

Manipulador Robótico para empaque de cajas de chocolates

Robotic Manipulator for Chocolate Boxes Packing

Ricardo Yépez¹ Francisco García²

¹Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Internacional del Ecuador

• e-mail: ricardoy97@hotmail.com • e-mail: frgarcia@uide.edu.ec

Abstract— Robots are helpful for the industry in the means that they can be used for the automation of different processes. In this case, a robot is meant to be used for the automation of the chocolate packaging process. The correct construction of a serial link robot can result in the creation of a helpful tool to increase the efficiency of the industrial processes. The construction of this robot is characterized by having 4 degrees of freedom, a two-finger gripper and the implementation of different types of control based on the forward and the inverse kinematics, that allows the user to control the robot in a very understandable and easy way. The robot can be programmed to create routines to automatize the packaging of a box of chocolates. A transportation unit is carried out as a conveyor belt to guide the chocolate through the gripper's floor location to be gripped and placed inside the box. The tests performed on the robot, show a reliability of 80% with the routine, and an reliability value of 97.15% while controlling it manually. These results show that the robot has an acceptable value of reliability, that can be increased by modifying the design. The manual control results, show a low error, that can be concluded in a reliable mode to work on.

Keywords—robotic arm, direct kinematics, inverse kinematics, degrees of freedom, workspace.

Resumen— Los robots son útiles para la industria en el sentido de que pueden utilizarse para la automatización de diferentes procesos. En este caso, se pretende utilizar un robot para la automatización del proceso de envasado de chocolate. La construcción correcta de un robot de enlace serial puede resultar en la creación de una herramienta útil para aumentar la eficiencia de los procesos industriales. La construcción de este robot se caracteriza por tener 4 grados de libertad, una pinza de dos dedos y la implementación de diferentes tipos de control basados en la cinemática directa e inversa, que permite al usuario controlar el robot de una manera muy comprensible y fácil. De esta manera, el robot puede ser programado para crear una variedad de rutinas relacionadas al empaquetado de chocolates. Se realiza una unidad de transporte a modo de cinta transportadora para guiar el chocolate a través de la ubicación del piso de la pinza para ser agarrado y colocado dentro de la caja. Las pruebas realizadas al robot, muestran una fiabilidad del 80 % con la rutina, y un valor de confiabilidad del 97.15 % controlándolo manualmente. Estos resultados muestran que el robot tiene un valor aceptable de confiabilidad, que puede incrementarse modificando el diseño. Los resultados del control manual muestran un error bajo, que se puede concluir en un modo confiable para trabajar.

Palabras Clave—brazo robótico, cinemática directa, cinemática inversa, grados de libertad (DOF).

I. INTRODUCCIÓN

La idea de este proyecto es crear un brazo robótico que pueda hacer el proceso de almacenamiento y empaque de chocolates. Esto significa que el usuario puede dejar una caja vacía e indicaciones de almacenamiento al robot para que posteriormente el brazo robótico comience a tomar cada chocolate uno por uno y los coloque en una posición vacía dentro de la caja de embalaje.

Es así, que se propone realizar un algoritmo de movimiento capaz de establecer coordenadas de puntos de posiciones consideradas "vacías", donde se colocará la unidad, con el fin de determinar las posiciones ocupadas, para posteriormente descartarlas y colocar los nuevos productos en posiciones "vacías".

Este brazo robótico tendrá una configuración 'C-Space.' S-S-S-S, es decir contará con 4 grados de libertad como

articulación. Así mismo, el end-effector del robot será una pinza con acople elástico, que abre y cierra agarrando y depositando el chocolate en la posición deseada. La interfaz de usuario permite un control global de cada sección del brazo de su 'workspace' o zona de trabajo, facilitando determinar la posición adecuada para realizar la tarea designada, ya sea por rutina o por control manual.

