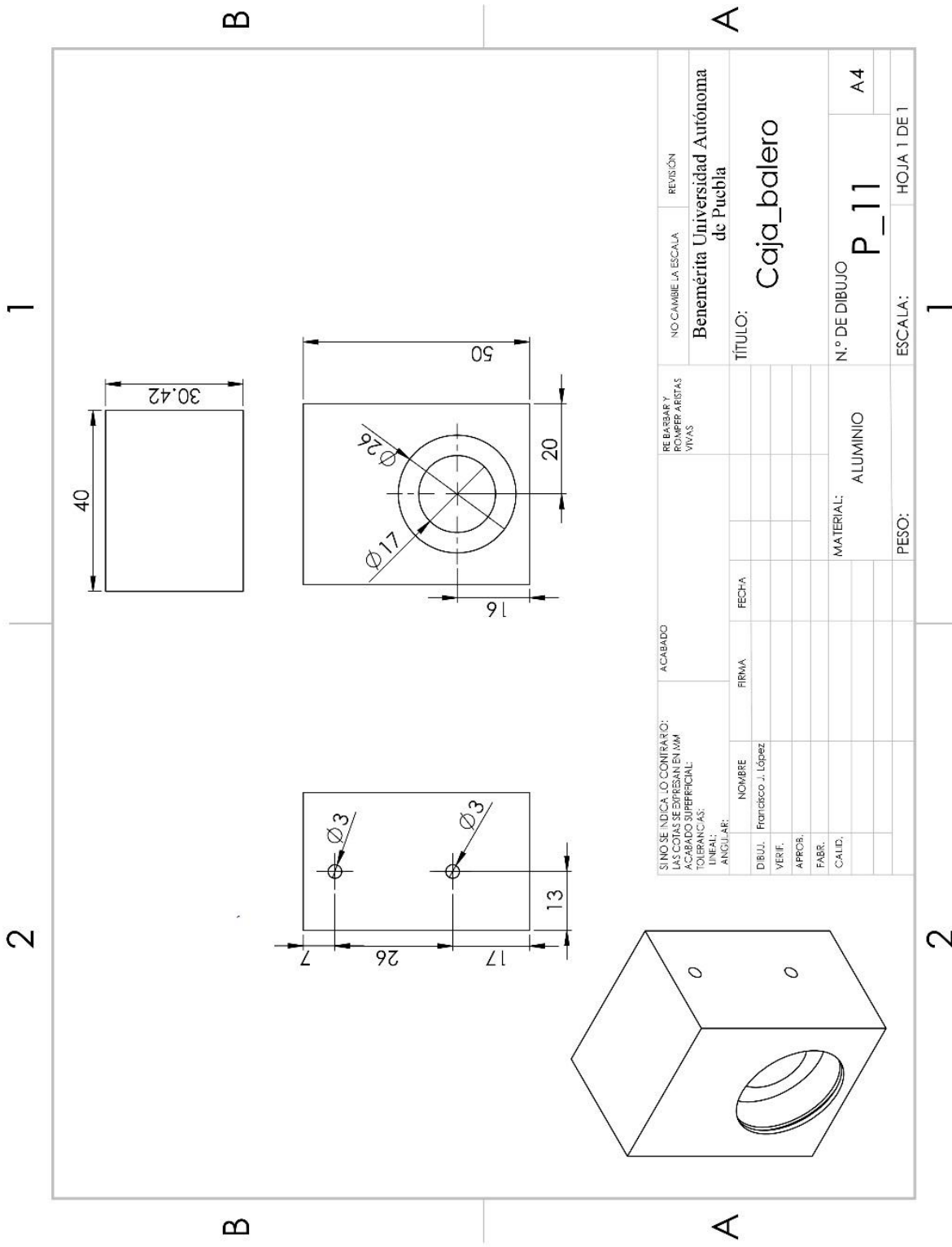


Contrapeso Lateral Eslabón 1.

