






## Construcción e instrumentación de una plataforma experimental de un robot colaborativo

### Building and Instrumentation of an experimental platform for a collaborative robot

Fabrizio R. Cahuas-Talledo <sup>a,\*</sup>, Emanuel Ortiz-Ortiz <sup>b</sup>, Jim S. Palacios Lazo <sup>c</sup>, Viridiana Luna Zempoalteca <sup>a</sup>,  
Juan E. Velázquez-Velázquez <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional, 07340, Ciudad de México, México.

<sup>b</sup>Centro De Innovación Y Desarrollo Tecnológico En Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, 07700, Ciudad de México, México.

<sup>c</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, 02550, Ciudad de México, México.

<sup>d</sup>Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

#### Resumen

Los robots colaborativos (Cobots) están diseñados y programados para trabajar en conjunto con los seres humanos. Este artículo propone la construcción de una plataforma experimental de un Cobot, destinada a fines pedagógicos. La estructura del Cobot se fabrica mediante técnicas de manufactura aditiva del tipo modelado por deposición fundida (FDM), basada en el modelo EB-15 de "ToolBox Robotics". Para los actuadores se utilizan motores paso a paso con encoders. La transmisión de potencia hacia los eslabones se realiza a través de un engranaje planetario construido con PLA-CF, con el objetivo de mejorar la resistencia y durabilidad de estos componentes críticos y para la estructura externa, se emplea PLA estándar. La instrumentación de cada una de las articulaciones del cobot se llevó a cabo utilizando tarjetas de desarrollo ESP32 y Arduino. Se presentan resultados experimentales que ilustran el movimiento de una articulación al aplicar una señal de entrada sinusoidal al motor. La adquisición de datos se realizó a través de la ESP32, que envía la información mediante comunicación serial a un programa en Python, demostrando la correcta integración de todas las etapas de construcción e instrumentación.

**Palabras Clave:** Construcción con manufactura aditiva, Sistema embebido, Prototipado rápido.

#### Abstract

Collaborative robots (Cobots) are designed and programmed to work together with humans. This article proposes the construction of an experimental Cobot platform, intended for pedagogical purposes. The Cobot structure is manufactured using additive manufacturing techniques of the Fused Deposition Modeling (FDM) type, based on the EB-15 model from "ToolBox Robotics". Stepper motors with encoders are used for the actuators. Power transmission to the links is carried out through a planetary gear built with PLA-CF (Polylactic Acid reinforced with Carbon Fiber), with the aim of improving the strength and durability of these critical components. Standard PLA is used for the external structure. The instrumentation of each of the cobot's joints was carried out using ESP32 and Arduino development boards. Experimental results are presented that illustrate the movement of a joint when a sinusoidal input signal is applied to the motor. Data acquisition was performed through the ESP32, which sends the information via serial communication to a Python program, demonstrating the correct integration of all construction and instrumentation stages.

**Keywords:** Additive manufacturing, Embedded system, Rapid prototyping.

#### 1. Introducción

Actualmente los robots colaborativos (Cobots) tienen mayor presencia en instituciones de investigación y en la industria, ya que, éstos son diseñados y programados para trabajar de for-

ma colaborativa con los seres humanos o en algunos casos entre ellos mismos. Los Cobots son capaces de complementar tareas repetitivas que requieren de una alta precisión operativa, aumentando la productividad y garantizando la seguridad en los procesos de producción con diversas interacciones humanas.

\*Autor para correspondencia: fcahuast2300@alumno.ipn.mx

**Correo electrónico:** fcahuast2300@alumno.ipn.mx (Fabrizio Ricardo Cahuas-Talledo), eortizo1901@alumno.ipn.mx (Emanuel Ortiz-Ortiz), jpalacios12300@alumno.ipn.mx (Jim Steven Palacios-Lazo), vlunaz2300@alumno.ipn.mx (Viridiana Luna-Zempoalteca), jvelazquezv@ipn.mx (Juan Eduardo Velázquez-Velázquez).

**Historial del manuscrito:** recibido el 01/07/2024, última versión-revisada recibida el 28/08/2024, aceptado el 21/08/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13350>



Una de las características principales de los Cobots es su fácil integración tanto para pequeñas y medianas empresas, automatizando y adecuando las instalaciones con costos accesibles (en comparación con robots industriales) y sin necesitar transformaciones complejas en las plantas manufactureras, tal y como se lleva a cabo en (Universal, 2024), donde se integraron una serie de Cobots para el empaquetado, paletizado y etiquetado en el área de alimentos. Mientras que en (Fanuc, 2024) se muestra un Cobot especializado para la soldadura de metales.