Por lo tanto, se implementará una interfaz de comunicación del mismo modo que permitirá el ingreso de las coordenadas deseadas dentro del espacio de trabajo, es decir, el operador ingresará las coordenadas deseadas y por medio de análisis geométrico de posición y DOF, el algoritmo determinará el espacio de tarea más adecuado, que el brazo debe seguir para cumplir el objetivo, y en caso de ingresar coordenadas que se encuentran fuera de su espacio posible de trabajo, la programación del manipulador ejecutará un

algoritmo genético para determinar las coordenadas y los ángulos de cada articulación que el brazo debe seguir para alcanzar la mejor aproximación de las coordenadas ingresadas.

A. *Objetivo General*

Crear un brazo robótico que automatice el envasado de chocolates.

B. *Objetivos específicos*

- Diseñar, construir e implementar una pinza capaz de agarrar eficientemente las dimensiones esféricas de un chocolate específico.
- Permitir la implementación de los actuadores elegidos de tal manera que la estructura del brazo no parezca robusta y proporcione facilidad de maniobrabilidad de los actuadores.
- Cree una interfaz visual en la que el usuario pueda controlar las funciones del robot a su gusto.
- Determinar valor de error por medio de pruebas del prototipo considerando la posición de cada chocolate colocado, evitando superponer unos con otros, o colocarlos fuera de la caja en posiciones incorrectas.
- Implementar un método para controlar el movimiento del robot basado en teorías de cinemática directa y/o inversa.

II. MARCO TEÓRICO

Los cobots o robots colaborativos han revolucionado la industria alimentaria en la última década. En la actualidad, estos robots para la agricultura o la alimentación han conseguido un aumento de la productividad y una mejora en la eficiencia de los procesos que ha abierto nuevas posibilidades en estos sectores. Su objetivo principal es simple de entender, ayudan a las empresas a mejorar su ventaja competitiva y reducir sus costos al permitir la automatización de procesos esenciales que contribuyen a mejorar la seguridad de los trabajadores, acelerar la producción y mejorar la productividad.

Uno de los conceptos más utilizados por los brazos robóticos es el "Picking and Placement" [1], el cual se realiza con productos específicos dentro de cada industria, resultando así una de las principales tareas que un brazo robótico puede realizar de manera autónoma. Entender esto se vuelve de vital importancia para ver cómo cada industria se desarrolla y mejora la calidad y eficiencia de sus productos.

Un ejemplo de esto es la industria del cacao en Ecuador. Se estima que el 37 % del cacao se exporta a países como Suiza, donde esta importación representa el 60 % de su producción de chocolate, convirtiendo a Ecuador en su primer gran importador de cacao [2]. En la otra cara de la moneda está Pacari, que es la principal empresa chocolatera de Ecuador, su producción estima el 49 % del cacao utilizado en la producción nacional. Por lo tanto, la aplicación de este proyecto tiene un amplio rango de implementación dentro de la industria chocolatero ecuatoriana [3]. Donde empresas

como Pacari podrían implementar brazos robóticos para envasar sus chocolates.

Para considerar el diseño principal, el prototipo se basó en el brazo robótico de la marca KUKA [4], que es una empresa que se dedica al diseño y fabricación de diferentes brazos robóticos para cada industria. La estructura se basó en colocar la mayoría de los actuadores lo más cerca posible del suelo, reduciendo momentos flectores provocados por tensiones "peso-corporales", y lograr desplazar el centro de gravedad lo más bajo posible con la finalidad de aumentar la fuerza de elevación del manipulador que resulta en una mejora en términos de completar la tarea asignada de forma correcta y adecuado dentro de un margen de peso mayor para los objetos manipulados. Fig 1



Fig. 1. Modelos de brazos robóticos KUKA [5]

III. FASE TEÓRICA

El proyecto contempla dos consideraciones primordiales:

1. El diseño de la pinza debe sujetar y amoldarse a la superficie irregular de las dimensiones esféricas de un chocolate (Producto).
2. El movimiento debe ser provisto por un método de control fluido, fácil de controlar y sencillo de comprender.
3. La implementación de un control de posición, velocidad y aceleración.

A. *Pinza del robot (End-Effector)*

Existen dos alternativas para el diseño de la pinza, las cuales se diferencian en la cantidad de dedos que poseen. La pinza puede estar constituida por dos o tres dedos, y cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas.