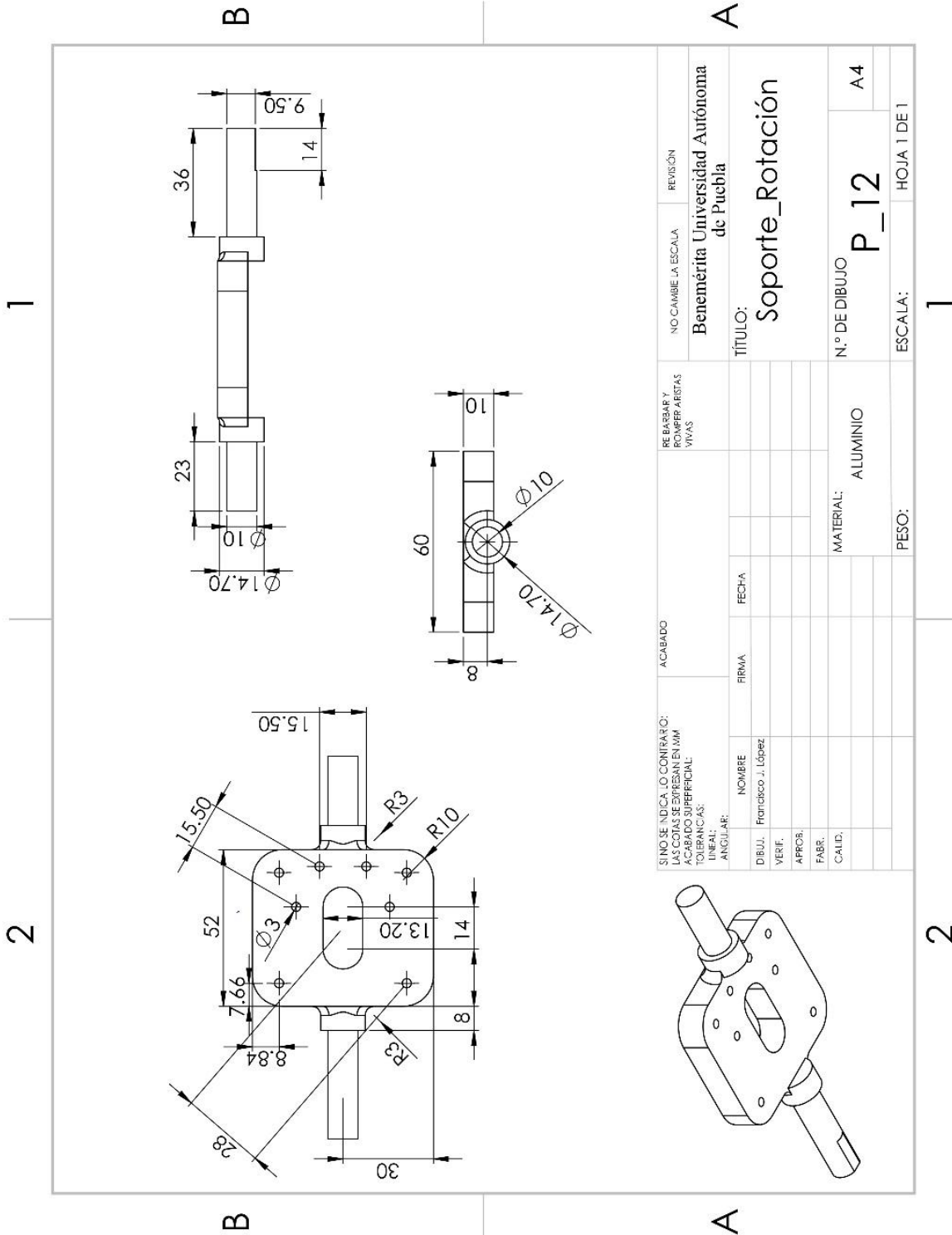


SIN O SE INDICA, LO CONTRAEO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE DIBUJ. Francisco J. López		FIRMA		Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	
NOMBRE DIBUJ. Francisco J. López	FECHA			TÍTULO: Contrapeso_lateral	
VERIF.				N.º DE DIBUJO P_10	A4
APROB.				MATERIAL: ALUMINIO	
FABR.				PESO:	ESCALA: HOJA 1 DE 1
CALID.					

