

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ENSAMBLAJE Y CONTROL DE UN ROBOT CON ARQUITECTURA
ANTROPOMÓRFICA DE 5 GRADOS DE LIBERTAD**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

TOMO I

EVELYN YARITZA CURICHO JARAMILLO

evelyn.curicho@epn.edu.ec

DIRECTOR: NELSON GONZALO SOTOMAYOR OROZCO, MSc.

nelson.sotomayor@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022


CERTIFICACIONES

Yo, Evelyn Yaritza Curicho Jaramillo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



EVELYN CURICHO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Evelyn Yaritza Curicho Jaramillo, bajo mi supervisión.



NELSON SOTOMAYOR, MSc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

EVELYN YARITZA CURICHO JARAMILLO

NELSON GONZALO SOTOMAYOR OROZCO, MSc.

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, mis abuelos, mi hermano y mi tía.

Por ellos y para ellos mi dedicación y esfuerzo.

Los amo.

AGRADECIMIENTO

A mi madre Nancy, por su amor, apoyo y guía, por darme confianza para no rendirme, incluso cuando los días se volvían grises, no sólo me ofreció una mano, me dio su cariño y sabiduría, fue luz cuando más lo necesitaba.

A mi padre Fausto, por sus sabias palabras, por ayudarme de varias formas a culminar esta carrera, su apoyo me ayudó a forjarme en lo que soy ahora.

A Miguel, quien con su amplio conocimiento no sólo me impulso a seguir adelante, también guio mi camino, fue un apoyo crucial en esta etapa de mi vida, tanto personal como académicamente. Estaré eternamente agradecida

A mi hermano Pablo, sin sus consejos y amor incondicional no habría alcanzado a culminar esta fase, estuvo cuando mis padres no podían, la vida me bendijo con el mejor hermano.

A mis abuelos Martha y Olmedo y mi tía Mery, a veces se necesita palabras de aliento, de alegría, de orgullo, y ellos me las dieron, creyeron y confiaron en mí, inclusive cuando no les di motivos para hacerlo, me dieron ánimos para continuar día tras día.

Al MSc. Nelson Sotomayor, por darme la confianza de realizar este trabajo de integración curricular, por guiarme en esta última fase para concluir con mi carrera, por su tiempo y paciencia.

A mis amigos, Santiago, Juan Francisco, Giovanni, Darío, Michael y Pablo, me dieron días de alegría y sabios conocimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO	2
1.4.1 ROBOTS ANTROPOMÓRFICOS.....	3
1.4.2 SENSORES, ACTUADORES Y MÓDULO DE CONTROL	17
1.4.3 SISTEMA EMBEBIDO	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 ENSAMBLAJE MECÁNICO.....	24
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO A IMPLEMENTARSE	24
2.1.2 ANÁLISIS DE MATERIALES	27
2.1.3 DIRECCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS ACTUADORES	29
2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	35
2.2.1 SISTEMA EMBEBIDO Y PERIFÉRICOS.....	38
2.2.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	40
2.3 DISEÑO DE PLACA DE CONTROL	40
2.3.1 DIAGRAMA CIRCUITAL.....	40
2.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA PLACA.....	42
2.4 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO.....	45
2.4.1 ESTRUCTURA DEL ROBOT.....	45
2.4.2 MOTORES Y MÓDULOS	46
2.4.3 TARJETA DE CONTROL	46
2.4.4 COSTOS DE INGENIERÍA	47
2.4.5 COSTO TOTAL	47
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
3.1 CONCLUSIONES.....	48

3.2	RECOMENDACIONES.....	48
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
5.	ANEXOS.....	51
	ANEXO I.....	51
	PLANOS DE PIEZAS.....	51
I.1	Base.....	51
I.2	Brazo	51
I.3	Antebrazo.....	51
I.4	Muñeca	51

RESUMEN

En el Tomo I del presente trabajo de integración curricular, se plantea como finalidad, el ensamblaje de un robot antropomórfico de 5 grados de libertad, capaz de realizar el trazado de figuras predeterminadas, es por esto que se revisará en primera instancia los robots antropomórficos en general, su estructura, definición y clasificación, asimismo, la modelación de la cinemática, tanto directa como inversa del robot articulado de 5 grados de libertad.

Por otro lado, se realiza la revisión bibliográfica del proyecto de titulación “Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos”, desarrollado como parte del proyecto de investigación PIMI-14-04 con la finalidad de obtener los planos para manufacturar las piezas que forman parte del robot, así como también los actuadores que se debe utilizar, una vez conocidos los elementos anteriormente nombrados se realizará el ensamblaje del robot, adicionalmente se realizará el diseño e implementación de la placa de control.

PALABRAS CLAVE: antropomórfico, cinemática, robot.

ABSTRACT

In the Volume I of this curricular integration work, the purpose is proposed, the assembly of an anthropomorphic robot with 5 degrees of freedom, capable of tracing predetermined figures, it is therefore anthropomorphic robots will be review in the first instance in general, its structure, definition and classification, as well as the modeling of the kinematics, both direct and inverse, of the articulated robot with 5 degrees of freedom.

On the other hand, the bibliographic review of the degree project "Design and simulation of an object manipulating arm in high-risk areas for human beings", developed as part of the PIMI-14-04 research project with the purpose of obtaining the plans to manufacture the parts that are part of the robot, as well as the actuators that must be used, once the previously mentioned elements are known, the assembly of the robot will be carried out, additionally the implementation of the control board will be included.

KEY WORDS: anthropomorphic, kinematics, robot.

1. INTRODUCCIÓN

El avance de la ciencia y la tecnología en los últimos años ha permitido desarrollar grandes proyectos en cuanto a la robótica y automatización con el objetivo de mejorar la calidad de vida y precautelar la seguridad de los seres humanos. Una de las aplicaciones más utilizadas en este campo es la implementación de maquinaria capaz de incrementar la fuerza del ser humano y mejorar su precisión, así como la manipulación de carga u operaciones de manufactura [1].

Es por ello, que se plantea el ensamblaje y control de un robot antropomórfico capaz de realizar trazado de figuras predeterminadas por medio del control de sus cinco grados de libertad, para ello una de las partes más importantes es la cinemática tanto directa e inversa, debido a que de estas depende el movimiento espacial del robot con relación a los valores articulados y la posición del efector final, la cinemática varía dependiendo del tipo de robot ya que estos se clasifican tomando en cuenta diversos parámetros como son tipo de control, su programación de trayectoria, los elementos que lo componen, etc., todo esto será analizado en el marco teórico, prestando especial atención en las características que conformarán el prototipo a diseñar.

Una vez conocida la base teórica se procederá con el análisis de los componentes y su estructura física, para la cual se tomará de referencia el trabajo de titulación “Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos”, desarrollado como parte del proyecto de investigación PIMI-14-04 en el cual se realizó el diseño mecánico del robot.

El producto final del Tomo I del trabajo de integración curricular será el ensamblaje del robot, así como el diseño e implementación del hardware del controlador en bajo nivel, el cual se encarga de controlar el movimiento de los motores.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Ensamblar y controlar un robot industrial con arquitectura antropomórfica de cinco grados de libertad

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar una revisión bibliográfica de robots industriales con arquitectura antropomórfica con el fin de obtener su modelo cinemático directo e inverso.

Ensamblar el robot antropomórfico de cinco grados de libertad que fue diseñado en el proyecto de investigación PIMI-14-04.

Diseñar e implementar el hardware del control en bajo nivel utilizando un sistema embebido, el cual será encargado del control de los motores que forman parte del robot antropomórfico.

1.3 ALCANCE

Realizar una revisión bibliográfica de robots industriales con arquitectura antropomórfica de cinco grados de libertad con el fin de obtener su modelo cinemático directo e inverso.

Realizar una revisión bibliográfica del diseño del robot antropomórfico de cinco grados de libertad desarrollado en el proyecto PIMI-14-04 con el fin de obtener los planos para manufacturar las piezas.

Ensamblar el robot antropomórfico de cinco grados de libertad diseñado en el proyecto PIMI-14-04.

Diseñar e implementar el hardware del controlador en bajo nivel utilizando la plataforma Arduino, el cual se encargará de controlar el movimiento de los motores y la comunicación con la interfaz gráfica.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se realiza la revisión bibliográfica de robots antropomórficos que es el tema global del presente trabajo. Específicamente se centrará los brazos robóticos con n grados de libertad, para ello se inicia con el análisis de la cinemática inversa y directa, una vez revisado este contenido se procederá con la descripción de los sensores y actuadores a utilizarse en la implementación, así como el sistema embebido que se utiliza para el controlador de bajo nivel.

1.4.1 ROBOTS ANTROPOMÓRFICOS

Antes de iniciar con el tema de robots antropomórficos, se realiza una breve revisión de los robots industriales.

Los robots industriales están constituidos de dos partes, la etapa articulada correspondiente a la estructura mecánica, además de la etapa de control, correspondiente a todo el sistema electrónico, gracias a la integración de ambas partes se tiene como resultado un sistema capaz de adaptarse a diversas tareas o trabajos [2].

Los robots industriales se clasifican según la AFRI (Asociación Francesa de Robótica Industrial) en [2]:

- Tipo A: manipulador con telemando o control manual.
- Tipo B: manipulador automático con ciclos
 - o Pre ajustable
 - o Regulación mediante fines de carrera.
 - o Control por PLC
 - o Accionamiento neumático, hidráulico o eléctrico
- Tipo C: robot programable con trayectoria punto a punto o continua
- Tipo D: robot capaz de adquirir datos de su entorno.

Además, se tiene la clasificación según la IFR (Federación Internacional de Robótica) que son [2]:

- Robot secuencial
- Robot de trayectoria controlable
- Robot adaptativo
- Robot tele manipulado

Sin embargo, es posible clasificarlos de acuerdo a otros parámetros, como son [2]:

- En generaciones:
 - o 1era generación: se basa en la repetición de tareas programadas de manera secuencial.

- 2da generación: actúa en consecuencia luego de adquirir la información del entorno. Sus funciones son localizar, clasificar y detectar.
- 3ra generación: se emplea un lenguaje más adecuado para su programación en el cual se planifica automáticamente las tareas.
- De acuerdo a sus funciones:
 - Clase 1: coger y dejar
 - Clase 2: secuencia de trayectoria
 - Clase 3: montaje de detalles
- De acuerdo a su aprendizaje
 - Robots manuales: el movimiento es controlado por el hombre
 - Robots autónomos de secuencia fija: el movimiento de los elementos se realiza de forma autónoma sin que sea posible la alteración de las operaciones o secuencias.
 - Robots autónomos de secuencia variable: el movimiento de los elementos se realiza de forma autónoma siendo posible la alteración de ciertas características de los ciclos de trabajo.
 - Robots programables: su programación se realiza en ciertos lenguajes específicos o procesos de aprendizaje en los cuales se configura ciertas acciones o secuencias de movimiento para que sean memorizadas y repetidas indefinidamente.
 - Robots inteligentes: su control se realiza mediante computadores, estos son capaces de relacionarse con su entorno gracias al uso de sensores permitiendo así, la toma de decisiones en tiempo real.
- De acuerdo al control de su trayectoria
 - Control de trayectoria punto a punto: se programa para realizar pausas en cada punto, con el fin de completar una trayectoria determinada. Una de sus características más importantes es su precisión.
 - Control de trayectoria continua: posee movimientos sin pausas a lo largo de toda su trayectoria, su característica se basa en un movimiento más suave por lo que debe disminuir su velocidad de acuerdo al tamaño de los pasos

- De acuerdo con sus sistemas de coordenadas

Se encuentra conformado por articulaciones o eslabones para el movimiento de todos los elementos que lo conforman, pueden ser prismáticas o deslizantes, se lo representa con P y de revolución que se los representa con una R.

- o De coordenadas cilíndricas (RPP): se encuentra constituido de dos ejes lineales que se deslizan de forma ortogonal entre sí, además se encuentra montado sobre una base rotatoria, esto se puede observar en la Figura 1.1.

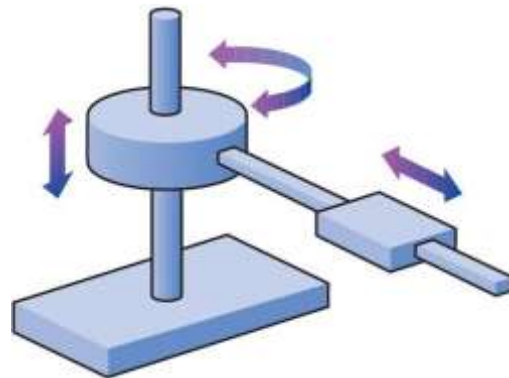


Figura 1.1. Configuración cilíndrica

- o De coordenadas esféricas (RRP): se encuentra montado sobre una base giratoria con dos ejes rotacionales independientes, adicional posee un brazo telescópico que se encarga de extenderse o retraerse a lo largo de su eje, como se muestra en la Figura 1.2.

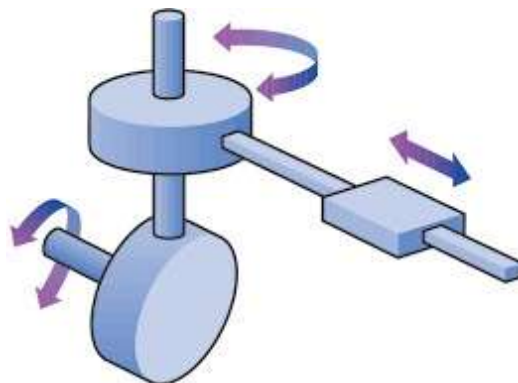


Figura 1.2. Configuración esférica

- o De coordenadas cartesianas (PPP): posee los tres ejes perpendiculares donde se realiza el movimiento lineal, como se muestra en la Figura 1.3.

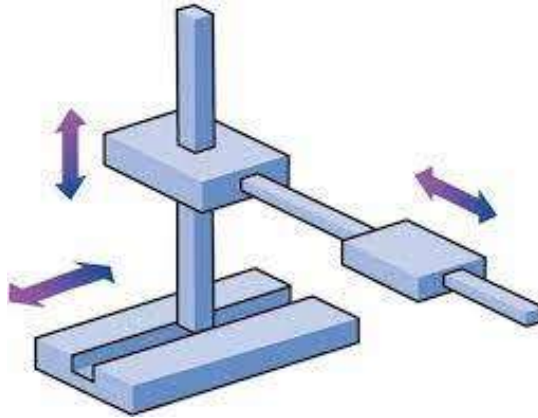


Figura 1.3. Configuración cartesiana

- De brazo articulado (RRR): se trata del robot que se asemeja al brazo humano, a este tipo de robot se lo denomina como Antropomórfico, esta configuración se puede observar en la Figura 1.4.

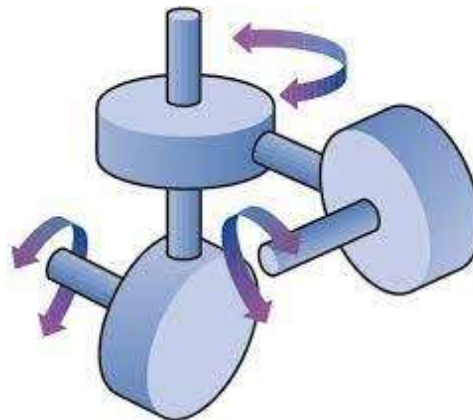


Figura 1.4. Configuración articulada o antropomórfica

Con la explicación anterior, se define el tipo de robot que se desarrollará en el presente trabajo. Según la AFRI es un robot tipo C, robot de trayectoria controlable según la IFR, adicionalmente se trata de un sistema de segunda generación, su función es de clase 2, su aprendizaje es programable y su trayectoria es continua. Finalmente se trata de un brazo articulado o de configuración antropomórfica y de acuerdo al tema propuesto, este presenta 5 grados de libertad.