En (Zanchettin y Rocco, 2017) se muestra un ejemplo de investigación donde se trabaja con estadística bayesiana para enseñar al Cobot a predecir la intención que tiene un humano de alcanzar una determinada posición final dentro del área de trabajo, donde se realiza la tarea de ensamblaje colaborativo con el Cobot YuMi de ABB. Mientras que en (Howard, 2022) se diseña y construye un Cobot planar de bajo costo, el cual utiliza componentes ligeros, reduce el consumo de energía y se construye con impresión 3D para tareas de movimiento sencillas.

En este artículo, se construye e instrumenta una plataforma experimental para un robot colaborativo utilizando técnicas de manufactura aditiva del tipo FDM. El objetivo principal de este estudio es mostrar las etapas necesarias para desarrollar una plataforma experimental, la cual permitirá realizar en un futuro la evaluación de diversas tareas y algoritmos de control. Con este propósito, se seleccionan motores equipados con encoders, lo que posibilita la implementación de un lazo de control cerrado en aplicaciones futuras.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la descripción de la plataforma experimental de un Cobot y la Sección 3 presenta la cinemática directa del Cobot; posteriormente en la Sección 4 se describe el proceso de fabricación del Cobot. En la Sección 5 se presenta la instrumentación del sistema eléctrico, etapa de potencia y adquisición de datos, la Sección 6 muestra la verificación y validación de la plataforma experimental y finalmente, la Sección 7 concluye el artículo.

## 2. Descripción de la plataforma experimental

La plataforma experimental se compone de un robot colaborativo, una etapa de potencia y una etapa de adquisición de datos. El Cobot implementado es un robot de 6 grados de libertad (gdl) donde cada una de sus articulaciones son rotacionales como se ilustra en la Figura ??.

### 2.1. Selección de los componentes

Para los actuadores del Cobot se seleccionan motores paso a paso NEMA 17 en dos configuraciones: con longitudes de 34 mm y 60 mm, y con un peso de 310 g y 500 g respectivamente (Figura ??). Ambos modelos se alimentan con un voltaje de 12 V. La elección de estos actuadores eléctricos se basa en el objetivo principal del sistema robótico, que es de naturaleza pedagógica, por lo que no se requiere la manipulación de cargas

pesadas.

Para determinar la posición angular del eslabón, es crucial disponer de un encoder. Aunque los motores paso a paso usualmente no incluyen un sensor de posición angular integrado, la marca “CUDEVICE” ofrece motores NEMA con esta característica, lo que permite medir los grados de rotación de cada articulación.

Para poder leer las señales del encoder es necesario contar con un sistema embebido capaz de procesar esta información, por lo tanto, se selecciona como sistema principal la tarjeta ESP32. Esta tarjeta es un SoC (System on Chip), que integra en un único chip un procesador Tensilica Xtensa de doble núcleo de 32bits a 160Mhz (con posibilidad de hasta 240Mhz), conectividad WiFi y Bluetooth.

Para poder accionar los motores se utiliza el driver A4988.

Se emplea la placa CNC Shield, la cual permite la incorporación de hasta cuatro drivers A4988. Esta placa está optimizada para trabajar con un Arduino Uno.

### 2.2. Sistema de transmisión de potencia

Las articulaciones del Cobot realizan un movimiento rotacional similar al de los motores, por lo que la transmisión es de tipo rotacional-rotacional. Para lograr esta transmisión, el Cobot utiliza sistemas de engranajes planetarios en cada una de sus articulaciones. Los primeros tres grados de libertad están equipados con motores de 60 cm, mientras que los tres últimos utilizan motores de 34 cm, cada uno conectado a un engranaje planetario.

Un sistema de engranajes planetarios se conforma de un engranaje central (sol), varios engranajes periféricos (planetas) y un anillo exterior (corona). La rotación de los engranajes se produce alrededor del sol y dentro de la corona, todo esto montado en un portaplanetas, tal y como se muestra en la Figura ??.

La implementación de estos engranajes facilita la transmisión de un mayor torque con respecto al torque máximo del motor, gracias a la distribución uniforme de la carga entre los engranajes planetarios, además de poder ser configurados para diversas relaciones de transmisión. En estos mecanismos, un componente permanece fijo, otro actúa como el elemento de entrada que suministra la energía al sistema de engranajes, y finalmente, un tercer componente sirve como el elemento de salida que transfiere la potencia a otro sistema mecánico.