Caja Balero.

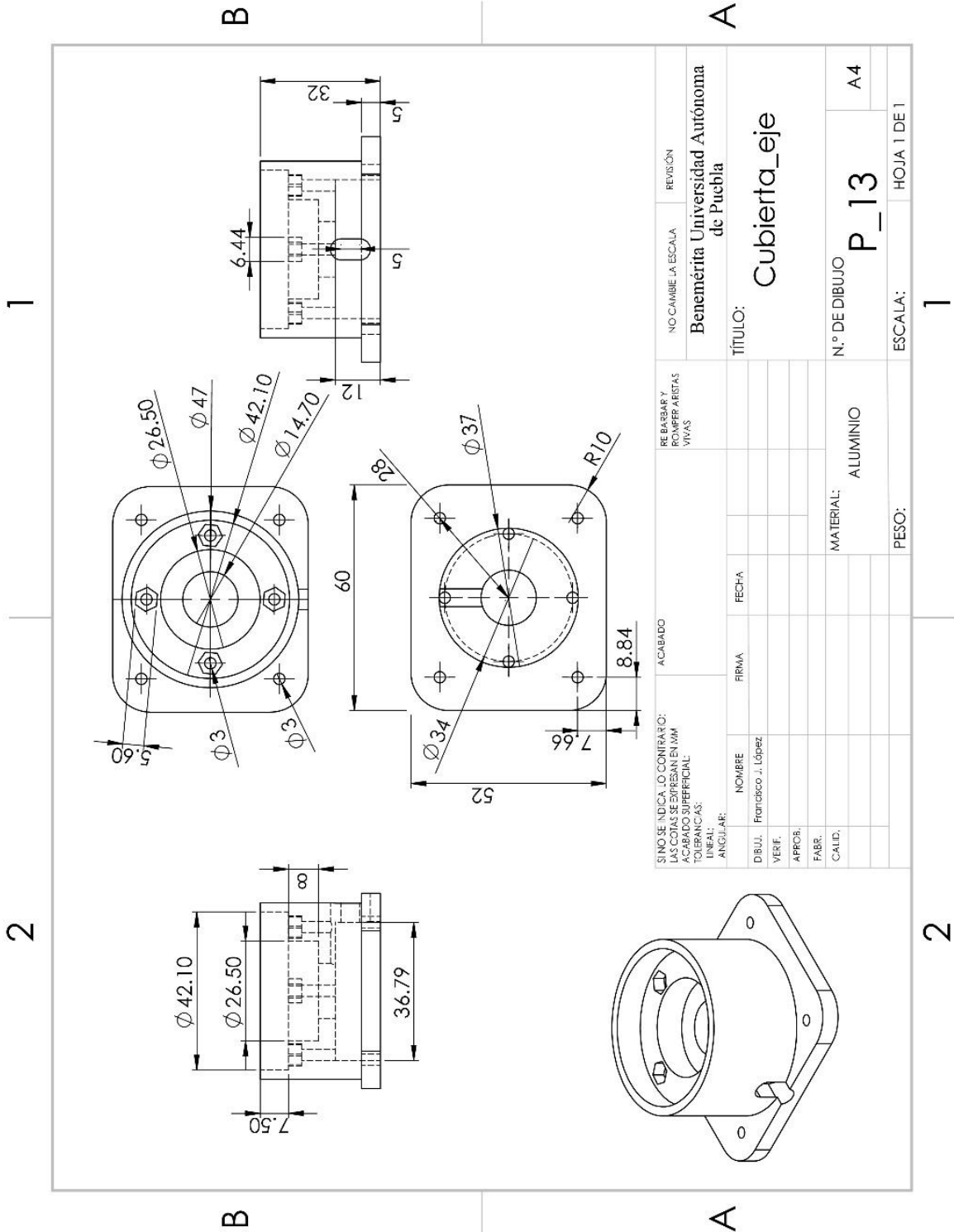


Soporte Rotación.