Los robots antropomórficos son muy utilizados en especial por las grandes industrias, esto debido a su gran precisión y versatilidad para cumplir varias tareas repetitivas.

1.4.1.1 Cinemática

La cinemática se la define como una parte de la mecánica que se encarga de estudiar los movimientos de los objetos sin tomar en cuenta las fuerzas que son aplicadas para originar dicho movimiento [3]. Analíticamente, se busca describir este movimiento espacial del robot con relación a la posición del efector final y los valores articulados del mismo.

Se tiene dos tipos de cinemática, la cinemática inversa y la cinemática directa, ambas serán revisadas basándose en un robot articulado, la diferencia entre ambas se muestra en la Figura 1.5. donde se observa que la cinemática directa permite determinar la posición del efector final basándose de las coordenadas articulares, mientras que la cinemática inversa realiza lo contrario, es decir, con la ayuda de la posición del efector final se puede determinar las coordenadas articulares [3].

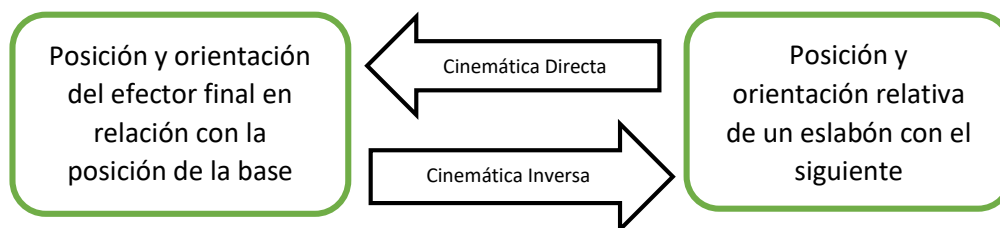


Figura 1.5. Cinemática directa e inversa

1.4.1.1.1 Cinemática directa

Se encarga de saber cuáles son las posiciones y orientaciones relativas de un eslabón con el que le sigue, para finalmente conocer la posición del efector final en relación con la posición de la base del robot [4].

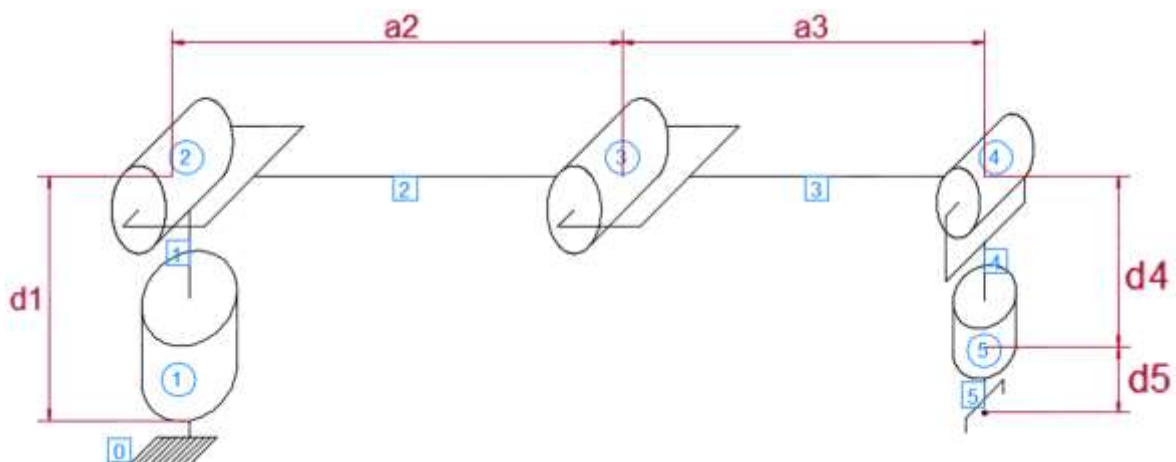


Figura 1.6. Representación esquemática del brazo manipulador [3].

Un robot de n grados de libertad se encuentra conformado por $n+1$ eslabones, los mismos que se encuentra unidos a n articulaciones, para conocer los grados de libertad del robot es necesario realizar un esquema del mecanismo donde se puede identificar el número de articulaciones y eslabones que cuenta [3]. Este esquema se observa en la Figura 1.6.

Tomando como referencia la Figura 1.6 se tiene 6 eslabones y 5 articulaciones.

Con la ayuda del criterio de Kutzbach, o también conocido como fórmula de movilidad se determina los grados de libertad de una cadena cinemática teniendo en cuenta las restricciones mecánicas como: el número de eslabones, número de juntas y número de eslabones fijados [3]. Esto se puede observar en la Ec (1.1).

$$m = 3n - 2j - 3g \quad \text{Ec (1.1)}$$

Donde:

m : # grados de libertad

n : # eslabones

j : # articulaciones de 1 grado de libertad

g : # eslabones fijados

Basándose en la Figura 1.6 se observa que se trata de una cadena abierta simple ya que únicamente posee un eslabón fijado, es por ello que la Ec (1.1) puede expresarse como la Ec (1.2).

$$m = 3(n - 1) - 2j \quad \text{Ec (1.2)}$$

Entonces:

$$m = 3(6 - 1) - 2(5) \quad \text{Ec (1.3)}$$

$$m = 5$$

Por lo tanto, en este caso se trata de un robot de 5 grados de libertad conformado por 6 eslabones unidas a 5 articulaciones, a cada uno de los eslabones se le asocia un sistema de referencia solidario a él, además, al utilizar las transformaciones homogéneas se puede representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los 6 eslabones que componen el robot [5]. Sus grados de libertad comprenden el número de variables independientes que se expresan como $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, medidas en $\left[\frac{rad}{seg} \right]$.

Para la solución o determinación de esta cinemática existen varios métodos, entre los más conocidos se tiene el algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H), con este algoritmo se obtienen matrices de transformación homogénea, donde cada una de ellas poseen información de la posición, orientación, escala y perspectiva de cada uno de sus ejes de coordenadas respecto a los ejes anteriores, esto para cada grado de libertad del robot antropomórfico. Para este algoritmo es necesario escoger de forma adecuada los sistemas de coordenadas que se encuentren asociadas a cada eslabón, para de esta manera hacer posible el paso al eslabón siguiente mediante cuatro transformaciones básicas, estas son [5]:

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i
- Traslación a lo largo del eje Z_{i-1} una distancia d_i / vector $d_i(0,0,d_i)$
- Traslación a lo largo del eje X_i una distancia a_i / vector $a_i(a_i,0,0)$
- Rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i

Asignación de los sistemas de coordenadas

Se coloca de manera arbitraria en cada articulación el sistema de coordenadas, siempre y cuando este sistema sea fijo (x_0, y_0, z_0) para luego continuar con la articulación posterior (x_1, y_1, z_1) . Para lograr lo anteriormente explicado se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones [3]:

- Los ejes z_i corresponden al eje de giro de las articulaciones rotacionales, z_0 va sobre el eje de la primera articulación, z_1 va sobre el eje de la segunda articulación y así sucesivamente.
- Los ejes x_i se deben colocar sobre la dirección normal común que une a los ejes z_i y z_{i-1}
- Los ejes y_i debe seguir con la regla de la mano derecha, es decir un sistema dextrógiro con x_i y z_i
- Los ángulos θ , son aquellos ángulos de articulación que van desde x_{i-1} hasta x_i girando alrededor de z_i
- Distancia d_i que va desde el sistema xyz_{i-1} hasta la intersección de las normales común de z_{i-1} hacia z_i a lo largo de z_{i-1}
- Distancia a que se obtiene de la longitud medida a lo largo de x_i

- Los ángulos α , son los ángulos de torsión que se debe rotar z_{i-1} para llegar a z_i alrededor de x_i

Esto se representa en la Figura 1.7

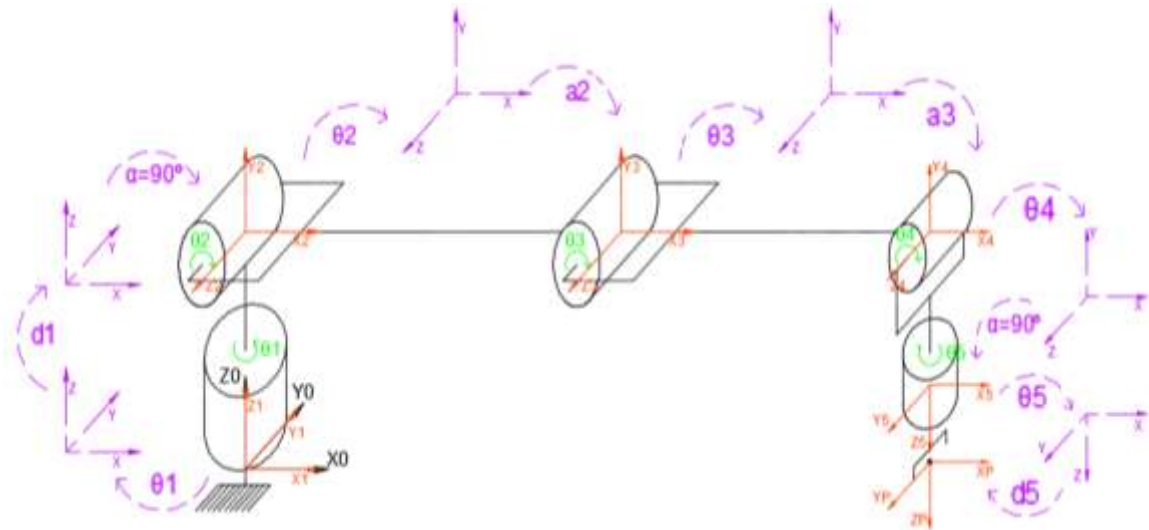


Figura 1.7. Asignación de ejes de coordenadas fijo y móvil [3]

A partir del análisis incluyendo las consideraciones, se desarrolla la tabla de parámetros D-H [3], esta se puede observar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Parámetros D-H

Eslabón	θ	d	α	a
1	θ_1	d_1^*	90	0
2	θ_2	0	α_2	a_2
3	θ_3	0	α_3	a_3
4	θ_4	d_4^*	90	0
5	θ_5	d_5^*	α_5	0

Una vez realizada la tabla de parámetros se procede a obtener las matrices homogéneas, primero es necesario obtener las matrices individuales de transformación A , para esto se debe multiplicar las matrices de traslación y rotación de cada eslabón [3], utilizando la Ec (1.4):

$${}^{i-1}A_i = R_{z,\theta}T_{z,d}R_{x,\alpha}T_{x,a} \quad \text{Ec (1.4)}$$

Donde:

${}^{i-1}A_i$: matriz del eslabon determinado

$R_{z,\theta}$: matriz de rotacion alrededor del eje z, angulo θ

$T_{z,d}$: matriz de traslación a lo largo del eje z, angulo d

$R_{x,\alpha}$: matriz de rotacion alrededor del eje x, angulo α

$T_{x,a}$: matriz de traslacion alrededor del eje x, angulo a

La resolución de este sistema de ecuaciones matriciales puede ser obtenida por medio de diferentes softwares, en este caso se utiliza Matlab.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Ec (1.5)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_2 * c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2 * s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Ec (1.6)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_3 * c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & a_3 * s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Ec (1.7)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Ec (1.8)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Ec (1.9)$$

Donde:

c : coseno del ángulo

s : seno del ángulo

$a_2; a_3$: dimensiones de los eslabones

Una vez obtenida las matrices individuales se obtiene la matriz de transformación al multiplicar todas las matrices usando la Ec (1.10)

$${}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \quad \text{Ec (1.10)}$$

$${}^0A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & {}^0X_5 \\ n_y & o_y & a_y & {}^0Y_5 \\ n_z & o_z & a_z & {}^0Z_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec (1.11)}$$

Donde:

$$n_x = s\theta_1 s\theta_5 + c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)c\theta_1 c\theta_5$$

$$n_y = c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)c\theta_5 s\theta_1 - c\theta_1 s\theta_5$$

$$n_z = s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)c\theta_5$$

$$o_x = s\theta_1 c\theta_5 - c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)c\theta_1 s\theta_5$$

$$o_y = -c\theta_1 c\theta_5 - c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)s\theta_1 s\theta_5$$

$$o_z = -s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)s\theta_5$$

$$a_x = s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)c\theta_1$$

$$a_y = s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)s\theta_1$$

$$a_z = -c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$${}^0X_5 = [a_2 c\theta_2 + a_3 c(\theta_2 + \theta_3)]c\theta_1$$

$${}^0Y_5 = [a_2 c\theta_2 + a_3 c(\theta_2 + \theta_3)]s\theta_1$$

$${}^0Z_5 = a_3 s(\theta_2 + \theta_3) + a_2 s\theta_2$$

Modelo matemático

Las ecuaciones del modelo matemático del brazo que se obtuvo de la matriz final se muestran en la Ec (1.12):

$$\begin{cases} x = [a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)] \cos \theta_1 \\ y = [a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)] \sin \theta_1 \\ z = a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad \text{Ec (1.12)}$$

1.4.1.1.2 Cinemática inversa

A contrario de la cinemática directa, la cinemática inversa permite calcular cual es la posición de los eslabones, es decir los valores de las coordenadas, en base del conocimiento de la posición del efector final en relación con la posición de la base del motor [4]. De igual manera, es necesario mencionar que en la cinemática inversa la obtención de ecuaciones es dependiente de la configuración que tenga el robot, mientras que por otro lado las matrices obtenidas en la cinemática directa no dependen de esta [5].

Existen varios métodos para obtener una solución de la cinemática inversa, estos son los siguientes [5]:

- Métodos geométricos: se basa en relacionar geoméricamente las coordenadas del efector final del robot, las dimensiones físicas de sus elementos y sus coordenadas articulares, este método se lo utiliza principalmente en pocos grados de libertad.
- Resolución a partir de las matrices de transformación homogénea: este método se basa en utilizar el conocimiento del modelo obtenido en la cinemática directa, sin embargo, en ciertas ocasiones esto no resulta factible dado que se vuelve un método complejo.
- Desacoplo cinemático: este método al contrario del método geométrico, se lo utiliza cuando se tiene mayor número de grados de libertad, por esta misma razón se basa en separar o desacoplar la orientación de la posición. Si fuese el caso de utilizar este método, para obtener los valores de las tres primeras articulaciones se puede utilizar cualquiera de los dos métodos previamente mencionados con el propósito de posicionar su extremo en unas coordenadas determinadas.
- Reducción polinómica: trata de facilitar la resolución transformando las ecuaciones algebraicas o geométricas en polinómicas.

En este trabajo se utiliza el método de desacoplo cinemático, para esto se analiza las tres primeras variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, con estas variables se permite encontrar la posición de la

muñeca, posteriormente se analiza las dos variables restantes θ_4, θ_5 , ambas provocan un cambio en la posición final real, además de la orientación del efector final en el espacio, esto se realiza debido a que el análisis de las cinco variables juntas presenta un grado de dificultad alto [3].