La relación de transmisión de un engranaje planetario se define como la relación entre la velocidad angular de entrada ( $\omega_e$ ) y la velocidad angular de salida ( $\omega_s$ ). Para calcular esta relación, es fundamental considerar los diferentes modos de operación del sistema. En la construcción del Cobot presentado se usa un engranaje planetario con corona fija. En este modo, la corona está fija y no gira, este engranaje cuenta con 102 dientes y un diámetro de 58.5 mm. El engranaje sol actúa como el elemento de entrada, este cuenta con 30 dientes y un diámetro de 15.6 mm, mientras que el portaplanetas es el elemento de

salida. Utilizando estos componentes, se logra una relación de transmisión ( $i$ ) de 38.4:1. Esto indica que el eje del motor debe girar 38.4 veces para que el eslabón complete una vuelta de 360 grados.

### 3. Cinemática directa

En esta sección se aborda la cinemática directa del Cobot, un aspecto fundamental para calcular el modelo dinámico de un robot. En línea con el enfoque pedagógico de este artículo, se proporciona esta herramienta con miras a su aplicación futura en algoritmos de control.

La cinemática directa del Cobot se obtiene a través de la convención de Denavit Hartenberg (D-H) (Cortés, 2020). Para ello es necesario saber parámetros del Cobot, tales como sistemas de referencia de cada articulación y longitudes de los ejes. En la Figura 7 se muestra una vista frontal del Cobot, donde se presentan cada uno de los ejes de rotación y dimensiones de los eslabones.

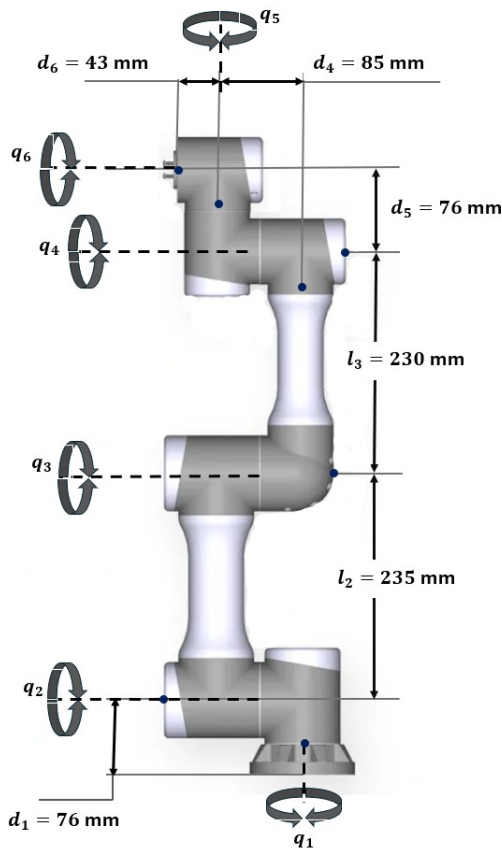


Figura 7: Ejes de rotación y longitud de eslabones de Cobot.

En la Figura 8 se muestra la posición de casa del Cobot y los sistemas de referencia de cada articulación. La descripción de un sistema de referencia  $S_i$  con respecto a  $S_{i-1}$  junto con las medias de los eslabones de la Figura 7, permiten obtener los 4 parámetros para completar la Tabla D-H (Tabla 1).

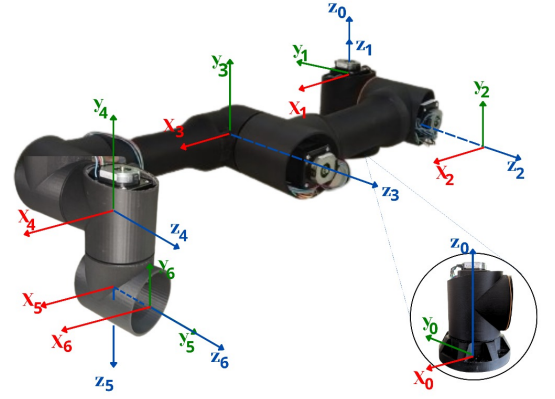


Figura 8: Sistemas de referencia de cada articulación.