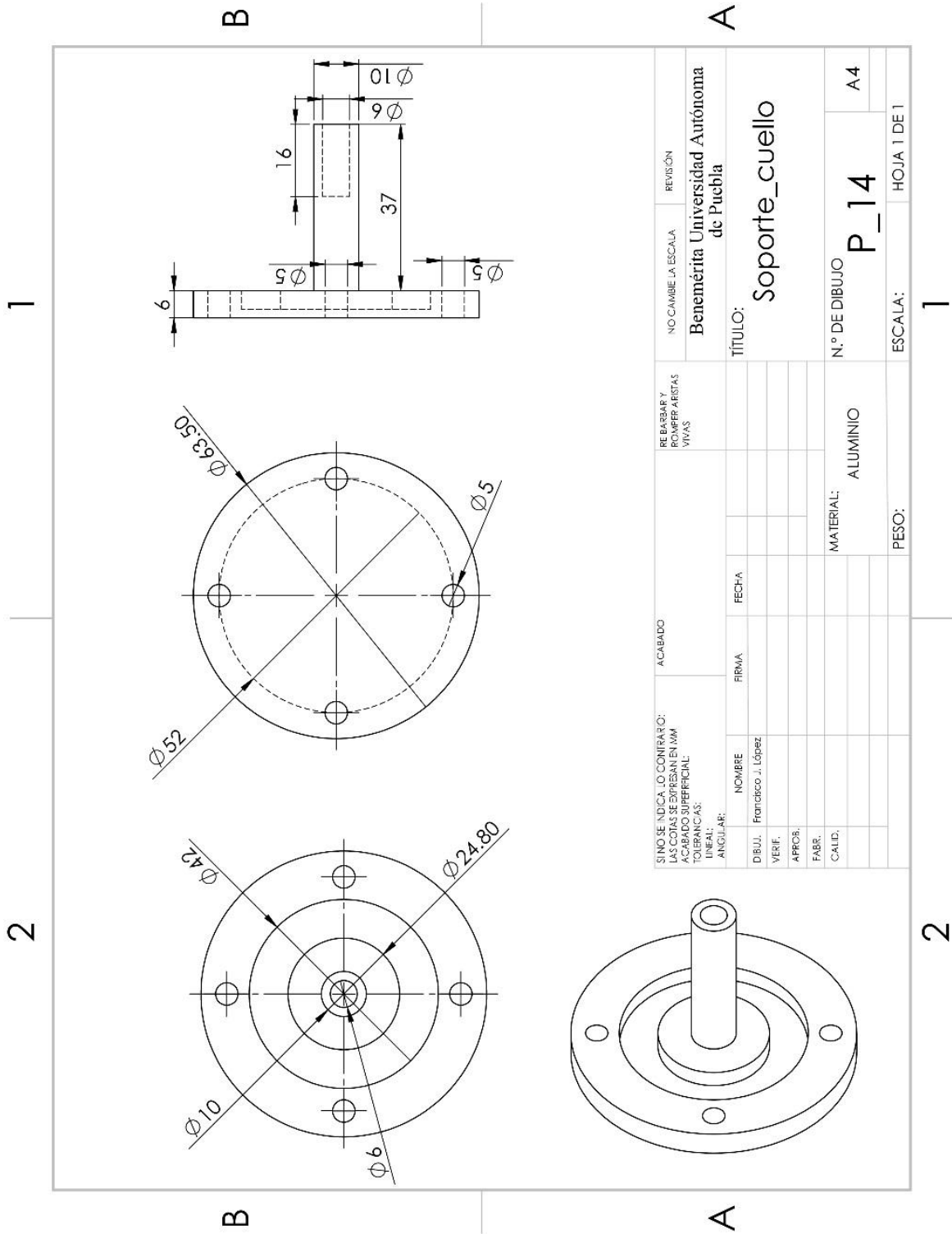


SI NO SE INDICA, LO CONSTATO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL		ACABADO	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:					Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	
NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: Soporte_Rotación			
DIBUJ. Francisco J. López			N.º DE DIBUJO P_12 A4			
VERIF.			MATERIAL: ALUMINIO			
APROB.			ESCALA: 1 HOJA 1 DE 1			
FABR.			PESO:			
CALD.						