- **Variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$**

Como se comentó previamente, en este caso se utiliza el conocimiento del modelo obtenido en la cinemática directa, es decir la matriz homogénea, Ec (1.10), esto se aplica a las tres primeras variables de la siguiente manera:

$${}^0A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \quad \text{Ec (1.13)}$$

$$({}^0A_1)^{-1} {}^0A_3 = {}^1A_2 {}^2A_3 \quad \text{Ec (1.14)}$$

Es así que se obtiene:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & X \\ n_y & o_y & a_y & Y \\ n_z & o_z & a_z & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3) & -s(\theta_2 + \theta_3) & 0 & a_3 * c(\theta_2 + \theta_3) + a_2 * c\theta_2 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 & a_3 * s(\theta_2 + \theta_3) + a_2 * s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec (1.15)} \end{aligned}$$

Al igualar los términos de la fila 3, columna 4 de ambos lados de la Ec (1.15) se obtiene como resultado la Ec (1.16):

$$\text{sen}\theta_1 X - \text{cos}\theta_1 Y = 0 \quad \text{Ec (1.16)}$$

Despejando:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad \text{Ec (1.17)}$$

De igual manera, se procede con los elementos fila 1, columna 4 y fila 2, columna 4, obteniendo la Ec (1.18) y la Ec (1.19).

$$\cos\theta_1 X + \sin\theta_1 Y = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \quad \text{Ec (1.18)}$$

$$Z = a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin\theta_2 \quad \text{Ec (1.19)}$$

Una vez encontrado θ_1 , con la ayuda de la Ec (1.17) se despeja θ_2 y θ_3

$$s_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3} \right)} \quad \text{Ec (1.20)}$$

$$c_3 = \frac{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3} \quad \text{Ec (1.21)}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{s_3}{c_3}\right) \quad \text{Ec (1.22)}$$

$$s_2 = \frac{(a_2 + a_3 c_3)Z - a_3 s_3 \sqrt{X^2 + Y^2}}{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad \text{Ec (1.23)}$$

$$c_2 = \frac{(a_2 + a_3 c_3)\sqrt{X^2 + Y^2} + a_3 s_3 Z}{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad \text{Ec (1.24)}$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{s_2}{c_2}\right) \quad \text{Ec (1.25)}$$

- Variables θ_4, θ_5

Nuevamente es necesario realizar una simplificación de la ecuación homogénea vista en la cinemática directa, es por esto que se utiliza las Ec (1.13) y Ec (1.14), sin embargo, en este caso se trabaja con las submatrices de rotación dado que ambas variables θ_4, θ_5 modifican la orientación del efector final [3].

$${}^0A_5 = {}^0A_3 {}^3A_5 \quad \text{Ec (1.26)}$$

$$({}^0A_3)^{-1} {}^0A_5 = {}^3A_5 \quad \text{Ec (1.27)}$$

Sabiendo que:

$$({}^0A_3) = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \quad \text{Ec (1.28)}$$

$$({}^3A_5) = {}^3A_4 {}^4A_5 \quad \text{Ec (1.29)}$$

Por lo tanto, resolviendo la Ec (1.27), con la ayuda de la Ec (1.28) y la Ec (1.29), se obtiene Ec (1.30).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} c\theta_1 * c(\theta_2 + \theta_3) & s\theta_1 * c(\theta_2 + \theta_3) & s(\theta_2 + \theta_3) \\ -c\theta_1 * s(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_1 * s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) \\ s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} c\theta_5 * c\theta_4 & -s\theta_5 * c\theta_4 & s\theta_4 \\ c\theta_5 * s\theta_4 & -s\theta_5 * s\theta_4 & -c\theta_4 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{Ec (1.30)}$$

Después de conocer las variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y los elementos de la matriz 0A_5 se puede determinar los valores de θ_4, θ_5 .

Al igualar los elementos de la fila 1, columna 3 de ambos lados de la Ec (1.30), se obtiene θ_4 .

$$\begin{aligned} \text{sen}\theta_4 &= \text{cos}\theta_1 \text{cos}(\theta_2 + \theta_3) a_x + \text{sen}\theta_1 \text{cos}(\theta_2 + \theta_3) a_y \\ &+ \text{sen}(\theta_2 + \theta_3) a_z \end{aligned} \quad \text{Ec (1.31)}$$

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{arcsen}[\text{cos}\theta_1 \text{cos}(\theta_2 + \theta_3) a_x + \text{sen}\theta_1 \text{cos}(\theta_2 + \theta_3) a_y \\ &+ \text{sen}(\theta_2 + \theta_3) a_z] \end{aligned} \quad \text{Ec (1.32)}$$

De la misma manera al igualar los elementos de la fila 3, columna 2, para obtener θ_5 .

$$\text{cos}\theta_5 = \text{sen}\theta_1 o_x - \text{cos}\theta_1 o_y \quad \text{Ec (1.33)}$$

$$\theta_5 = \text{arccos}[\text{sen}\theta_1 o_x - \text{cos}\theta_1 o_y] \quad \text{Ec (1.34)}$$

De esta manera se obtiene los valores de $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ para la cinemática inversa, esto se puede observar en las Ec (1.17), Ec (1.25), Ec (1.22), Ec (1.32) y la Ec (1.34) respectivamente. Además, los valores a_x, a_y, a_z, o_x, o_y y o_z vienen dados por la Ec (1.11).

1.4.2 SENSORES, ACTUADORES Y MÓDULO DE CONTROL

En esta sección se describe los actuadores que serán utilizados en el robot antropomórfico, se debe señalar que no se utilizará sensores externos ya que dentro de la estructura de cada motor se cuenta con sensores que se encargan de realizar su realimentación, además se describe el módulo que será utilizado para la comunicación.

1.4.2.1 Dynamixel MX-28R [6]

Como se mencionó anteriormente el robot antropomórfico que se ensamblará requiere de una gran precisión y repetitividad. Por ello en la sección de la muñeca en la parte superior, en el último grado de libertad se dispondrá un servomotor de la marca Dynamixel MX-28R. Este tipo de motor se caracteriza por su control de posición de 360 grados sin zona muerta, con resolución precisa en 0.088 grados, además de su alta velocidad cuenta con un control PID lo que le hace adecuado para este tipo de aplicación, en la Figura 1.8 se puede observar el servomotor Dynamixel MX-28R [6].



Figura 1.8. Dynamixel MX-28R [6]

Sus principales características son [6]:

- Voltaje de alimentación: 12 VDC
- Sensor de posición: encoder absoluto, 12 bits, 360 grados

- Baud Rate: 4.5 Mbps
- Control de algoritmo: control PID
- Resolución: 4096 pulse/rev
- Modos de funcionamiento:
 - modo de rueda;
 - modo conjunto de 0-360°;
 - modo multivuelta.
- Velocidad sin carga: 55 rev/min a 12 VDC
- Temperatura de funcionamiento: -5 a 80 °C
- Conexión:
 - RS-485, Bus multipunto TTL;
 - Comunicación serial asíncrona semidúplex TTL con 8 bits, 1 parada, sin paridad;
 - Comunicación serial asíncrona RS-485 con 8 bits, 1 parada, sin paridad.
- Retroalimentación: posición, temperatura, carga, voltaje de entrada, etc.
- Corriente de espera: 100 mA
- Peso: 72 g
- Torque: 2.5 Nm

1.4.2.2 Dynamixel MX-64R [7]

De manera similar al actuador mencionado en el literal anterior, se utilizará un servomotor Dynamixel MX-64R (Figura 1.9) este se ubicará en el cuarto grado de libertad que también conforma la muñeca, este posee características similares a la del literal anterior, su diferencia radica en el tamaño y la fuerza que es capaz de ejercer.



Figura 1.9. Dynamixel MX-64R [7]

Las características que difiere del motor previamente mencionado son las siguientes [7]:

- Velocidad sin carga: 63 rev/min a 12 VDC
- Peso: 165 g
- Torque: 6.0 Nm

1.4.2.3 Dynamixel PRO [8]

El siguiente grado de libertad que corresponde es el tercero, el cual se ubica en el codo, para ello es importante destacar que en este punto el actuador ya debe cargar un peso considerable es por ello que se optó por el motor Dynamixel PRO (Figura 1.10) con las siguientes características.



Figura 1.10. Dynamixel PRO [8]

Las características de este motor se presentan a continuación [8]:

- Voltaje de alimentación: 24 VDC
- Baud Rate: 10.5 Mbps
- Resolución: 501,923 pulse/rev
- Modos de operación:
 - o Modo de control de par;
 - o Modo de control de velocidad;
 - o Modo de control de posición;
 - o Modo de control posición extendida
- Velocidad sin carga: 33.1 rev/min
- Temperatura de funcionamiento: -5 a 55 °C
- Conexión: comunicación serial asíncrona RS-485 con 8 bits, 1 parada, sin paridad.
- Corriente de espera: 80 mA
- Peso: 855 g
- Torque continuo 14 Nm

Antes de continuar con los restantes dos grados de libertad, se debe destacar que los tres tipos de actuadores vistos previamente se conectarán en serie por medio de un módulo RS-485, esto ayudará a reducir la cantidad de cables necesarios y lo más importante únicamente será necesario un puerto de comunicación del sistema embebido.

1.4.2.4 Torxis [9]

Para los grados de libertad 1 y 2 se dispondrá de tres motores Torxis, el primer motor será colocado en la base permitiendo el giro de esta, mientras que los dos restantes se encargarán de la elevación y descenso de todo el brazo en conjunto. Como es de suponer al tratarse de motores ubicados en la parte más baja del sistema deben cargar con todo el peso de la estructura y los actuadores mencionados previamente, es decir, estos motores deben presentar una gran capacidad de carga además de su precisión y repetitividad. Este motor se observa en la Figura 1.11.



Figura 1.11. Torxis [9]

El motor Torxis que se utilizará tiene las siguientes características [9]:

- Modelo: i00600 Torxis
- Voltaje de alimentación: 12 VDC
- Rango de movimiento: 90 grados
- Torque: Torque pico 22.6 [Nm]
- Velocidad de rotación nominal: 10 RPM

Estos motores no necesitarán de un módulo para su comunicación, sin embargo, serán conectados de manera serial, eso quiere decir, en total serán necesarios únicamente dos puertos de comunicación serial independientes para el control de los seis motores propuestos para la implementación.

1.4.2.5 Módulo RS-485 [10]

El estándar de comunicación RS-485 permite la comunicación multipunto de hasta 32 equipos emisor-receptor siempre y cuando posean un bus de datos común, su modo de trabajo es diferencial además de poseer un modo de transmisión half-duplex [11].

El módulo RS-485 ayuda a enlazar la comunicación entre el microcontrolador para el control de los motores, en la Figura 1.12 se puede observar el módulo a utilizarse.

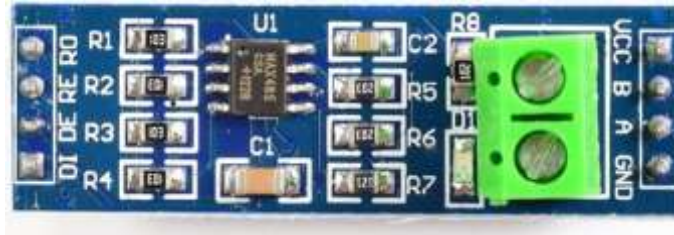


Figura 1.12 Módulo RS-485 [10]

Sus características se muestran a continuación [10]:

- Voltaje de operación: 3.3 VDC
- Interface serial
- Modo de operación: half/full dúplex aislado, conmutable
- Posee resistencia de terminación integrada conmutable

1.4.3 SISTEMA EMBEBIDO

Los sistemas embebidos son sistemas computacionales, diseñados de tal manera que se pueda realizar funciones específicas, estos sistemas poseen un microcontrolador que es el encargado del procesamiento central del sistema, actualmente existen varias alternativas de microprocesadores que se pueden encontrar en el mercado, su elección depende del tipo de aplicación, marca, capacidad de procesamiento y las combinaciones de los sistemas periféricos que se desea integrar [12]. Adicional se le suma la plataforma donde se desea desarrollar.

El sistema embebido que se seleccionó es el Arduino Mega debido a que cuenta con 3 puertos de comunicación serial, esto es de suma importancia ya que un puerto de comunicación se encarga del control de los motores Dynamixel mientras que el otro de los Torxis, asimismo, la plataforma Arduino posee un gran número de librerías incluyendo las encargadas de comandar dichos motores.

1.4.3.1 Arduino Mega [13]

La placa para utilizarse en este proyecto es el Arduino Mega. En la Figura 1.13 se puede observar el diseño físico de la placa.



Figura 1.13. Arduino Mega [13]

Sus características principales son [13]:

- Voltaje de alimentación: 7 – 12 VDC
- Voltaje de operación: 5 VDC
- Memoria SRAM: 8 KB
- Memoria EEPROM: 4 KB
- Pines analógicos: 16 pines
- Pines digitales: 54, 15 salidas PWM
- Frecuencia del reloj: 16 MHz
- Consumo de corriente por pin: 20 mA

Una vez conocidos todos los elementos que componen el robot antropomórfico y las características de cada uno, se tiene una idea más clara de cómo será su ensamblaje, es por ello que en el siguiente capítulo se abordará temas más puntuales como la parte mecánica y el diseño electrónico.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo de integración curricular presenta el método explicativo, descriptivo y experimental dado que se guiará en dos proyectos previos, el primero nombrado “Investigación de Soluciones Tecnológicas Inteligentes para Exploración y Transporte de Objetos en Zonas Nocivas para Seres Humanos” perteneciente al Proyecto PIMI-14-04 [14] y por otro lado el proyecto de titulación, “Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos” de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional [3], del cual se utilizará el diseño del robot antropomórfico de cinco grados de libertad.

En el capítulo 1 se encuentra detallado la fase teórica, donde se realiza revisiones bibliográficas de robots con arquitectura antropomórfica, su clasificación y estructura, de igual manera se detalla los tipos de cinemática, pues de ambas depende el movimiento espacial del robot.

La fase de diseño, análisis e implementación metodológica se encuentra en el capítulo 2, en este capítulo se encuentra los detalles del diseño, la manufacturación de las piezas, así como la implementación del robot antropomórfico, asimismo se detalla el diseño de la placa de control para los motores.

Es necesario recalcar que la fase de simulación y validación se encuentra en el Tomo II de este trabajo de integración curricular, en el cual se detalla los diferentes softwares que se utilizan, su estructura y los resultados finales que se obtienen al realizar las pruebas de funcionamiento. Es por ello que se necesita revisar el Tomo I y Tomo II para comprender en su totalidad el presente trabajo de integración curricular.

2.1 ENSAMBLAJE MECÁNICO

En este apartado se encuentra detallada la descripción del diseño que será implementado, así como la ubicación de los actuadores dentro del robot antropomórfico, finalizando con el ensamblaje de este, como se mencionó previamente el objetivo del presente trabajo no se centra en el diseño y análisis de las piezas mecánicas.

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO A IMPLEMENTARSE

Para el diseño mecánico se tomará como base del trabajo de titulación “Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos”, en dicho documento se realiza todo el análisis de un robot antropomórfico de 5 grados de libertad

desde el punto de vista mecánico, esto implica que realiza el modelado de todas las piezas con ayuda del Software SOLIDWORKS en el cual también se analiza la resistencia de las mismas con el material propuesto en el escrito, el diseño final del brazo se puede observar en la Figura 2.1, y los planos de las piezas que lo conforman se encuentran en el Anexo 1. Adicional de aborda la temática de la cinemática directa e inversa y propone una simulación con dicho análisis. Cabe mencionar que una razón principal para tomar como base el trabajo de titulación previamente mencionada es debido a que las piezas fueron diseñadas para los actuadores adquiridos en el proyecto PIMI-14-04 que fueron facilitadas para la implementación del presente trabajo de integración curricular.