Tabla 1: Parámetros D-H

Eslabon	$l_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$\frac{\pi}{2}$	$d_1$	$q_1$
2	$l_2$	0	0	$q_2$
3	$l_3$	0	0	$q_3$
4	0	$\frac{\pi}{2}$	$d_4$	$q_4$
5	0	$-\frac{\pi}{2}$	$d_5$	$q_5$
6	0	0	$d_6$	$q_6$

La matriz de transformación homogénea para cada articulación se obtiene a partir de la sustitución de los parámetros de la Tabla 1 en una matriz de transformación homogénea, obteniendo:

$$H_0^1 = R_{z,\theta_1} T_{z,d_1} T_{x,l_1} R_{x,\alpha_1},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$H_1^2 = R_{z,\theta_2} T_{z,d_2} T_{x,l_2} R_{x,\alpha_2},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & l_2 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & l_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$H_2^3 = R_{z,\theta_3} T_{z,d_3} T_{x,l_3} R_{x,\alpha_3},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & l_3 \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & l_3 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$H_3^4 = R_{z,\theta_2} T_{z,d_2} T_{x,l_2} R_{x,\alpha_2},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_4) & 0 & \sin(q_4) & 0 \\ \sin(q_4) & 0 & -\cos(q_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$H_4^5 = R_{z,\theta_1} T_{z,d_1} T_{x,l_1} R_{x,\alpha_1},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_5) & 0 & \sin(q_5) & 0 \\ \sin(q_5) & 0 & -\cos(q_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

y

$$H_5^6 = R_{z,\theta_2} T_{z,d_2} T_{x,l_2} R_{x,\alpha_2},$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_6) & -\sin(q_6) & 0 & 0 \\ \sin(q_6) & \cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

La matriz de transformación homogénea que representa la relación entre el sistema de coordenadas del efector final con respecto al primer sistema de referencia ubicado en la base del Cobot, esta dada por:

$$H_0^6 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 H_3^4 H_4^5 H_5^6,$$

$$H_0^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Al hacer la multiplicación de la matrices de transformación homogénea, se obtienen expresiones las cuales pueden ser factorizadas empleando la siguientes funciones trigonométricas:

$$\begin{aligned} \sin(a+b) &= \sin(a)\cos(b) + \sin(b)\cos(a), \\ \sin(a-b) &= \sin(a)\cos(b) - \sin(b)\cos(a), \\ \cos(a+b) &= \cos(a)\cos(b) - \sin(b)\sin(a), \\ \cos(a-b) &= \cos(a)\cos(b) + \sin(b)\sin(a). \end{aligned}$$

También se emplea la siguiente nomenclatura para la reducción de términos del resultado final:

$$\begin{aligned} s_{234} &= \sin(q_2 + q_3 + q_4), \\ c_{234} &= \cos(q_2 + q_3 + q_4). \end{aligned}$$

Finalmente a través de programación simbólica en MATLAB, los elementos de la matriz  $H_0^6$  (7) esta dado por:

$$\begin{aligned} n_x &= c_6 s_1 s_5 + c_1 c_5 c_6 c_{234} - s_6 c_1 s_{234}, \\ n_y &= -c_6 c_1 s_5 + s_1 c_5 c_6 c_{234} - s_6 s_1 s_{234}, \\ n_z &= s_6 c_{234} + c_5 c_6 s_{234}, \\ o_x &= -s_6 s_5 s_1 - c_6 c_5 c_1 c_{234} - c_6 c_1 s_{234}, \\ o_y &= s_6 c_1 s_5 - s_6 c_5 s_1 c_{234} - c_6 c_1 s_{234}, \\ o_z &= c_6 c_{234} - c_5 s_6 c_{234}, \\ a_x &= c_5 s_1 - s_5 c_1 c_{234}, \\ a_y &= -c_5 c_1 - s_5 s_1 c_{234}, \\ a_z &= -s_5 s_{234}, \\ p_x &= d_5 c_1 s_{234} + d_4 s_1 + d_6 c_5 s_1 - d_6 s_5 c_1 c_{234} + l_2 c_1 c_2 + l_3 c_1 c_{23}, \\ p_y &= d_5 s_1 s_{234} - d_4 c_1 + d_6 c_5 c_1 - d_6 s_5 s_1 c_{234} + l_2 s_1 c_2 + l_3 s_1 c_{23}, \\ p_z &= d_1 + l_2 s_2 - d_5 c_{234} + l_3 s_{23} - d_6 s_5 s_{234}. \end{aligned}$$

#### 4. Fabricación del Cobot

Luego de la selección de componentes se continua con las etapas necesarias para la construcción de la plataforma experimental. En esta sección se presenta la fabricación de las distintas partes de la estructura del Cobot.

La fabricación se realiza mediante manufactura aditiva utilizando el proceso FDM. Se emplea la impresora X1 Carbon de BambuLab, la cual ofrece la ventaja de imprimir materiales reforzados con fibras. Se utilizan dos materiales: PLA reforzado con fibra de carbono para los engranajes planetarios. Este material ofrece mejores propiedades mecánicas que los materiales comunes utilizados en impresión 3D (Cao *et al.*, 2023). Para la estructura de los eslabones se utiliza PLA-Mate con una densidad de relleno del 50 % en cada una de las piezas para reforzar la estructura interna.