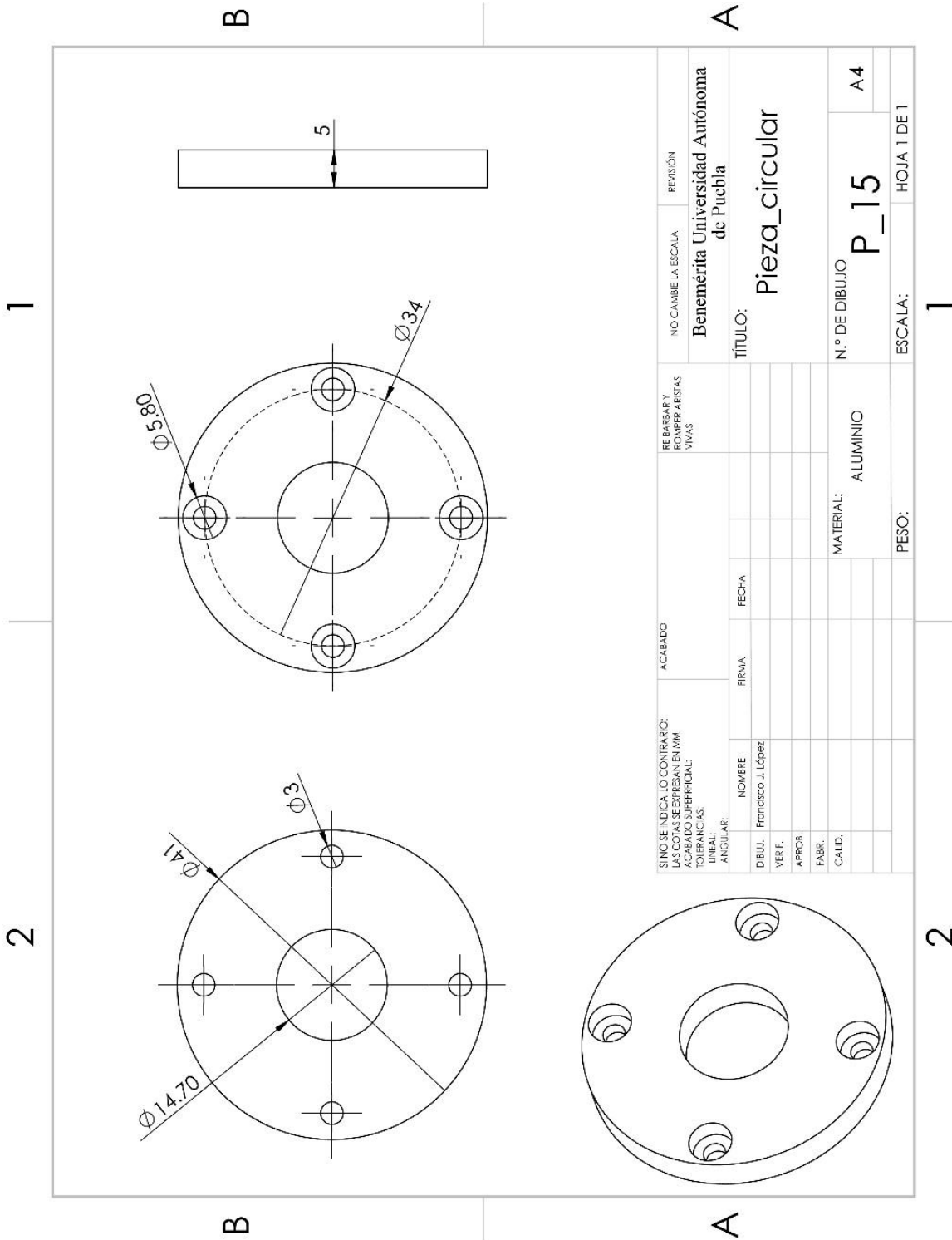
Cubierta Eje.