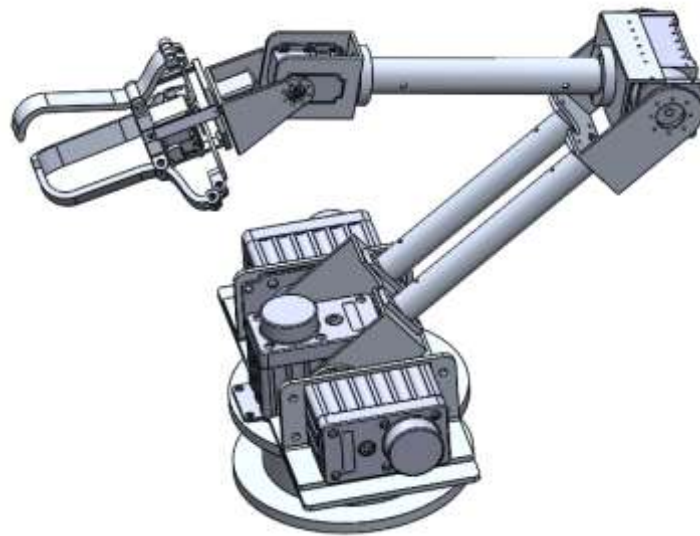


Figura 2.1 Brazo manipulador con pinza de dos dedos [3]

El diseño se encuentra dividido en dos subcomponentes, se tiene la base y el brazo, estos se encuentran especificados a continuación:

2.1.1.1 Base [3]

La base sirve como soporte del brazo, para una perfecta rotación se utiliza una base con rodamientos con ayuda del acople del servomotor Torxis. Estos rodamientos a pesar de requerir una estructura más elaborada y precisa permiten soportar diferentes tipos de cargas a distintos momentos. La base para implementarse en el ensamblaje se puede observar en la Figura 2.2.

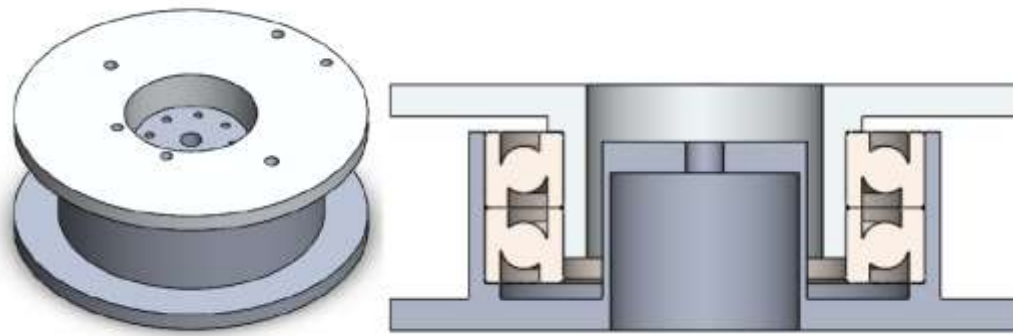


Figura 2.2 Base con rodamientos [3]

2.1.1.2 Brazo [3]

El brazo que se escoge es el brazo tubular, este se encuentra conformado por tres eslabones de tubo, estos se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- Dos en el primer tramo, es decir entre el antebrazo y la base, estos tubos se unen con chapas en forma de "C" para mantener una distancia entre ellos.
- Uno en el segundo tramo, ubicado entre el antebrazo y la muñeca

A pesar de las ventajas que tiene este diseño, es importante recalcar que su peso es elevado, por lo que el peso final del robot antropomórfico incrementa. En la Figura 2.3 se puede observar el brazo tubular



Figura 2.3. Brazo Tubular [3]

Como se explicó anteriormente, el diseño final implementado en este trabajo con su respectiva base y brazo se puede observar en la Figura 2.1, sin embargo, la pinza no fue manufacturada, el agarre del elemento final se lo realizara sin la necesidad de implementar una pinza, se debe notar que los 5 grados de libertad no incluyen en la apertura y cierre de esta.

2.1.2 ANÁLISIS DE MATERIALES

Para la implementación de las piezas previamente mencionadas, el material que se utiliza es el acero de transmisión el cual no es el mismo que se explica en el trabajo de titulación de donde se obtuvo el diseño de estas, por lo que se realiza el análisis de esfuerzo del nuevo material, verificando que este es más resistente y sus costos de fabricación son menores.

El análisis de esfuerzo se realiza en el software Ansys 2022 R2 y se hace una comparación con el análisis de esfuerzo realizado con el material original.

2.1.2.1 Análisis con material original

El material que se utilizó en el trabajo de titulación fue el aluminio, en la Figura 2.4, la Figura 2.5 y la Figura 2.6 se muestra el análisis obtenido en dicho trabajo de titulación.

- Acople de la muñeca

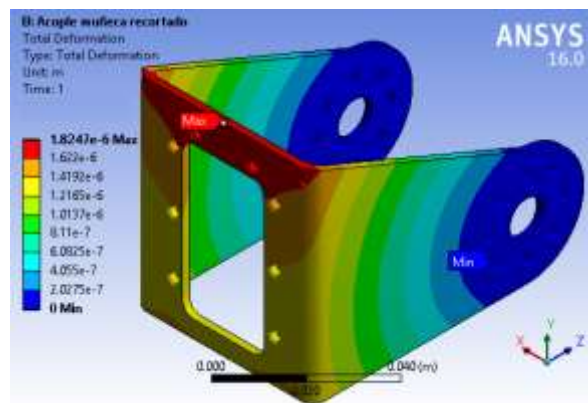


Figura 2.4 Deformación del acople de muñeca. [3]

- Acople del antebrazo

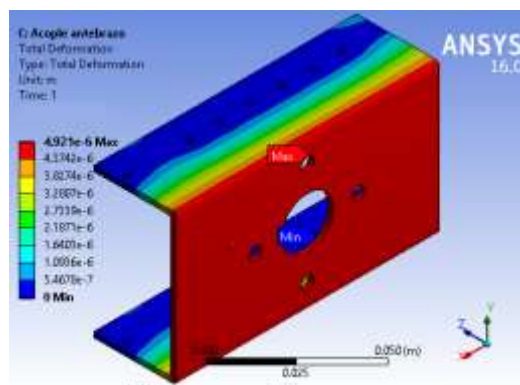


Figura 2.5 Deformación del acople de antebrazo. [3]

- Acople del brazo

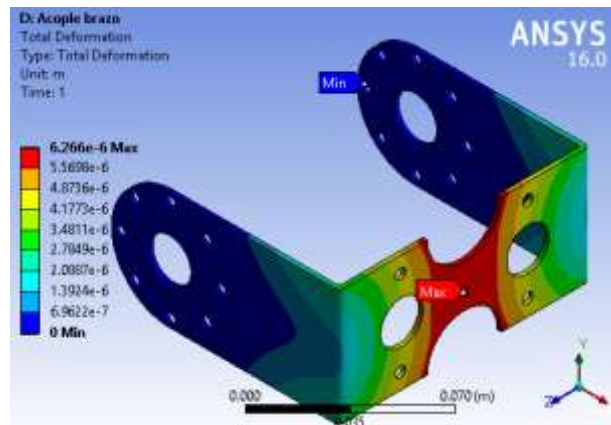


Figura 2.5 Deformación del acople de brazo. [3]

2.1.2.2 Análisis con acero de transmisión

- Acople de la muñeca

En la Figura 2.7 se puede observar el acople de la muñeca con su respectiva deformación, dado que su ubicación es en el penúltimo eslabón, esta no requiere de mucho esfuerzo, por lo tanto, su deformación no posee un punto máximo que llegue a su límite.

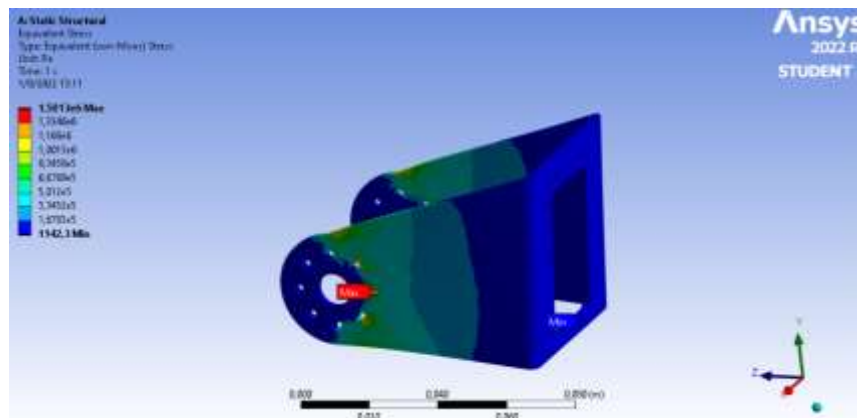


Figura 2.7 Deformación del acople de muñeca

- Acople del antebrazo

En la Figura 2.8 se observa la deformación del antebrazo, como se nota este llega a su límite máximo, esto se debe a que al estar en un punto medio del brazo debe realizar mayor esfuerzo.

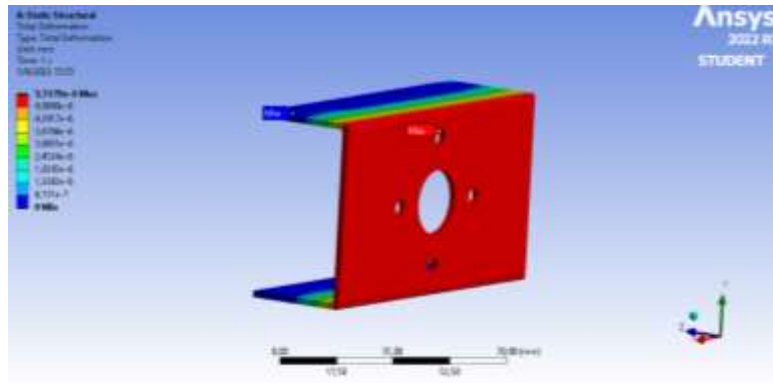


Figura 2.8 Deformación del acople de antebrazo

- Acople del brazo

El acople del brazo se lo puede observar en la Figura 2.9, de igual manera se analiza la deformación que este tiene, como se puede notar no llega al límite máximo de deformación.

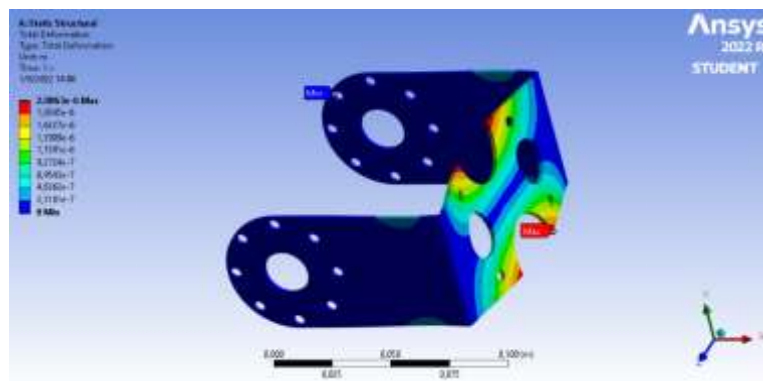


Figura 2.9 Deformación del acople de brazo

Si se compara la Figura 2.7, la Figura 2.8 y la Figura 2.9 con los análisis realizados en el trabajo de titulación que se muestran en la Figura 2.4, la Figura 2.5 y la Figura 2.6, se puede notar que los esfuerzos realizados por las piezas con el material original son mayores a los esfuerzos realizados con el material que fue implementado, es por ello que se llegó a la conclusión que el acero de transmisión es un material adecuado para este proyecto.

2.1.3 DIRECCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS ACTUADORES

En el apartado 2.1.1 se encuentra explicada la ubicación de cada uno de los actuadores dentro del robot antropomórfico, como se pudo observar se tiene 6 motores, estos motores son:

- 3 motores Torxis;
- 1 motor Dynamixel PRO;

- 1 motor Dynamixel MX-28 y;
- 1 motor Dynamixel MX-64.

A continuación, se realiza una explicación más detallada de la ubicación de los motores a utilizarse.

2.1.3.1 Ubicación del motor Dynamixel MX-28 y del Dynamixel MX-64

Como se puede observar en la Figura 2.10 la ubicación del motor Dynamixel MX-28 se encuentra para el movimiento rotacional final, adicionalmente, el motor Dynamixel MX-64 da el movimiento de la muñeca.

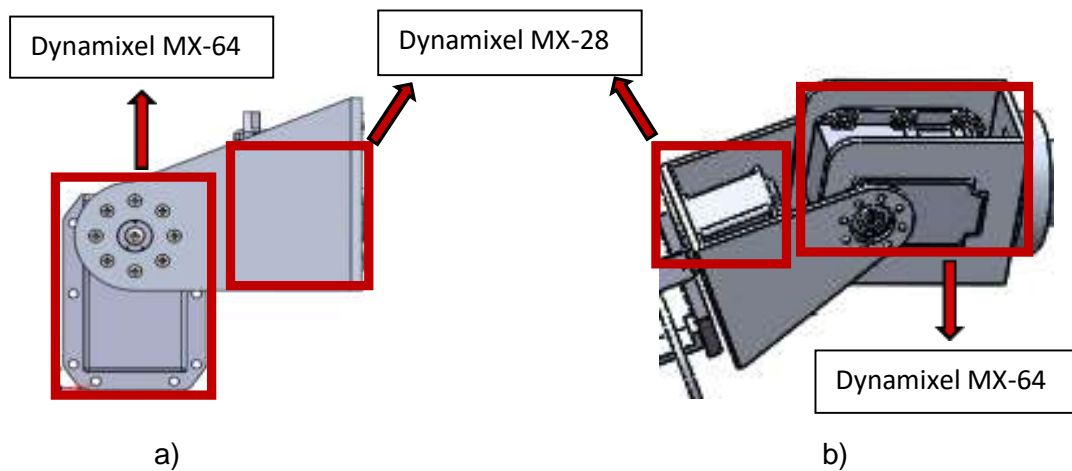


Figura 2.10. Ubicación de motores Dynamixel MX-28 y MX-64, a) vista lateral, b) vista superior

2.1.3.2 Ubicación del motor Dynamixel PRO

La ubicación del motor Dynamixel PRO es en el antebrazo, este da su movimiento, dicha ubicación se puede observar en la Figura 2.11.

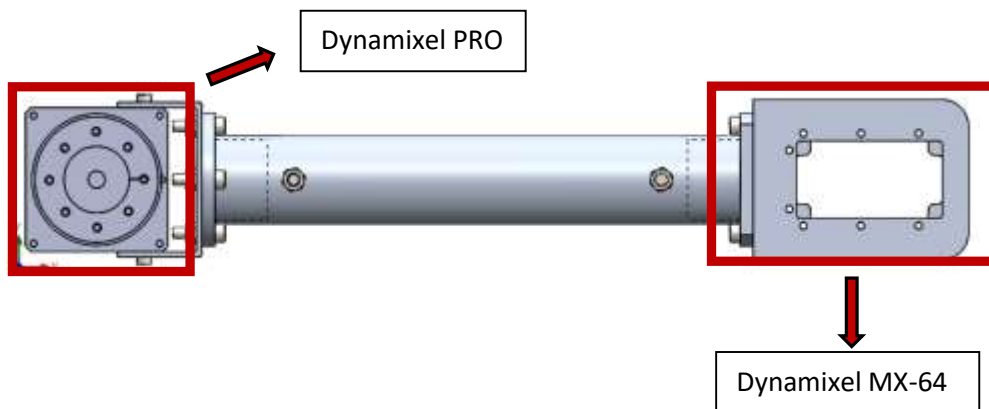


Figura 2.11. Ubicación de motor Dynamixel PRO

2.1.3.3 Ubicación de los motores Torxis

La ubicación de los motores Torxis se encuentra en la base del robot, es decir da el movimiento al brazo. Su ubicación se puede observar en la Figura 2.12.