Un parámetro importante a tener en cuenta cuando se realiza la fabricación mediante impresión 3D son los soportes, los cuales se añaden a las piezas que cuentan con voladizos para evitar que el filamento evite pasar por una zona sin base de soporte.

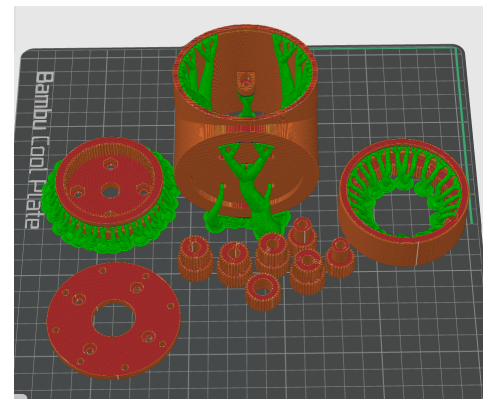


Figura 9: Previsualización de la impresión 3D de las piezas del Cobot con soportes añadidos (color verde).



Figura 10: Ejemplo de algunas de las piezas que conforman los eslabones y engranajes del Cobot.

## 5. Instrumentación

En la instrumentación del Cobot, la tarjeta ESP32 será la encargada de controlar las operaciones del Cobot. Las tarjetas Arduino Uno serán las encargadas de leer los datos de los encoders y recibir la señal de control de la ESP32 y enviarla a través de los drivers. Para comunicar los Arduinos con la ESP32 se usa el bus SPI (Serial to Peripheral Interface). Este bus es una interfaz de comunicación en serie de cuatro pines, de muy bajo consumo y permite que la comunicación fluya hacia y desde el dispositivo maestro (ESP32) en forma simultánea, a velocidades de hasta 10Mbps. En la Figura 11 se muestra las conexiones entre los Arduinos y la ESP32.

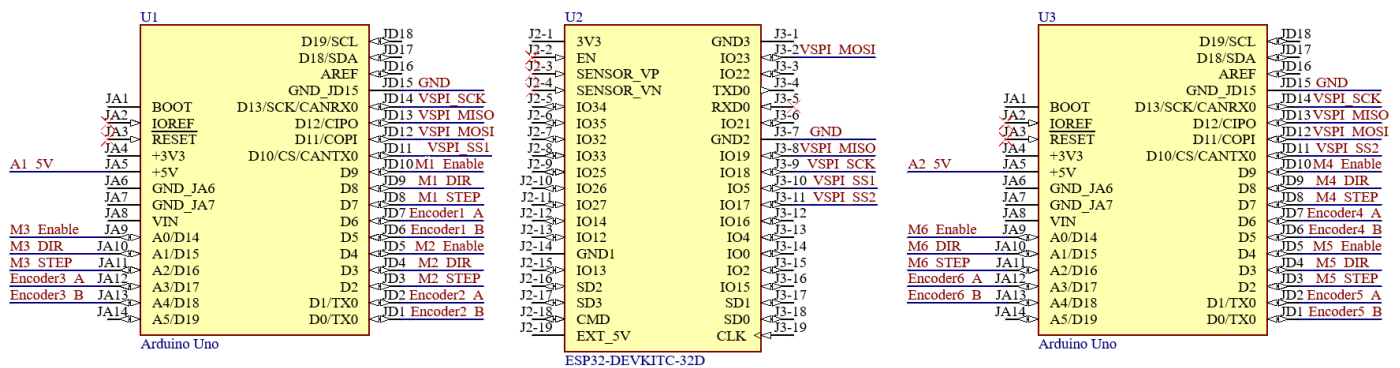


Figura 11: Esquemático de conexiones entre los Arduinos y la ESP32.

La librería *SPI.h* en el IDE de Arduino tiene definido por defecto los pines del bus SPI. Para la ESP32 se usan Pin23 (MOSI), Pin19 (MISO), Pin18 (SCK) y Pin05 (SS). En este caso como la ESP32 funciona como maestro, no es necesario definir la señal SS como el Pin 05, puede ser cualquier otro pin, aunque en este caso para comunicar con el primer Arduino se deja por defecto este pin. Para comunicar con el otro Arduino, no es necesario declarar nuevamente todos los pines, solo se necesita elegir otro pin para SS y en este caso se utiliza el Pin17. Para el Arduino Uno la librería *SPI.h* por defecto utiliza los pines Pin11 (MOSI), Pin12 (MISO), Pin13 (SCK) y Pin10 (SS). Los demás pines conectados al Arduino son para recibir datos de los encoders y enviar señales a los drivers, como se muestra en la Figura 13.