La primera alternativa evalúa la posibilidad de incorporar una pinza de tres dedos, lo que sin duda incrementaría la estabilidad y la acción de agarre al lograr cubrir mayor superficie del objeto que se quiere agarrar. Sin embargo, tres puntos de agarre puede involucrar un sistema mecánico más complejo elevando los costos de diseño y fabricación.

Por otro lado, la segunda alternativa plantea una pinza de dos dedos con con la ventaja de ser más fácil de controlar y programar, sin embargo, prevaleciendo la desventaja de tener menos puntos de agarre en comparación con la primera opción.

Resolviendo y evaluando el objetivo principal, dentro de este proyecto la opción escogida fue diseñar una pinza de dos dedos con una banda elástica incorporada en uno de los puntos del 'End-Effector' que le permite amoldar el agarre a cualquier superficie irregular del chocolate. Su mecanismo se incorpora mediante un servomotor 360° y un sistema de engranajes 1:3 para incrementar la fuerza de agarre de la pinza.

B. Espacio de trabajo (Workspace)

Debido al 'C-Space' de cuatro articulaciones rotacionales el volumen de trabajo o también denominado 'Workspace' es de $65,21 \times 10^3 \text{ cm}^3$ representado en la Fig. 2.

Parámetros del manipulador robótico RxRxRxR:

- Articulaciones (Joints): 4
- Enlaces (Links): 5
- Grados de libertad (DOF): 4
- Configuración de espacio (C-Space): $SxSxSxS$
- Espacio de tarea (Task-Space): R^3xS

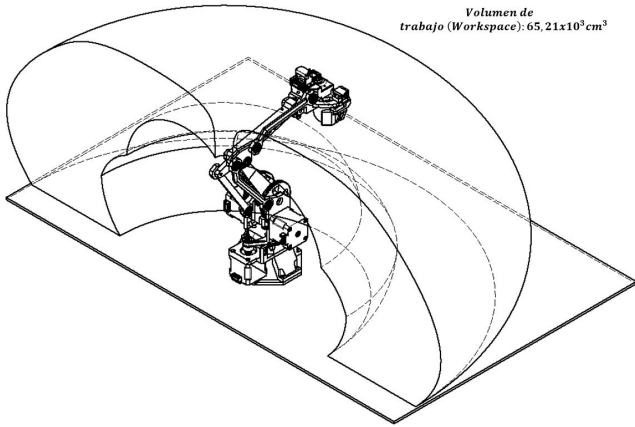


Fig. 2. Workspace del Manipulador 'Choco-bot' [Hecho en Inventor]

C. Movimiento del robot

Hay dos formas en las que se puede controlar el robot, que son mediante la aplicación de los conceptos de cinemática directa o inversa, que, en términos simples, se refieren a controlar el robot ingresando ángulos o coordenadas deseadas.

Por un lado, para obtener la cinemática directa de este robot en particular, es necesario utilizar los conceptos de la convención Denavit-Hartenberg. Para ello primero se tiene que realizar un análisis de marco del robot, con el fin de obtener los diferentes parámetros a colocar en la tabla D-H. El análisis del Choco-Bot se muestra en la Fig. 4.

Después de realizar el análisis que se muestra en la Fig. 4, se pueden obtener los parámetros de **Denavit-Hartenberg** [6] para el robot. Los parámetros para el Choco-Bot se muestran en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTEMBERG PARA EL CHOCO-BOT

Denavit-Hartenberg Parametros				
Link	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	90°	0	θ_2
3	L2	0	0	$-\theta_3$
4	L3	0	0	θ_4

El siguiente paso para obtener la **cinemática directa** [7] del Choco-Bot es obtener la matriz de transformación homogénea