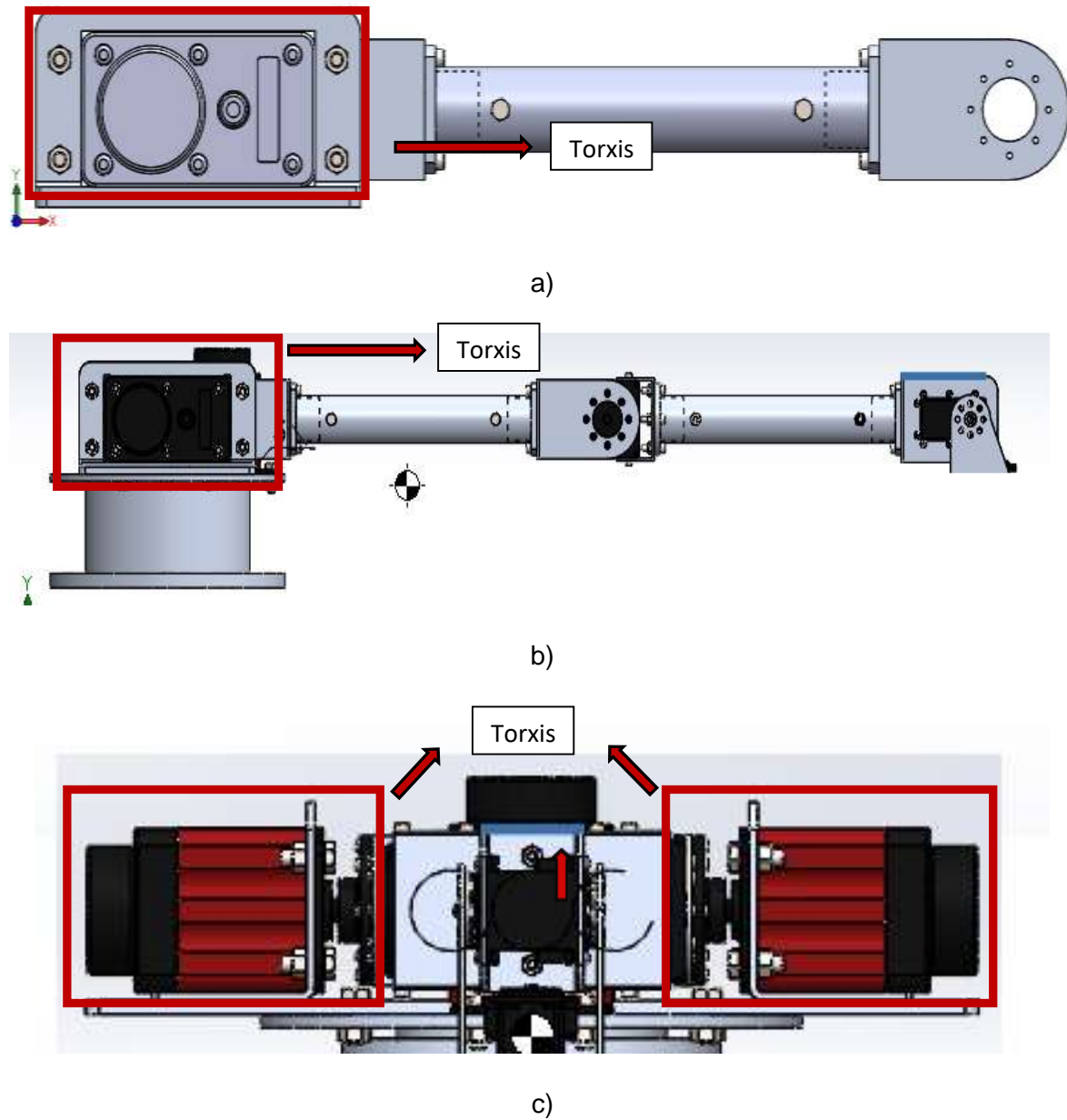


Figura 2.12. Ubicación de motores Torxis, a) vista lateral, b) vista horizontal, c) vista superior

2.1.3.4 Ubicación de los motores

Para conocer de una manera más precisa la ubicación de los motores se puede observar la Figura 2.13

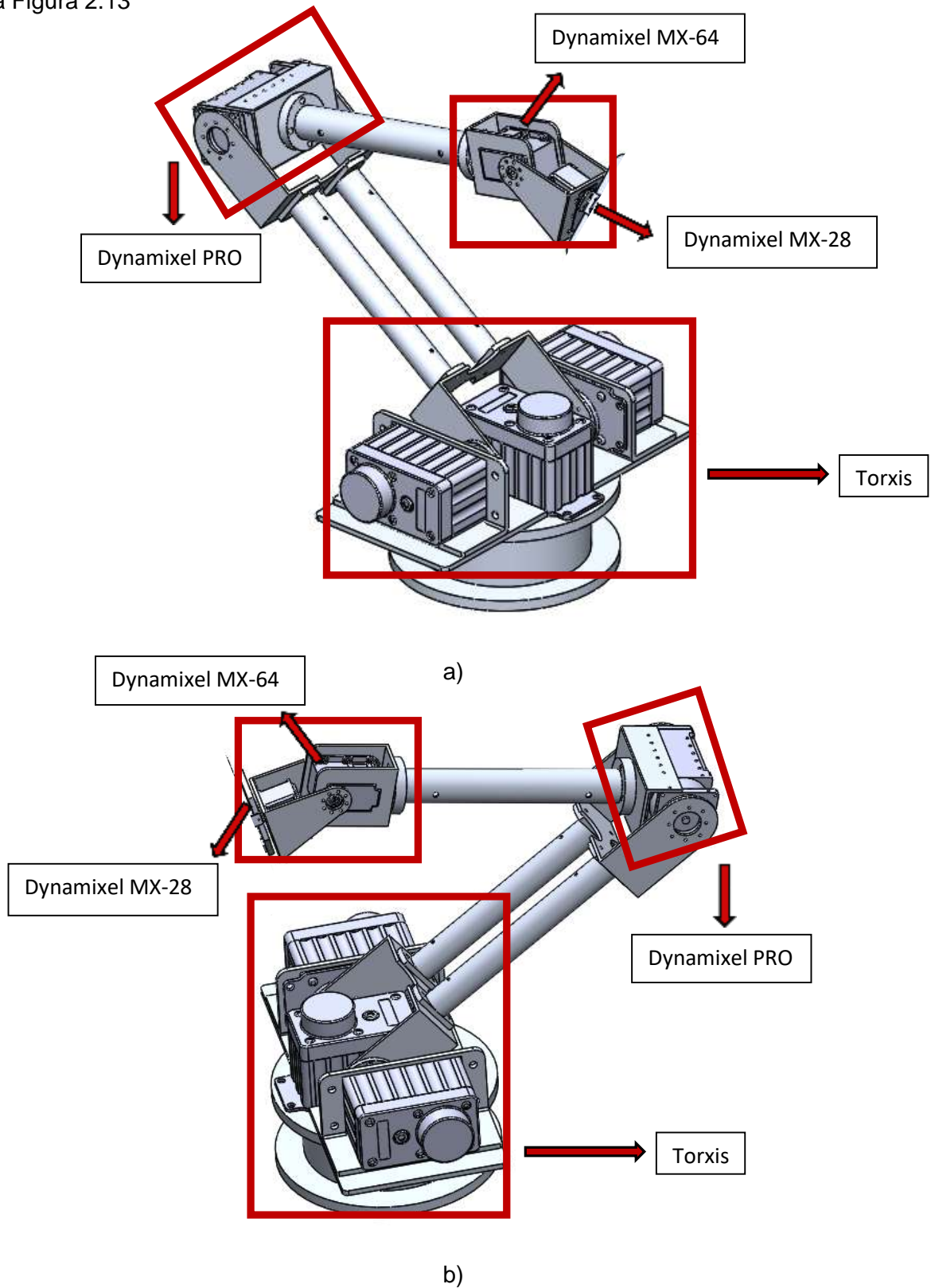


Figura 2.13 Ubicación de los motores, a) vista lateral derecha, b) vista lateral izquierda

2.1.3.5 Grados de rotación de los motores

Una vez conocida la ubicación de los motores se indica a continuación los grados de rotación que debe tener cada uno de ellos

- Eslabón 1: rotación entre 0° a 180°: esto se debe a que el propósito de este proyecto es el de realizar el trazado de figuras por lo que en este rango de posiciones se colocará la plataforma donde realizará tal acción.
- Eslabón 2: rotación entre 0° a 90°: el rango de este movimiento se debe a la forma constructiva del robot, ya que no permite un movimiento más amplio debido a su estructura.
- Eslabón 3: rotación entre 0° a 150°: este movimiento se debe a que el trazado de figuras se realiza en la parte frontal, no se necesita un rango más amplio por lo que no serviría para el propósito de este proyecto.
- Eslabón 4: rotación entre 0° a 180°: al igual que el eslabón 2, este no puede realizar movimientos más amplios que el rango especificado, debido a la forma constructiva del robot.
- Eslabón 5: rotación entre 0° a 360°: este eslabón puede moverse libremente los 360° debido a que no posee ninguna restricción física para el trazado de figuras.

2.1.3.6 Ensamblaje del robot antropomórfico

En la Figura 2.14 se puede observar las piezas manufacturadas en acero de transmisión, estas incluyen los acoples para cada uno de los motores, las estructuras del brazo, antebrazo y muñeca, la base con sus respectivos rodamientos y los brazos tubulares. Es preciso enfatizar que para la unión entre motores y piezas se utiliza los pernos incluidos en cada uno de los motores, por otro lado, en el caso de las demás piezas se utiliza pernos con tuercas adquiridas de manera comercial.

Una vez obtenidas las piezas se procede con el ensamblaje final del robot antropomórfico, en este ensamblaje se nota la ubicación de cada uno de los actuadores, esto se puede observar en la Figura 2.15



Figura 2.14. Piezas manufacturadas



a)



b)

Figura 2.15. Ensamblaje final. a) vista lateral derecha, b) vista posterior izquierda

Se puede resaltar que los cables de conexión para todos los motores se encuentran cruzando internamente la estructura física (Figura 2.16), llegando a la parte inferior con los terminales listos para su conexión en la placa de control (Figura 2.17).



a)



b)

Figura 2.16. Cables de conexión. a) por la estructura de la muñeca, b) por la estructura del antebrazo

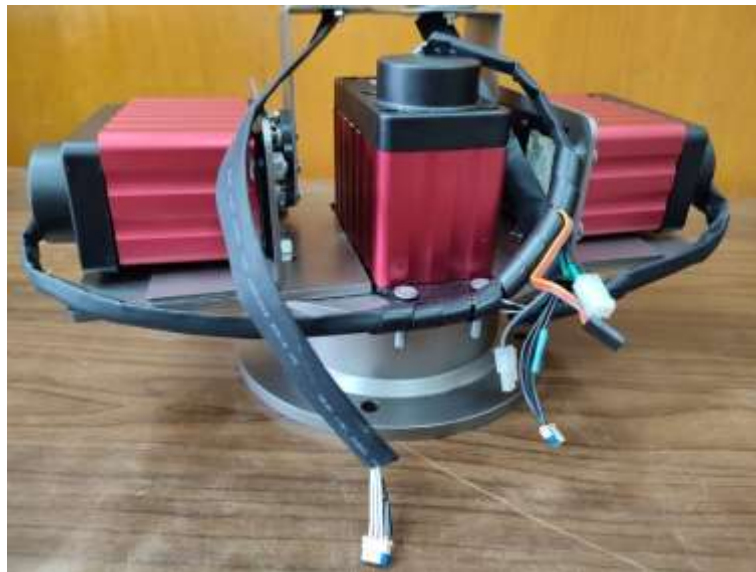


Figura 2.17. Terminales de los actuadores

2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

La arquitectura del robot antropomórfico a implementarse se encuentra constituida por el sistema embebido que se trata del Arduino Mega, adicional se tiene el módulo RS-485, los

motores, la PC y la fuente de alimentación, esta arquitectura se puede observar en la Figura 2.18.

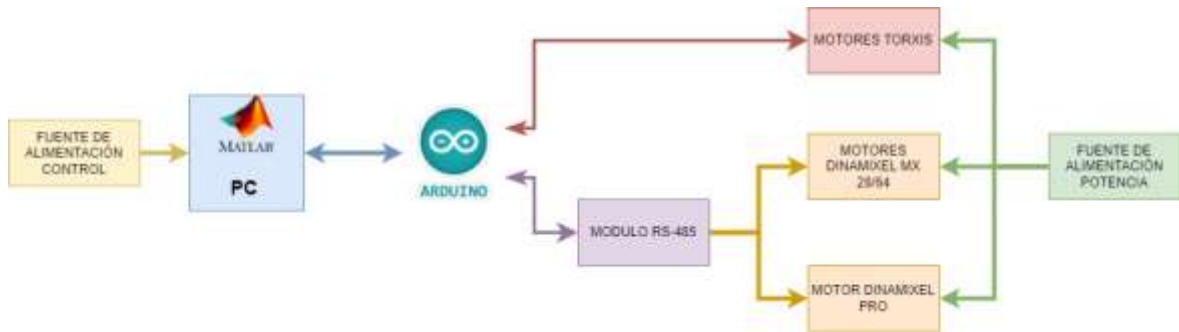


Figura 2.18 Diagrama de bloques del sistema electrónico

Para el diseño electrónico, en lo que respecta a hardware se tiene el Arduino mega, este sirve como lazo entre los actuadores con sus respectivos sensores y el algoritmo de control que se encuentra en la PC. Es necesario notar que el sistema embebido únicamente se encarga de enviar las acciones que comandan el posicionamiento de los motores y recibir la información de la posición actual de los actuadores, es decir, su programación interna es mínima. Esto se optó debido a que la PC posee un procesamiento de datos mayor a la del sistema previamente indicado, como se observa en la Figura 2.18 la arquitectura se encuentra conformada por ciertos componentes y elementos que se encuentran en cada bloque. A continuación, se describe las principales funciones de cada uno de estos:

- Motor Dynamixel MX-28: el motor Dynamixel MX-28 se utilizará para los movimientos rotacionales del efector final, su ubicación se observa en la Figura 2.19



Figura 2.19 Ubicación del motor Dynamixel MX-28

- Motor Dynamixel MX-64: el motor Dynamixel MX-64 es el encargado del movimiento de la muñeca, este se observa en la Figura 2.20

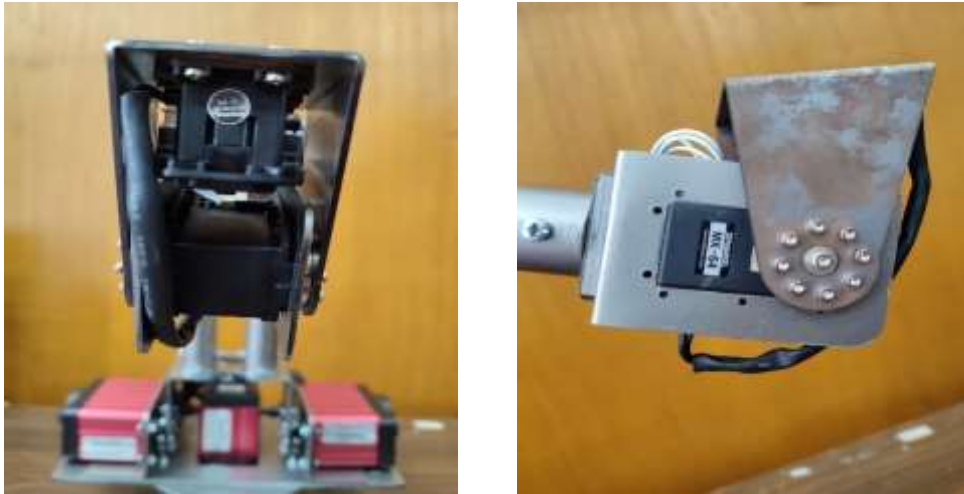


Figura 2.20 Ubicación del motor Dynamixel MX-64

- Motor Dynamixel PRO: este motor posee como función el movimiento del antebrazo, su ubicación se observa en la Figura 2.21