El control de los motores paso a paso se realiza a través del driver A4988. Este driver puede suministrar hasta 2 A y opera con voltajes de 8V a 35 V. El driver requiere solo 2 pines, STEP y DIRECTION (DIR), para establecer comunicación con el Arduino. El pin STEP genera los pulsos para controlar el movimiento del motor paso a paso, mientras que el pin DIR indica la dirección del movimiento. También se utiliza el pin ENABLE para habilitar o deshabilitar la salida del driver.

Una de las ventajas de este driver es que incluye protección contra corriente cruzada, cortocircuito de carga, fallas a tierra y cuenta con un circuito de apagado térmico. Además, dispone

de un potenciómetro para ajuste de corriente, el cual debe calibrarse según el motor paso a paso utilizado.

Como se muestra en la Figura 13, se utilizan 6 motores paso a paso. Los primeros 3 eslabones utilizan el NEMA17-23-01D-AMT112S, que tiene un torque máximo de 0.78 Nm y una corriente de fase de 2 A. Los siguientes 3 eslabones utilizan el NEMA17-13-04PD-AMT112S, con un torque máximo de 0.444878 Nm y una corriente de fase de 1.4 A. Estos motores de la marca CUDEVICES vienen con un encoder incorporado, AMT112S, que ofrece una resolución incremental de hasta 4096 PPR (Pulsos Por Revolución). El encoder tiene tres señales (A, B y Z), como se muestra en la Figura 12. De las tres señales solo son necesarias A y B para obtener la posición angular del eslabón.

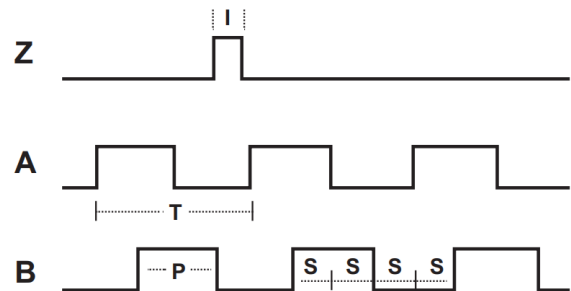


Figura 12: Señales del encoder.