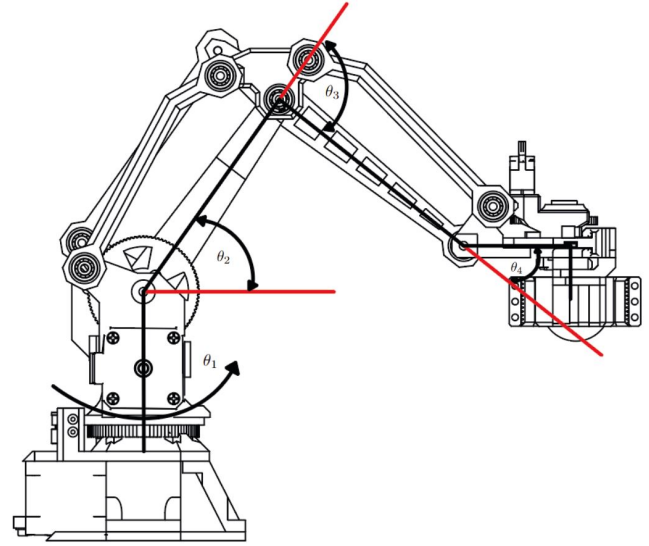


Fig. 3. Análisis de Denavit-Hartenberg para el Choco-Bot [Hecho en Inventor]

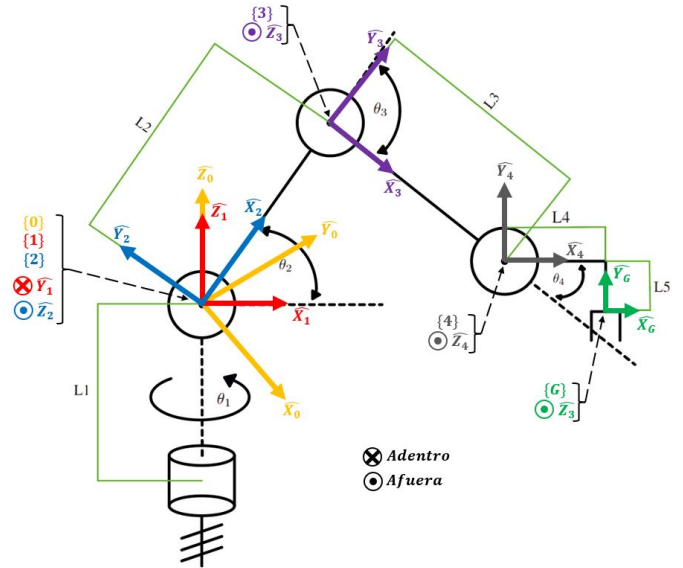


Fig. 4. Diagrama Denavit-Hartenberg [Hecho en Illustrator]

de la pinza con respecto a la base. Para ello, primero se analiza la forma general de la matriz de transformación homogénea de un eslabón respecto del anterior, dada en la Ecuación 1.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para obtener cada una de las matrices se ejecuta un script en MATLAB, el cuál básicamente es una función que tiene como argumentos los parámetros a_{i-1} , α_{i-1} , d_i , y θ_i dados en la Tabla I. Una vez obtenidas estas matrices, se realiza una operación de post-multiplicación para encontrar la matriz

de transformación homogénea del marco final del robot con respecto al punto de referencia. La matriz se muestra en la Ecuación 2.

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & \sigma_2 & \sigma_3\sigma_1 \\ \sigma_2 & 0 & -\sigma_3 & \sigma_2\sigma_1 \\ 0 & 1 & 0 & L_2\sin(\theta_2) + L_3\sin(\theta_2 - \theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= L_2\cos(\theta_2) + L_3\cos(\theta_2 - \theta_3) \\ \sigma_2 &= \sin(\theta_1) \\ \sigma_3 &= \cos(\theta_1) \end{aligned}$$

Dado que la posición que se quiere obtener es la pinza con respecto al punto de referencia, se debe encontrar una matriz de traslación que represente la posición de la pinza con respecto al marco 4 del robot. Esta matriz está representada por la Ecuación 3, que no tiene rotación, y en la que L_4 y L_5 representan la distancia desde el punto central de la pinza hasta el marco 4 de la robot en el eje X e Y respectivamente, como se observa en el diagrama de la Fig. 4 .

$${}^4_GT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La pose de la pinza con respecto al punto de referencia se puede encontrar operando las matrices 0_4T y 4_GT , como se muestra en la Ecuación 4.