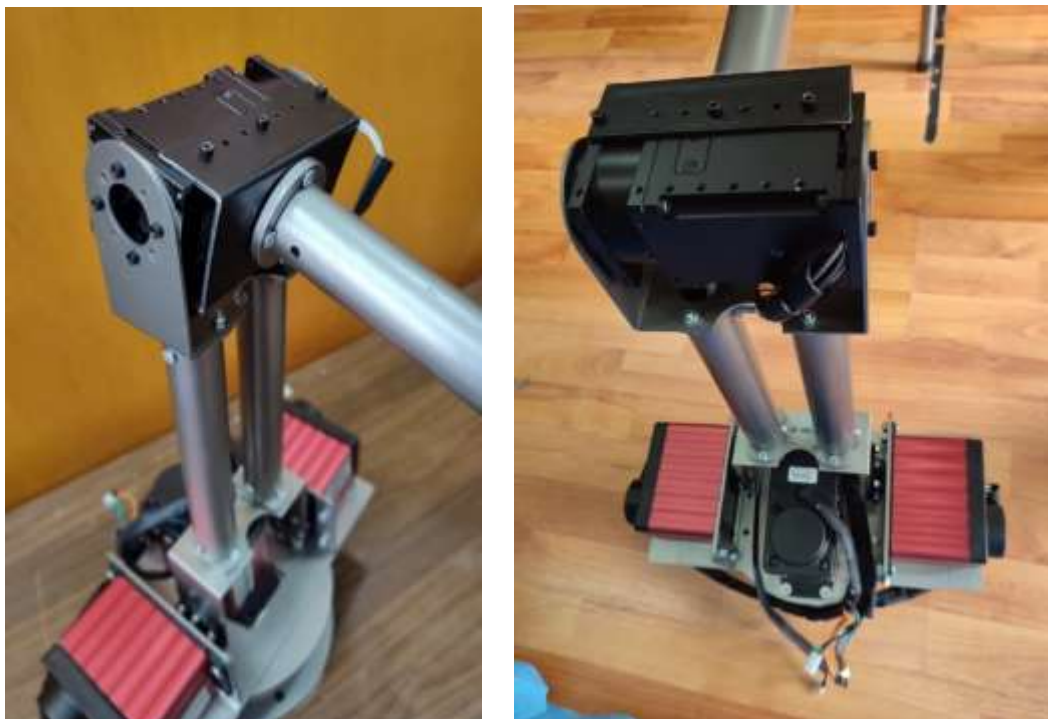


Figura 2.21 Ubicación del motor Dynamixel Pro

- Motores Torxis: 3 motores que se ubican en la base del robot, su función es el movimiento del brazo en general, su ubicación se puede ver en la Figura 2.22

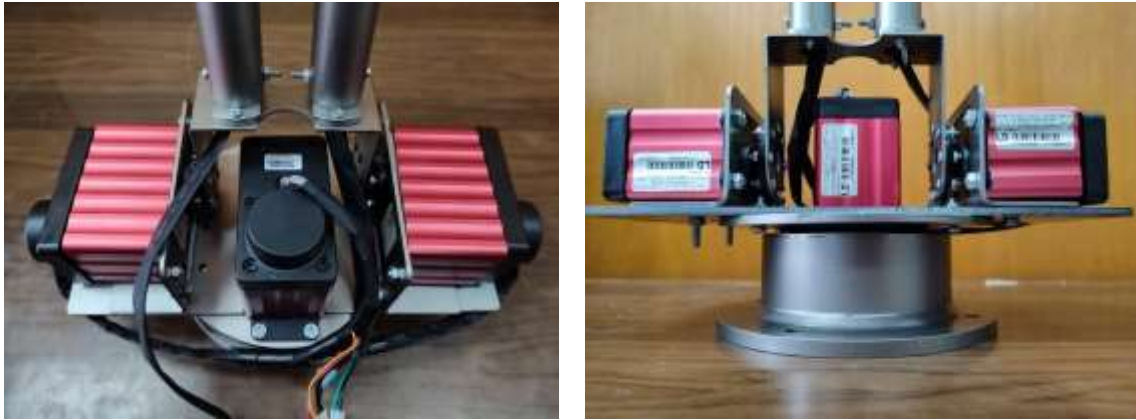


Figura 2.22 Ubicación de los motores Torxis

- Módulo RS-485: el módulo se utiliza para entablar la comunicación entre los actuadores y el sistema embebido.
- Arduino Mega: es el sistema embebido en el que se encuentra el programa para el movimiento del robot.
- Fuente de alimentación: suministro de energía para los elementos detallados en esta sección.
- PC: ubicación del programa de la interfaz del usuario.

2.2.1 SISTEMA EMBEBIDO Y PERIFÉRICOS

El microcontrolador que se utiliza es el Arduino Mega, a este se le conecta los motores, la fuente de alimentación, el módulo RS-485 y la PC, en la Figura 2.23 se indica el esquema de conexión.

Basándose en la Figura 2.23 se realiza un resumen en la Tabla 2.1, donde se indica la distribución de pines que son utilizados del Arduino Mega:

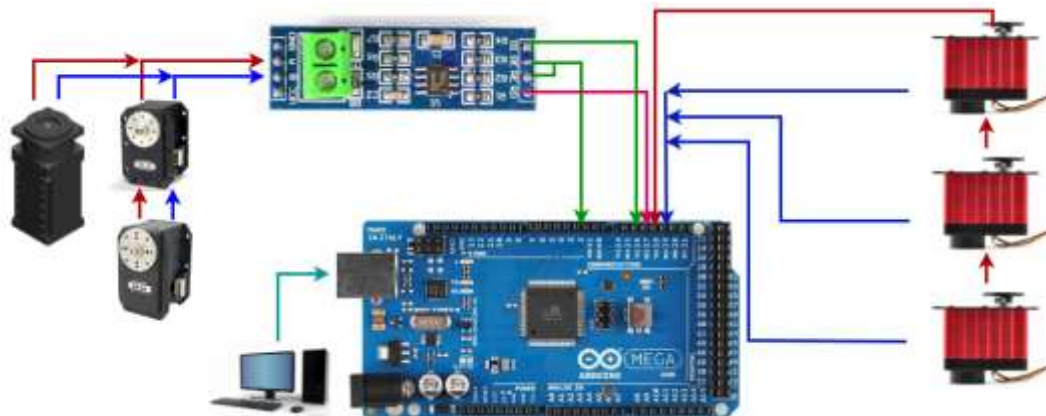


Figura 2.23 Esquema general del sistema electrónico

Tabla 2.1. Análisis de pines de conexión del sistema embebido

Elemento	Pin de conexión	Descripción
ARDUINO	P2	Conexión con RE+DE del módulo de comunicación RS-485.
	P16	Conexión con DI del módulo RS-485, pin TX.
	P17	Conexión con RO del módulo RS-485, pin RX.
	P18	Conexión con pines en serie de los motores TORXIS, TX.
	P19	Conexión con pines en serie de los motores TORXIS, RX
	GND	Tierra común entre los diferentes elementos.
	VCC (+5V)	Alimentación módulo RS-485.

Además, en la Tabla 2.2 se puede observar cómo es la conexión de los demás elementos, indicando la conexión de los pines tanto del elemento de salida como del elemento de entrada.

Tabla 2.2. Análisis de los elementos de salida y, de entrada

Elemento de salida	Pin de salida	Pin de entrada	Elemento de entrada
RS-485	RE+DE	P2	Arduino
	DI	P16	Arduino
	RO	P17	Arduino
Dynamixel MX-28/64	GND	GND	Arduino
	VDD	12V	Fuente
	D+	A	RS-485
	D-	B	RS-485

TORXIS	GND	GND	Arduino
	VDD	12V	Fuente
	RX	P18	Arduino
	TX	P19	Arduino

2.2.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación es la que se encarga de suministrar la energía necesaria para cada uno de los elementos electrónicos que se encuentran conformando el robot antropomórfico, sin embargo, para dicho robot es debe recalcar que se necesita 2 alimentaciones diferentes.

En la Tabla 2.3 se muestra el voltaje y la corriente que puede soportar cada motor de acuerdo con la hoja de datos de cada uno de los actuadores.

Tabla 2.3. Fuente de alimentación de los actuadores

Cantidad	Elemento	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	Dynamixel MX-28	12 (recomendado)	1.4
1	Dynamixel MX-64	12 (recomendado)	1.5
1	Dynamixel PRO	24	1.9
3	Torxis	12	3

2.3 DISEÑO DE PLACA DE CONTROL

Para este diseño se implementa una placa de circuito impreso PCB donde se encuentran los elementos que conforman el circuito electrónico mostrado en la Figura 2.11, así como los conectores para las fuentes de alimentación, esto es de gran importancia dado que son de ayuda en la eliminación de cables, así como en la colocación de los diferentes elementos de forma ordenada.

Para el diseño de esta placa se utilizó el software Altium, este se caracteriza por su versatilidad, fácil implementación de librerías para los componentes y su amplia variedad de herramientas para el diseño de PCBs.

2.3.1 DIAGRAMA CIRCUITAL

En la Figura 2.24 se encuentra el diseño del esquema circuital de la placa de control con los componentes electrónicos que serán utilizados, como se observa se tiene el sistema

embebido que es el Arduino, el módulo RS-485, los conectores para los motores Dynamixel tanto MX28, MX64 y PRO y para los motores Torxis.

En el caso para las fuentes de alimentación se utiliza fuentes externas, por lo que se coloca borneras para el suministro de 12V y 24V.

Para el diseño de la PCB se toma en cuenta varias consideraciones, entre las más importantes se debe tener en cuenta la cantidad de corriente que circulará por ella, además de la gestión térmica, pues de esto depende el grosor de las líneas de enrutamiento, para que estas no se desprendan cuando entre en funcionamiento la placa electrónica, adicionalmente es importante considerar los componentes que serán utilizados para la parte de señal como para la parte de potencia.

En la Figura 2.25 se puede observar la placa electrónica finalizada considerando los puntos indicados previamente.

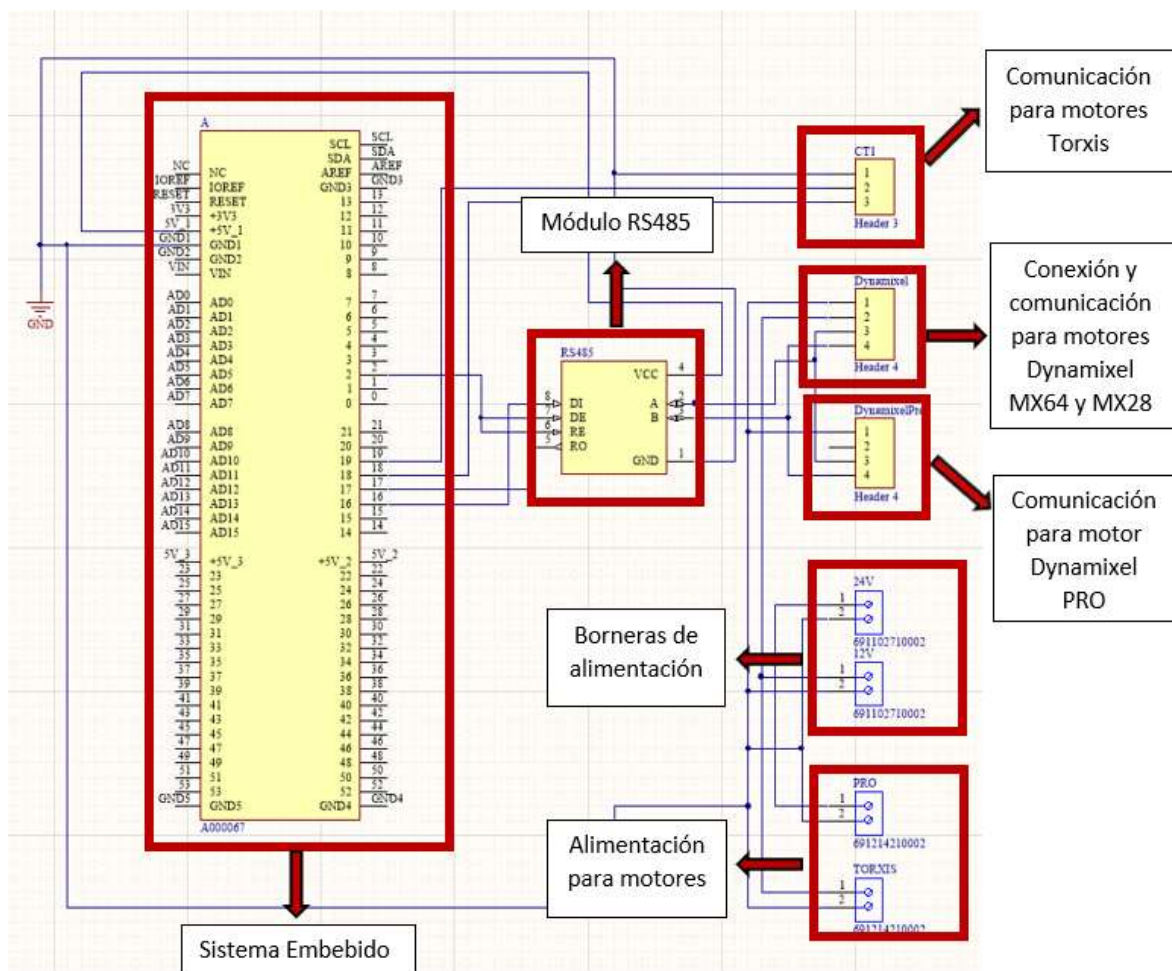


Figura 2.24. Esquema circuital para diseño de la PCB

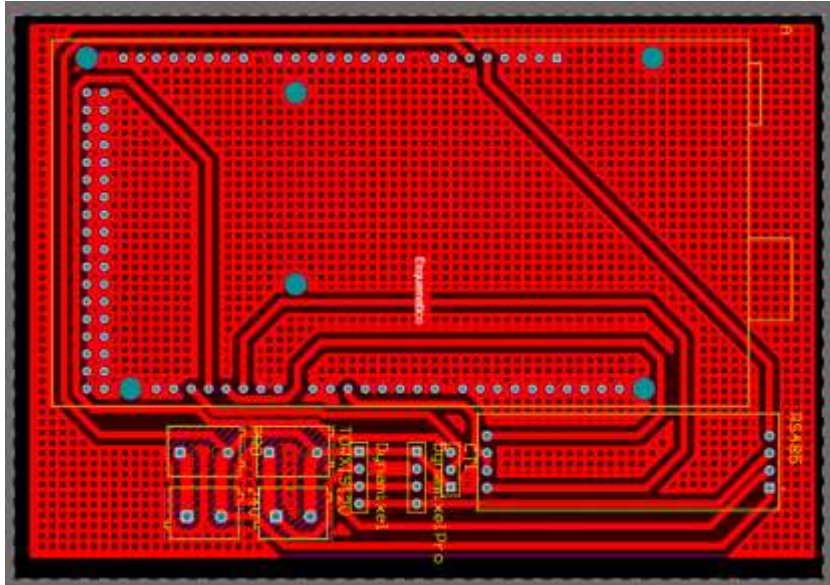


Figura 2.25 Placa de circuito impreso

En la Figura 2.26 se puede observar los elementos en vista 3D, esto hace referencia en cómo serán ubicados los componentes en la placa electrónica final.