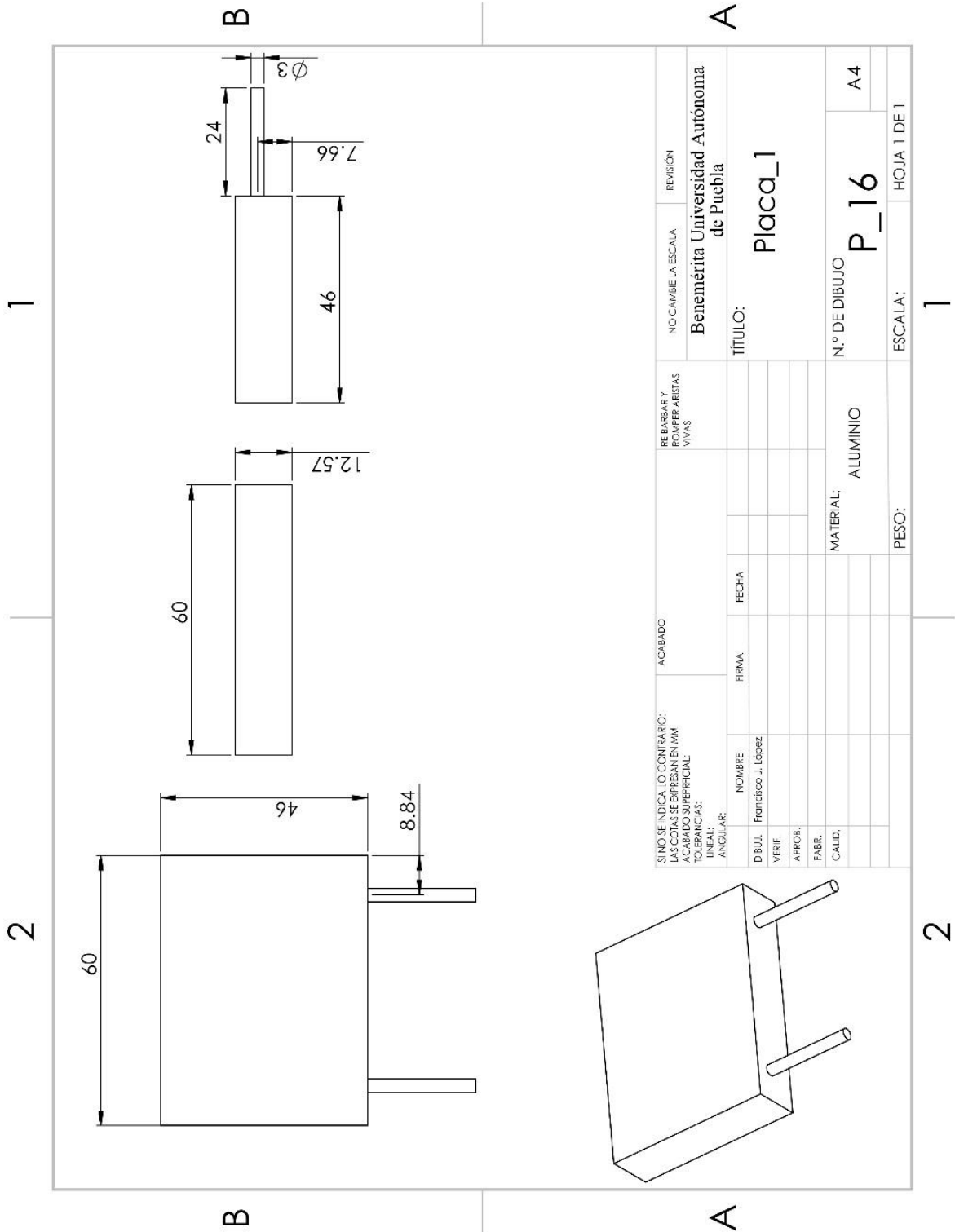
Soporte Cuello.