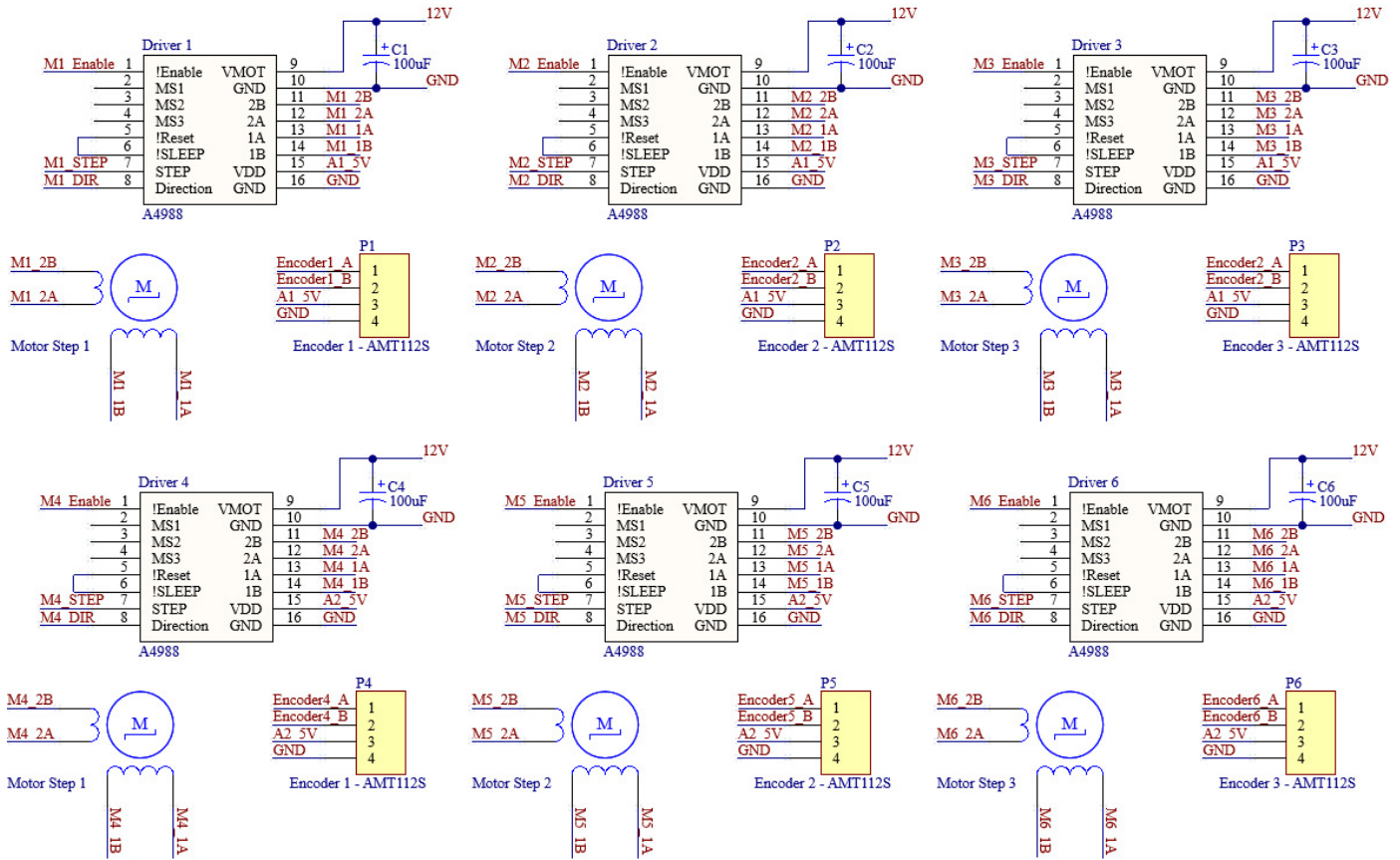


Figura 13: Conexiones de la ESP32, Arduinos Uno, drivers y motores.

Para un funcionamiento adecuado del driver, primero se debe calibrar el potenciómetro del driver para que se suministre la corriente necesaria al motor. El fabricante del driver propone la siguiente ecuación,

$$I_{\text{TripMax}} = \frac{V_{\text{REF}}}{8R_S}, \quad (8)$$

donde,  $I_{\text{TripMax}}$  es la corriente máxima del motor,  $V_{\text{REF}}$  voltaje de referencia para ajustar la corriente de salida del controlador,  $R_S$  resistencia de sensibilidad y 8 es una constante definida por el fabricante.

Para el motor NEMA17-23-01D-AMT112S, que opera con una corriente de 2 A, se configura  $V_{\text{REF}} = 1.6$  V, mientras que para el motor NEMA17-13-04PD-AMT112S, con una corriente de 1.4 A, se utiliza  $V_{\text{REF}} = 1.12$  V. Dado que los pines de configuración de microstepping del controlador no están conectados, ambos motores operan en modo de paso completo, limitando la corriente suministrada al motor al 70 % de la configuración real de corriente máxima. Esto se debe a que las bobinas permanecen siempre encendidas y están limitadas a este valor en el modo de paso completo. Cambiar al modo de microstepping ajustaría este valor del 70 %.

Para que el driver controle el motor paso a paso es necesario conectar los pines STEP y DIR a pines de entrada y salida del Arduino. Por ejemplo, en las Figuras 11 y 13, para el primer motor, el pin STEP está conectado al pin D7 del Arduino y el

pin DIR al pin D8. Además, se ha conectado el pin ENABLE de cada driver al Arduino.

Como se puede observar en la Figura 13, cada driver requiere 3 pines y cada encoder necesita 2 pines, sin considerar VDD y GND. Cada motor requiere 3 pines del Arduino y 2 pines de la ESP32 (para el encoder). Esta es la razón por la cual se conectan 3 motores a cada Arduino, dado que el Arduino Uno no dispone de suficientes pines para manejar los 6 motores. De manera similar, el ESP32 tampoco cuenta con la cantidad necesaria de pines para manejar los 6 motores. Este es uno de los motivos por los cuales se utilizan 3 tarjetas de desarrollo, como se muestra en la Figura 11.

## 6. Resultados

### 6.1. Verificación y Validación

Se presenta como resultado de esta investigación el movimiento de un eslabón con el fin de validar etapa mecánica y la instrumentación del Cobot; debido a que cualquier anomalía en la respuesta obtenida del encoder indicaría fallos en los subsistemas de la plataforma experimental.

En la Figura 14, se muestra el engranaje planetario de la última articulación. Este cuenta con cuatro planetas, una disposición elegida para reducir la velocidad y aumentar el torque aplicado, lo cual es crucial para mover cada eslabón asociado a cada motor. Antes de integrarlo con la estructura, se realiza la

validación del ensamblaje motor-engranaje para asegurarse de que funcionen de forma adecuada.