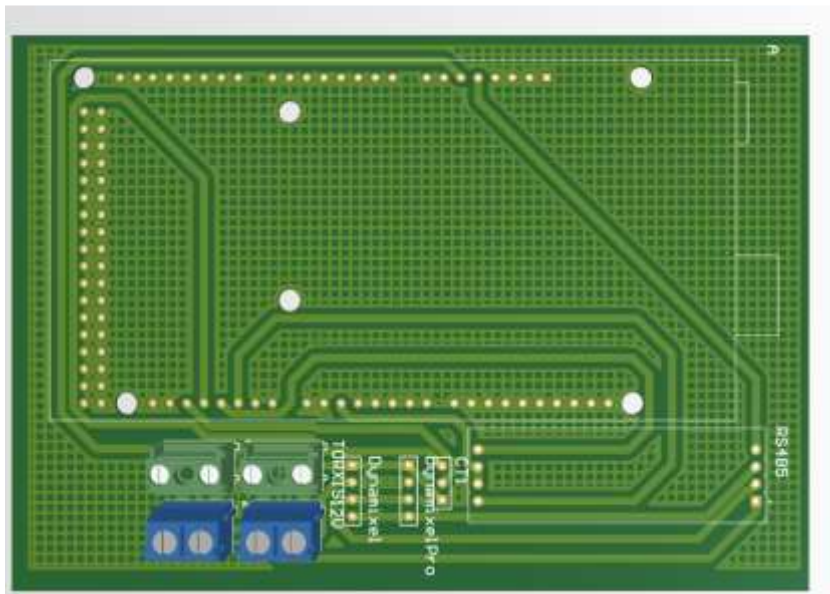


Figura 2.26 Vista 3D

2.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA PLACA

En la Figura 2.27 se puede observar la placa de control terminada, con sus respectivos componentes visto desde la parte superior, mientras que la Figura 2.28 se muestra la parte inferior.



Figura 2.27 Ubicación de los componentes dentro de la placa de control

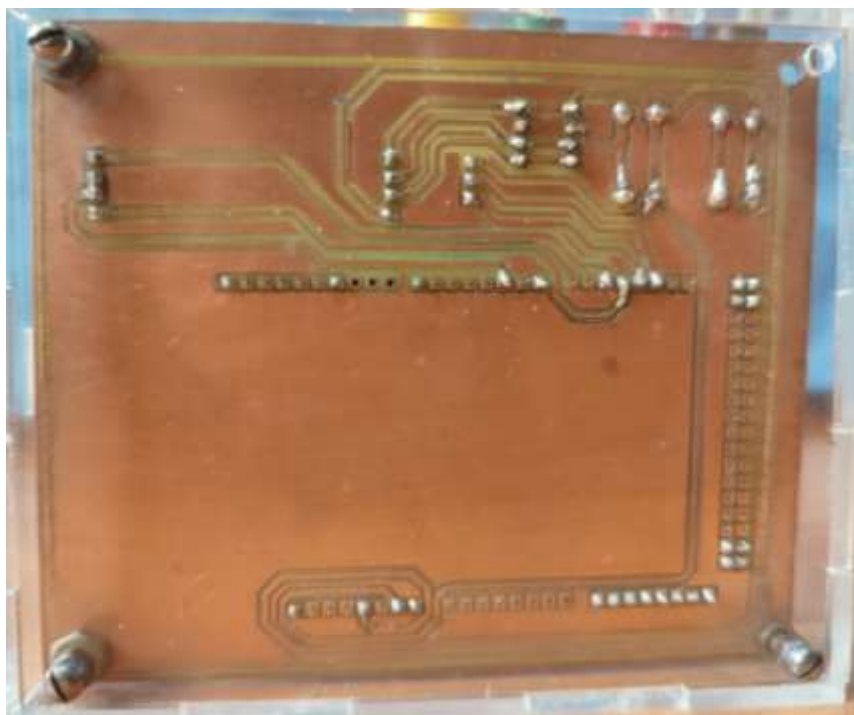


Figura 2.28. Pistas de la placa de control

Una vez obtenida la placa de control se realiza una cubierta para acoplar esta a la estructura del brazo antropomórfico, adicionalmente se coloca borneras para la alimentación de todo el sistema, asimismo se puede notar los espacios por donde se puede conectar los motores y la comunicación con el sistema embebido (Figura 2.29).



Figura 2.29. Placa de control con cubierta

Por último, se muestra el producto final del Tomo I en la Figura 2.30, en la cual se concluye con el ensamblaje mecánico en conjunto con la placa de control.



a)



b)

Figura 2.30. Ensamblaje mecánico con placa de control. a) vista posterior; b) vista lateral izquierda

2.4 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO

En esta sección se incluye un listado con los materiales, elementos y componentes que se utilizaron para el ensamblaje del brazo antropomórfico, así como la respectiva placa de control.

2.4.1 ESTRUCTURA DEL ROBOT

En la Tabla 2.4 se encuentra el detalle de los costos de la manufacturación de cada una de las piezas en acero inoxidable, con estas piezas se obtiene la estructura del robot.

Tabla 2.4 Costos de la manufacturación de las piezas

Cantidad	Elemento	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
2	Acople base	15.00	30.00
1	Acople brazo abajo	15.00	15.00
1	Acople brazo arriba	15.00	15.00

2	Acople muñeca	8.00	16.00
1	Acople antebrazo	10.00	10.00
1	Antebrazo	25.00	25.00
1	Bastidor base	180.00	180.00
1	Bastidor	65.00	65.00
1	Bocin antebrazo	40.00	40.00
1	Bocin cortado antebrazo	40.00	40.00
4	Bocin cortado brazo	40.00	160.00
2	Brazo	25.00	50.00
1	Plataforma	140.00	140.00
1	Retenedor eje	50.00	50.00
2	Rodamientos	60.00	120.00
Subtotal (USD)			956.00

2.4.2 MOTORES Y MÓDULOS

En la Tabla 2.5 se tiene el listado y los costos de los motores y del módulo que se utiliza para la configuración de los parámetros de los motores Dynamixel

Tabla 2.5 Costos de motores y módulo

Cantidad	Elemento	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Motor Dynamixel MX-28R	489.06	489.06
1	Motor Dynamixel MX-64R	661.20	661.20
1	Motor Dynamixel PRO	3182.88	3182.88
3	Motor Torxis	625.86	1877.58
1	Módulo USB2Dynamixel	60.00	60.00
Subtotal (USD)			6270.72

2.4.3 TARJETA DE CONTROL

En la placa de control se incluyeron diferentes elementos y componentes, este listado se puede observar en la Tabla 2.6, así mismo con su respectivo costo.

Tabla 2.6 Costos de los elementos incluidos en la placa de control

Cantidad	Elemento	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Arduino Mega	15.00	15.00
1	Módulo RS-485	1.75	1.75
4	Tira de zócalos	0.75	3.00
2	Tira de espadines	0.75	1.50
2	Borneras 2 pines	0.25	0.50
4	Borneras para alimentación	0.25	1.00
-	Cables	2.50	2.50
1	Placa Electrónica	12.00	12.00
1	Carcasa para placa electrónica	8.00	8.00
Subtotal (USD)			45.25

2.4.4 COSTOS DE INGENIERÍA

Tomando en cuenta que el trabajo de integración curricular fue realizado por dos estudiantes en el tomo I se realiza el análisis para el ensamblaje mecánico, además del análisis de la cinemática que se implementa, por otro lado, en el tomo II se realiza la implementación del control, el enlace entre los motores y la interfaz gráfica para el trazado de las figuras, por ende, los costos de ingeniería considerando un trabajo de 180 horas para cada estudiante a 7 USD la hora es de 1260 USD, por lo tanto, para ambos estudiantes sería de 2520 USD.

2.4.5 COSTO TOTAL

El costo total del prototipo se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Costo total

Costo	Precio Unitario (USD)
Estructura del robot	956.00
Motores y módulo	6270.72
Tarjeta de control	45.25
Costo de ingeniería	3360.00
Total (USD)	10631.97

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 CONCLUSIONES

- Al terminar el ensamblaje del robot antropomórfico con la placa de control se debe notar que se ha cumplido con los objetivos del Tomo I de este proyecto de integración curricular.
- Dado que se ensambló el robot, se debe tomar en cuenta que para un adecuado diseño de las piezas que conforman este, es necesario un diseño mecánico realizado por personas que se encuentren aptas para esto, mientras que para la implementación y control es necesario que lo realicen electrónicos.
- Se comparó dos diferentes materiales, el aluminio propuesto en el trabajo de titulación de mecánica y el acero de transmisión utilizando en el presente trabajo de integración curricular, el primer material es más ligero y costoso, mientras que por otro lado el acero de transmisión es más resistente y robusto por lo que es apto para mayor esfuerzo, además de que es más económico. No obstante, este último requiere de más esfuerzo para su maleabilidad.
- Al ensamblar el robot se observó que cierto tipo de pernos no coinciden con la estructura de las piezas, esto se debe a que se trabajó con elementos comerciales, por ello es importante tener una perspectiva clara de cómo será el ensamblaje final para poder acoplarse a lo que existe en el mercado, por otro lado, para la sujeción de los actuadores se utilizó los mismos pernos que se incluyen en los motores lo cual implicó una mejor sujeción con las piezas.

3.2 RECOMENDACIONES

- Una vez terminado el ensamblaje del robot se recomienda que este se encuentre en un espacio apartado del usuario y delimitado, es decir que no haya la presencia de obstáculos para una correcta manipulación y cuidado del mismo y del operador, debido a que el brazo posee una gran fuerza, alcance y, además, sus materiales son resistentes.
- Al alimentar la placa de control es necesario tener presente que se necesita de dos fuentes de energía, una fuente de 12 voltios y otra de 24 voltios, es por ello que se debe prestar atención al conectar estas en las borneras, pues en caso de una mala corrección no solo la placa podría verse afectada, sino que también los actuadores, los componentes y la PC.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Ollero, de *Robótica, manipuladores y robots móviles*, Barcelona, Alfaomega, 2001.
- [2] N. Sotomayor., «Robotica Industrial,» EPN, 09 2009. [En línea]. Available: <https://es.calameo.com/read/002648021046db0e4cef5>. [Último acceso: 14 06 2022].
- [3] V. Chávez y F. López, *Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [4] A. Vázquez, F. Ramos, R. Fernández, I. Payo y A. Adam, «Cinemática,» de *Robótica Educativa*, Madrid, RA-MA, S.A., 2015, p. 162.
- [5] M. V. Oramas Granja, *Modelación y análisis de la cinemática directa e inversa del manipulador Standford de seis grados de libertad*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [6] «DataSheet Dynamixel MX-28R,» ROS Components , 01 04 2017. [En línea]. Available: <https://www.roscomponents.com/en/actuators/70-mx-28r.html>. [Último acceso: 05 04 2022].
- [7] «DataSheet Dynamixel MX-64R,» Robotics e-Manual, 14 12 2017. [En línea]. Available: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-64/>. [Último acceso: 05 abril 2022].
- [8] «DataSheet Dynamixel PRO,» Robotics e-Manual , 29 09 2017. [En línea]. Available: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/pro/h54-200-s500-r/>. [Último acceso: 05 04 2022].
- [9] «DataSheet i00600 Torxis Servo Pololu,» Electronic components, 18 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.tme.eu/hk/en/details/pololu-1390/servo-motors/pololu/invenscience-i00600-torxis-servo/>. [Último acceso: 05 abril 2022].
- [10] «DataSheet Arduino RS-485,» ARDUINO, 12 05 2021. [En línea]. Available: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mkr-485-shield?selectedStore=us>. [Último acceso: 05 abril 2022].
- [11] C. Miranda Valdivia, «Estándar de comunicación RS-485,» de *Comunicaciones Industriales*, España, Parainfo S.A, 2019, p. 21.
- [12] C. A. Centeno, «Microcontroladores,» de *Programando en C*, Argentina, AIT Servicios Graficos, 2014, pp. 32, 183, 184.
- [13] «DataSheet Arduino Mega 2560,» ARDUINO, 23 01 2015. [En línea]. Available: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>. [Último acceso: 06 abril 2022].
- [14] N. Sotomayor, P. Leica, A. Cela y M. Herrera, «PIMI-14-04, Informe de resultados Adicionales,» Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.

[15] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.