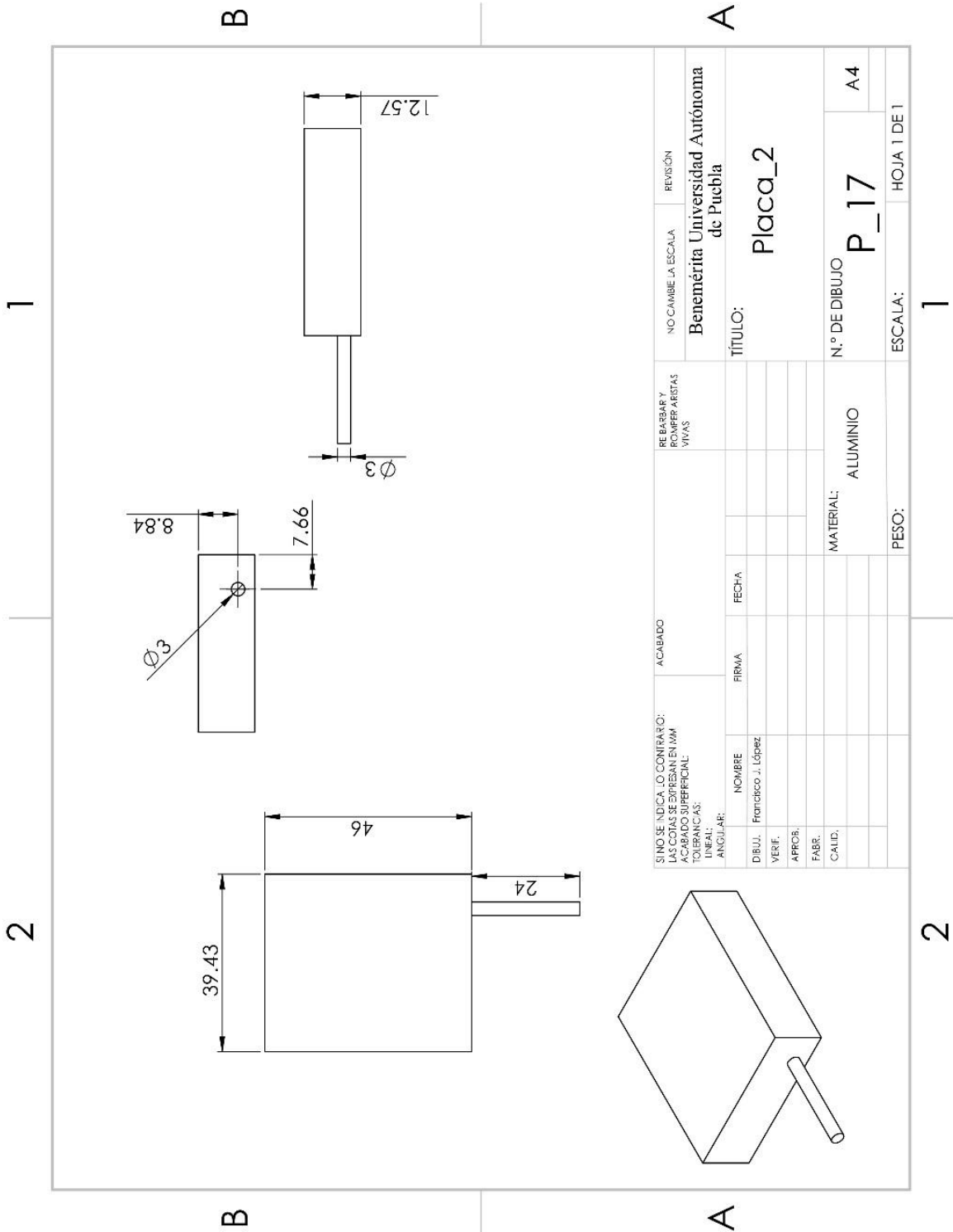
Tapa Balero.