Figura 14: Engranajes planetarios.

En la Figura 15 se presenta la implementación final del Cobot de 6 grados de libertad. Es fundamental contar con una base estable a la cual el Cobot se encuentre firmemente atornillado. Además, es imprescindible disponer adecuadamente los cables de los sensores y motores hacia las tarjetas de adquisición de datos, con el fin de evitar la ruptura de dichos cables debido al movimiento de cada eslabón. Fue necesario extender los cables de los motores de las tres últimas articulaciones debido a su longitud original insuficiente. Para ambos grupos de cables, se utilizaron conectores tipo jumper para asegurar su conexión al CNC Shield.



Figura 15: Plataforma de un Robot Colaborativo.

Después de culminar la implementación de la plataforma del Cobot, se procede a realizar la primeras pruebas del correcto funcionamiento de la parte mecánica y la instrumentación en conjunto. Para mover cada eslabón se implementó una rutina en el Arduino Uno, dicha rutina consiste en mover el eslabón cierta cantidad de grados. En la Figura 16 se observa el movimiento

del eslabón dos de 0 a 70 grados.



Figura 16: Posición en vertical de Cobot.

Los datos que se muestran en la Figura 17 fueron obtenidos del encoder y enviados por un puerto serial por una computadora a través de la ESP32. Se realizó un programa en Python donde se usó la librería *import serial*, la cual permite comunicar un programa realizado en Python con la ESP32 y almacenar en un archivo .txt los datos del encoder. Dichos datos son los que se muestran en la Figura 17, la cual presenta la evolución de los grados con respecto al tiempo, donde el movimiento descrito consiste en una señal sinusoidal.

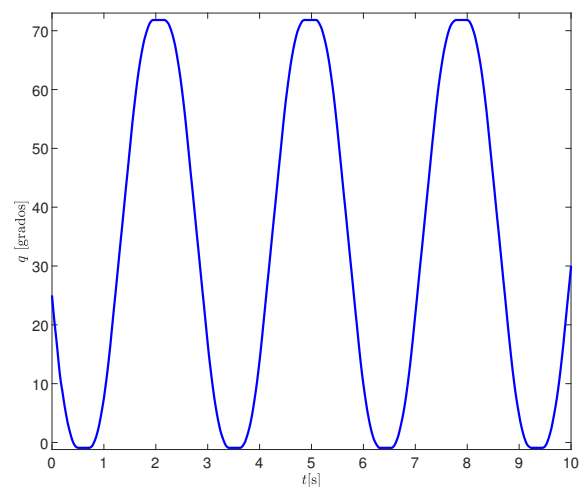


Figura 17: Posición de una articulación.

## 7. Conclusiones

Se construyó un Robot colaborativo empleando técnicas de manufactura aditiva. Cada uno de los eslabones y piezas externas fueron impresas en PLA. El conjunto de engranajes planetarios de cada articulación fueron impresas en PLA-CF. Esto para asegurar una mayor resistencia al desgaste entre cada uno de los engranajes. Así mismo el refuerzo de fibra de carbono permite mejorar las propiedades mecánicas del PLA. Se realizó el ensamblaje de cada uno de los eslabones y se diseñó la instrumentación para mover cada una de las articulaciones. Finalmente se

realizo la adquisición de datos a través de dos Arduino Uno y una ESP32. Con la integración de la construcción del subsistema mecánico y la instrumentación se obtuvo una plataforma experimental de un Cobot de 6 gdl.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la secretaria de investigación y posgrado del Instituto Politécnico Nacional por los apoyos otorgados por medio de los proyectos SIP 20242437 y 2024-A318.

### Referencias

- Cao, M., Cui, T., Yue, Y., Li, C., Guo, X., Jia, X., y Wang, B. (2023). Preparation and characterization for the thermal stability and mechanical property of pla and pla/cf samples built by fff approach. *Materials*, 16(14):5023.
- Cortés, F. R. (2020). Robótica: control de robots manipuladores. Marcombo.
- Fanuc, A. w. (2024). *CRX Application Videos*. FANUC website.
- Howard, I. S. (2022). Design and prototyping of a low-cost light weight fixed-endpoint orientation planar cobot. En *2022 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, pp. 047–054.
- Universal, R. w. (2024). Collaborative robots in food and beverage. <https://www.universal-robots.com/mx/industrias/alimentos-y-bebidas/>.
- Zanchettin, A. M. y Rocco, P. (2017). Probabilistic inference of human arm reaching target for effective human-robot collaboration. En *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6595–6600.