5. ANEXOS

ANEXO I

PLANOS DE PIEZAS

I.1 Base

- Bastidor de la base
- Plataforma

I.2 Brazo

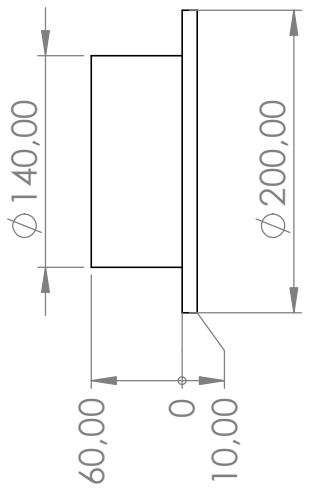
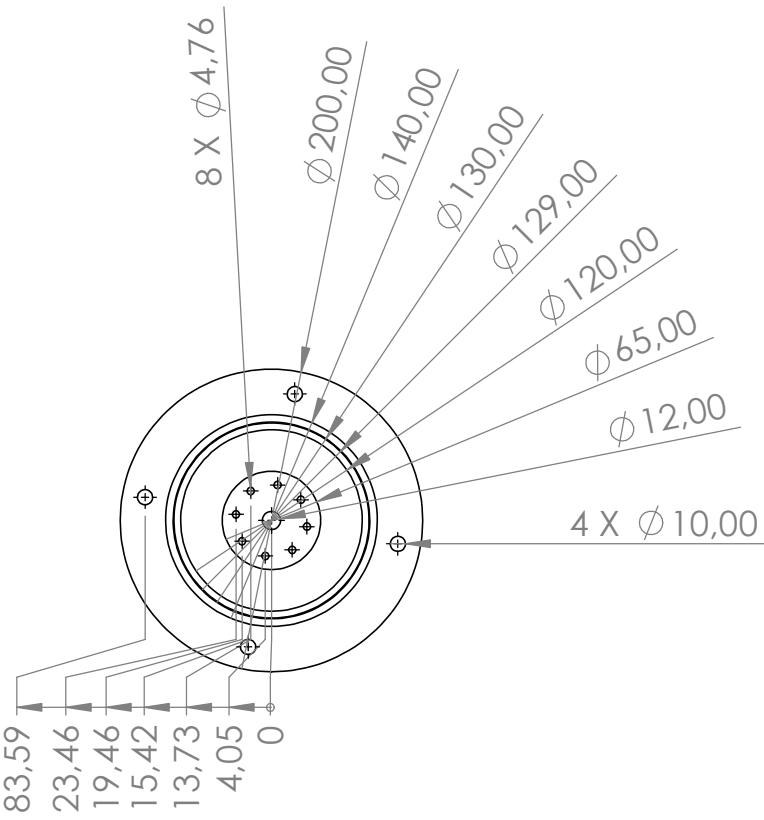
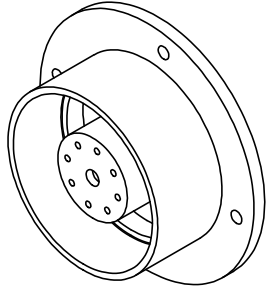
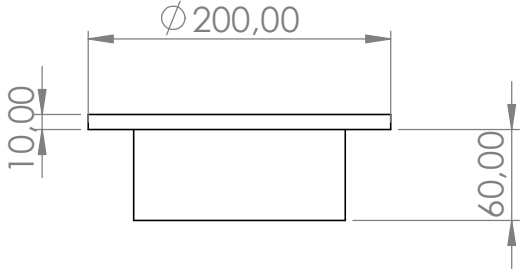
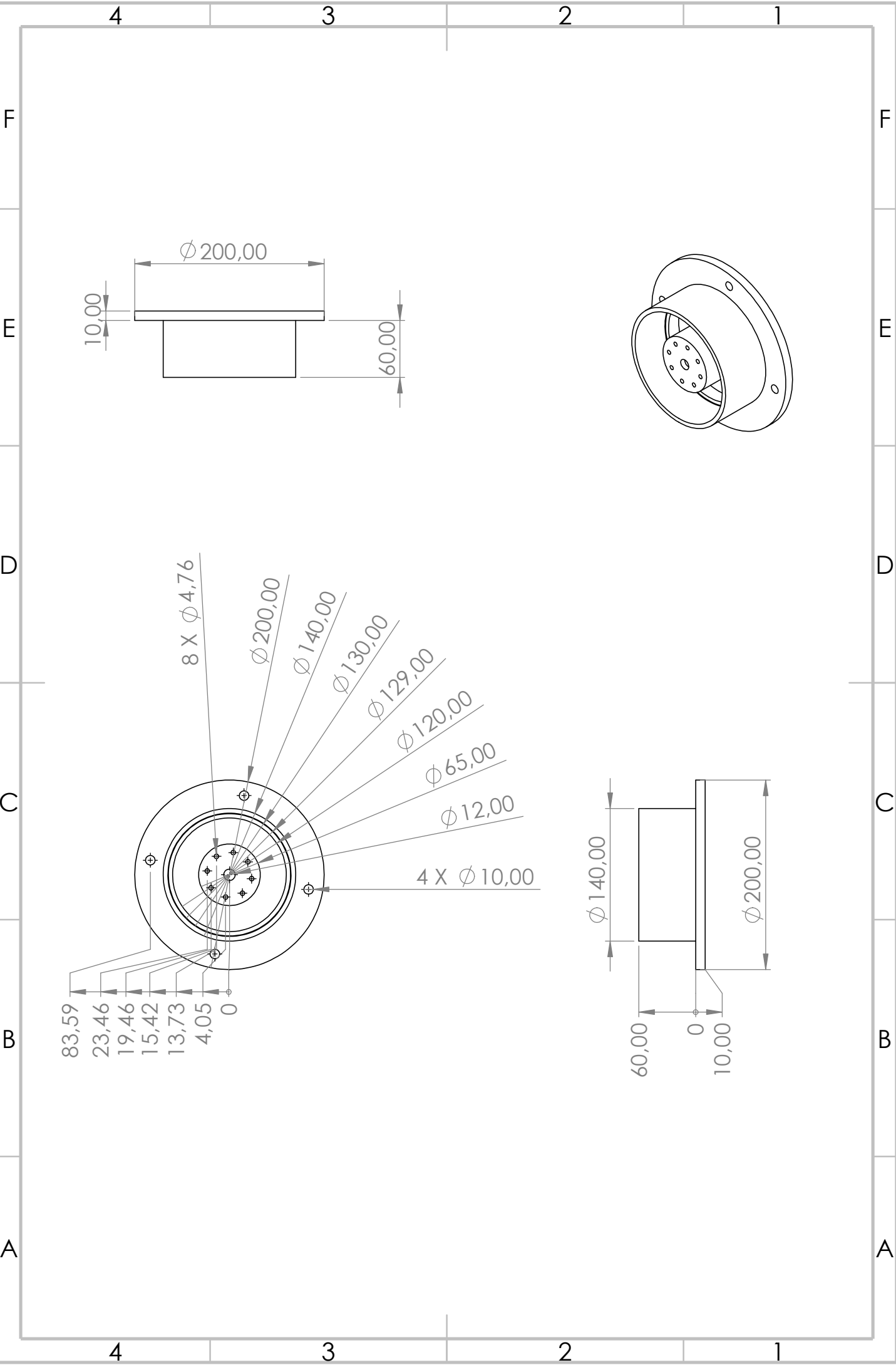
- Bastidor
- Acople base
- Acople brazo inferior
- Brazo
- Acople brazo superior

I.3 Antebrazo

- Acople antebrazo
- Bocín antebrazo
- Acople muñeca

I.4 Muñeca

- Acople muñeca

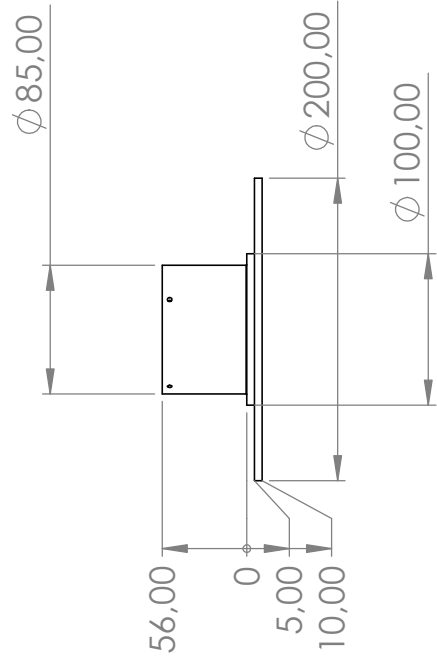
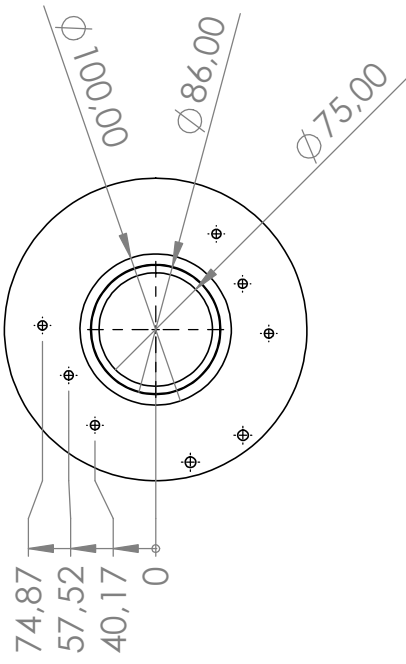
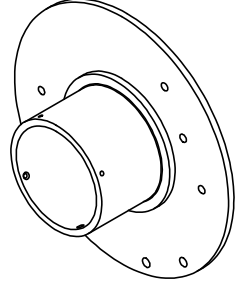
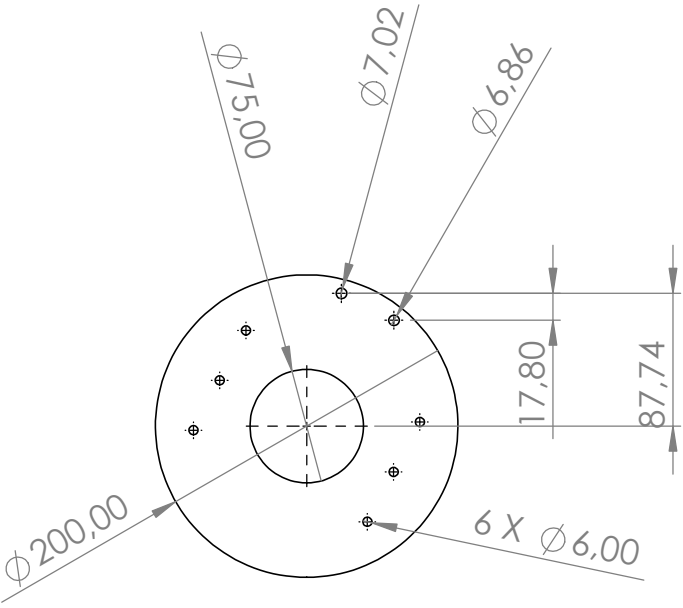


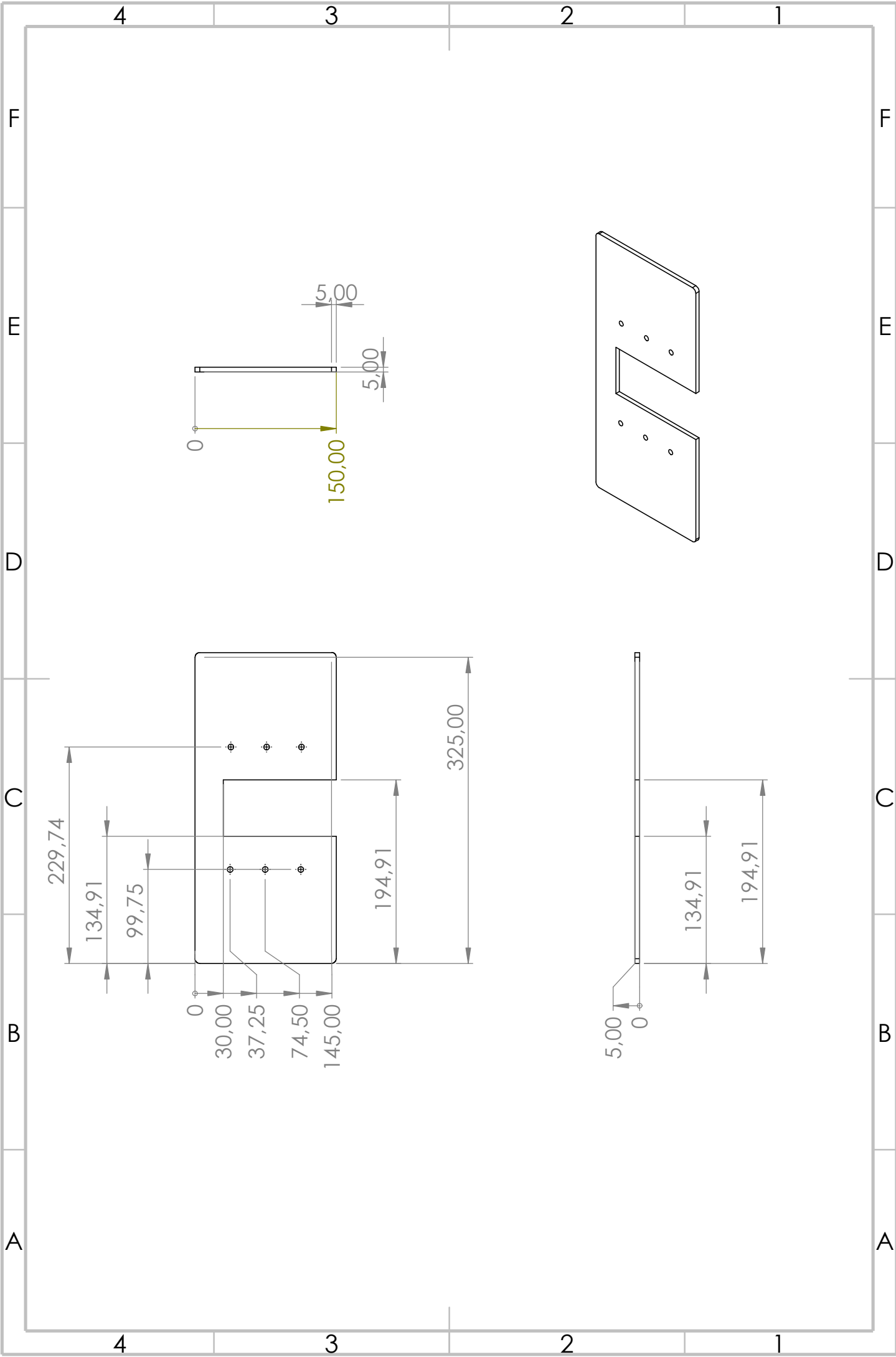
F
E
D
C
B
A

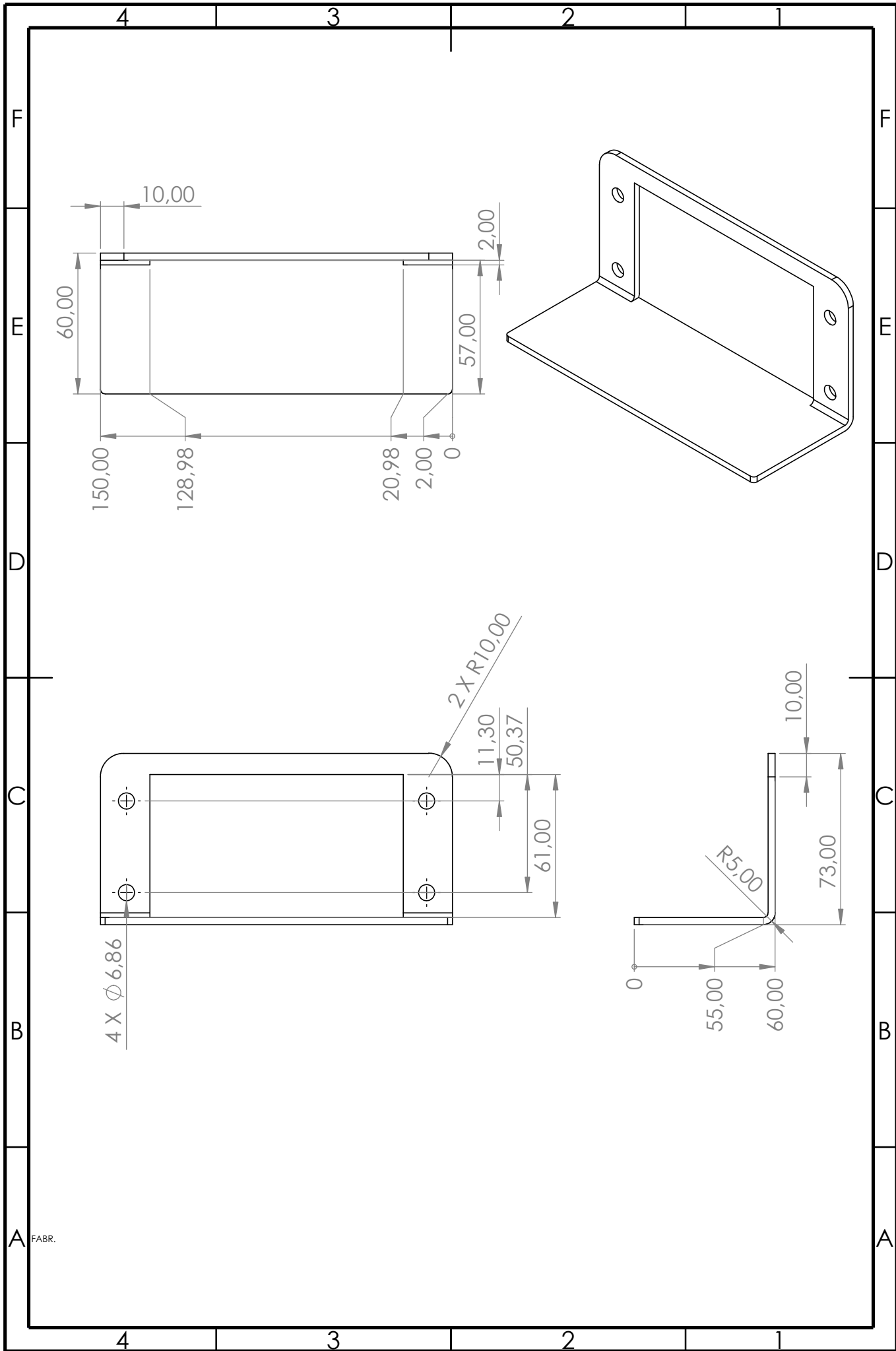
F
E
D
C
B
A

4 3 2 1

4 3 2 1







FABR.