$${}^0_GT = {}^0_4T \times {}^4_GT \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & \sigma_2 & \sigma_3\sigma_1 \\ \sigma_2 & 0 & -\sigma_3 & \sigma_2\sigma_1 \\ 0 & 1 & 0 & \sigma_4 + L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= L_4 + L_2\cos(\theta_2) + L_3\cos(\theta_2 - \theta_3) \\ \sigma_2 &= \sin(\theta_1) \\ \sigma_3 &= \cos(\theta_1) \\ \sigma_4 &= L_2\sin(\theta_2) + L_3\sin(\theta_2 - \theta_3) \end{aligned}$$

Dando como resultado la posición final de la pinza en el espacio de trabajo:

$$\begin{aligned} X_{Final} &= \sigma_3 * \sigma_1 \\ Y_{Final} &= \sigma_2 * \sigma_1 \\ Z_{Final} &= \sigma_4 + L_5 \end{aligned}$$

1. **Cinemática Directa:** Al obtener la matriz de la Ecuación 4, es posible controlar el robot ingresando los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 , siendo la base, brazo y antebrazo respectivamente. Dando como resultado coordenadas finales a partir de los ángulos ingresados. Los otros valores representados como variables son realmente conocidos:

- L_2 y L_3 : Longitudes del brazo y del antebrazo, ambos de 120 mm.
- L_4 : Distancia en el eje X desde el marco 4 hasta la pinza, con un valor de 58,5 mm.
- L_5 : Distancia en el eje Y desde el marco 4 hasta la pinza, con un valor de 28,45 mm.

2. **Cinemática Inversa (Método Geométrico):** Por otro lado, en la cinemática inversa o "Inverse Kinematics", se ingresan las coordenadas deseadas ($X_{Deseado}$, $Y_{Deseado}$, $Z_{Deseado}$) y el análisis otorga los ángulos necesarios para mover cada articulación del brazo. Para ello se ha aplicado un método geométrico.

Para establecer el primer patrón de valores se utiliza la vista superior del manipulador como se muestra en la Fig. 5. De esta forma se observa que las coordenadas deseadas de X y Y se encuentran en el plano inferior del brazo, donde se calcula los valores de la ecuación 6.

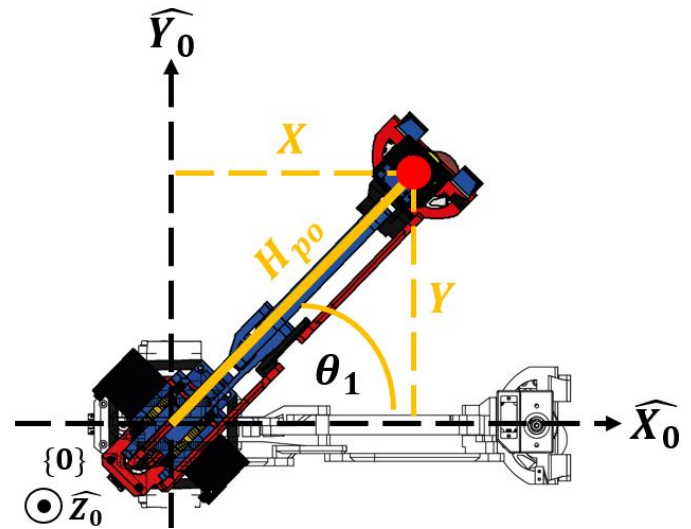


Fig. 5. Vista superior del manipulador [Hecho en Illustrator]

$$h_{po} = \sqrt{x^2 + y^2} \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (5)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (6)$$

Después de obtener la ecuación para θ_1 , se utiliza la vista frontal, como se muestra en la Fig. 6. A partir de aquí, se pueden obtener dos triángulos para encontrar las ecuaciones θ_2 y θ_3 .

Debido al mecanismo estabilizador incorporado a la cuarta articulación, en el método geométrico se usa las constantes del sistema L_4 y L_5 para calcular el punto X_1, Y_1, Z_1 , donde:

$$h_p = h_{po} - L_4 \quad (7)$$

D. Cálculo Jacobiano

Para obtener la matriz jacobiana [8] del Choco-bot se utiliza la matriz de transformación homogénea de la pinza respecto a la referencia (Ecuación 4).