Contrapeso Frontal Eslabón 2



Contrapeso Lateral Eslabón 2.



Referencias

- [1] M. B. H. David G. Alciatore, introduction to Mechatronics and measurement Systems., New York: Mc Graw-Hill, 2012.
- [2] F. Reyes., Robotica. Control de robots manipuladores., México: Alfaomega, 2013.
- [3] «http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm,» [En línea]. [Último acceso: Novimebre 2015].
- [4] L. S. L. V. G. O. Bruno Siliciano, Robotics Modelling, Planning and Control., London: Springer, 2009.
- [5] «Allonrobots.,» [En línea]. Available: <http://www.allonrobots.com/leonardo-da-vinci.html>. [Último acceso: 18 Octubre 2015].
- [6] «History of information,» [En línea]. Available: <http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=3570> . [Último acceso: 20 Octubre 2015].
- [7] «Honda,» [En línea]. Available: <http://world.honda.com/ASIMO/history/>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [8] M. I. o. Technology, «MIT Proyects,» MIT, [En línea]. Available: <http://www.ai.mit.edu/projects/sociable/kismet.html>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [9] M. I. o. Technology, «News Magazine MIT.,» MIT, [En línea]. Available: <http://news.mit.edu//2008/techtalk52-23.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [10] T. Gracia, «NeoTeo,» [En línea]. Available: <http://www.neoteo.com/saya-la-maestra-robotica-japonesa-15094>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [11] «La Nacion.,» 15 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.lanacion.com.ar/1786374-desarrollan-un-expresivo-robot-que-responde-a-gestos-humanos>. [Último acceso: Noviembre 2015].

- [12] E. Piaggio, «Face Team,» Universidad de Pisa, [En línea]. Available: <http://www.faceteam.it/research/the-face-andorid/the-android/>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [13] J. G. Sanchez, «Módulo de bases anatómicas y fisiológicas del deporte.,» 2000.
- [14] D. J. M. B. Bertomeu, Cinemática del raquis cervical. Definición de patrones de movimiento para la valoración funcional en el síndrome de latigazo cervical., Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [15] J. E. Shigley, Teoría de Máquinas y Mecanismos, México: McGraw-Hill, 2001.
- [16] a. E. L. C. Gosselin, «“On the Kinematic Design of spherical three-dof parallel manipulators”,» *The international Journal of Robotic Research.* , vol. Vol. 12, nº 4, pp. 394-402, 1993.
- [17] a. J. H. C. Gosselin, «“The agile eye: a high performance three-dof camera-orienting device”,» de *IEEE Int. conference on Robotics and Automation*, San Diego , 1994.
- [18] R. V. Argüello, Diseño de un mecanismo de rotación pura para brindar movilidad a una cabeza artificial., Querétaro: Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [19] H. Robotics, «Humanoid Robot Arthur,» [En línea]. Available: <http://hansonrobotics.com/slate-fr-blogger-meets-arthur-dld-conference/>.
- [20] M. Electronics, «MCI Capacitación,» [En línea]. Available: <http://cursos.mcielectronics.cl/transmisiones-por-engranaje-y-poleas-dentadas/>. [Último acceso: Junio 2016].
- [21] J. I. B., «Docencia- DGEO Universidad de Concepción,» 2 Enero 2007. [En línea]. Available: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap6.pdf>. [Último acceso: 13 Enero 2017].
- [22] S. K. Saha, Introducción a la Robótica, 1era Ed. ed., McGraw Hill, 2010..
- [23] S. R.E., “Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación”, México: Trillas, 1988.
- [24] G. Z. Arce, Diseño de un micropcesador de arquitectura RISC de 32 bits., Puebla: Benemerita Universidad Autónoma de Puebla, 2017.