Usando la definición de la Matriz Jacobiana, luego de aplicar derivadas parciales en el vector de posición de ${}^0_G T$, la matriz resultante es la expresada en la Ecuación 11.

$$J = \begin{bmatrix} -s(\theta_1)\sigma_2 & -(\theta_1)\sigma_1 & L_3(\theta_2 - \theta_3)(\theta_1) \\ (\theta_1)\sigma_2 & -s(\theta_1)\sigma_1 & L_3(\theta_2 - \theta_3)(\theta_1) \\ 0 & L_2(\theta_2) + \sigma_3 & -\sigma_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde:

$$\sigma_1 = L_2 \sin(\theta_2) + L_3 \sin(\theta_2 - \theta_3)$$

$$\sigma_2 = L_4 + L_2 \cos(\theta_2) + \sigma_3$$

$$\sigma_3 = L_3 \cos(\theta_2 - \theta_3)$$

$$s = \sin$$

$$c = \cos$$

IV. FASE DE DISEÑO

El diseño de este proyecto se ha realizado en Inventor CAD [9] para las partes mecánicas, y en Proteus para las electrónicas. El diseño se divide en cuatro categorías diferentes, que son: la estructura del robot, la pinza del robot, el sistema de transporte del transportador y la parte electrónica del robot.

A. Estructura del robot

Para controlar el movimiento, el Choco-Bot cuenta con tres motores paso a paso NEMA-17. Teniendo esto en cuenta, es importante analizar cómo la forma y el peso de estos motores afectarán el rendimiento del robot.

En primer lugar, para mover la base del robot se utiliza una relación engranaje-banda para mejorar el torque del motor, como se muestra en la Fig. 9. Esta relación también se utiliza para el resto de motores paso a paso que controlan el brazo y el antebrazo. Todos los engranajes que se ponen para el movimiento de los motores tienen una relación de 4,5, lo que permite a los motores mejorar el par de 12 N*m a 54 N*m.

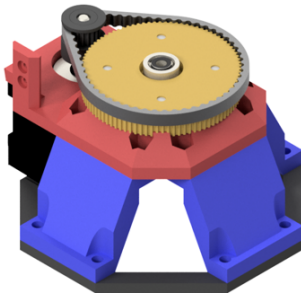


Fig. 9. Sistema de banda de engranajes para el motor paso a paso base [Hecho en Inventor]

Es por eso que los motores paso a paso están ubicados en la parte inferior del robot, cerca del centro de gravedad, como se

muestra en la Fig. 10. Esto se hace para evitar cargas excesivas en la estructura del robot y, al mismo tiempo, para mejorar el equilibrio del propio robot.

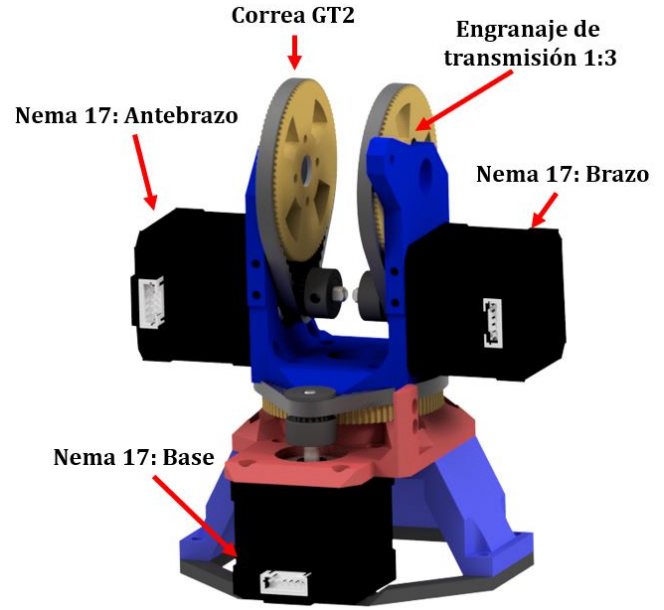


Fig. 10. Distribución del motor paso a paso y sistema de transmisión del manipulador [Hecho en Inventor]

La comunicación entre los motores y las juntas se implementa con una relación engranaje-banda con polea GT2 de 6 mm. Este mecanismo es el encargado de comunicar las piezas del cuerpo sumado a un sistema de articulación que genera el movimiento de cada articulación como se puede apreciar en la Fig. 10.

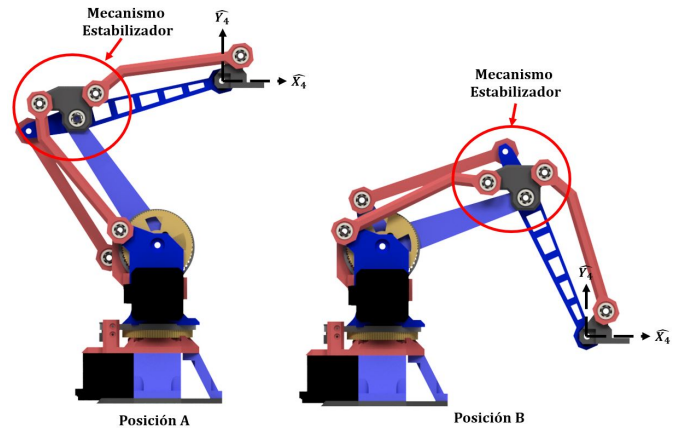


Fig. 11. Sistema de estabilización de la pinza [Hecho en Inventor]

El sistema de articulación diseñado para comunicar las articulaciones del brazo y el antebrazo también tiene otro propósito. Se requiere que la muñeca del manipulador se encuentre estable en su cuarta articulación manteniendo la pinza verticalmente todo el tiempo, por lo que se incorpora un mecanismo "Fourbar link" para corregir el ángulo de la pinza, como se muestra en la Fig. 11. Esto se puede hacer gracias

a la pieza del codo (en la Fig. 11, la pieza dentro del círculo rojo).

B. Pinza del robot

Para el diseño de la pinza se toma en cuenta la forma de un chocolate para diseñar dos piezas llamados 'puntos de agarre', que son las encargadas de agarrar el chocolate como se muestra en la Fig.12. Para asegurar el agarre se incorpora una "banda elástica en el 'punto de agarre B' que adopta la forma irregular de la unidad de chocolate sin necesidad de ejercer mucha presión por parte de la pinza sobre el objeto.

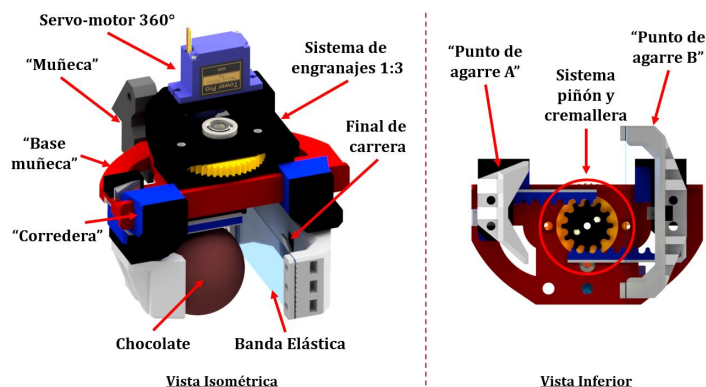


Fig. 12. Diseño de la pinza Hecho en Inventor

El resto del diseño de la pinza consiste en el mecanismo de apertura y cierre. Se basa en una relación engranaje de piñón-cremallera accionada por un servomotor de 360°.

La pinza también cuenta con espacios para poner finales de carrera. El propósito de estos interruptores es identificar cuándo se abre o se cierra la pinza.

El primer final de carrera se encuentra en el 'punto de agarre B', que es activado una vez que el chocolate entra en contacto con la 'banda elástica' y lo empuja hasta accionar el final de carrera. Fig. 12. Si el robot no agarra nada y la pinza se está cerrando, la pinza no se detendrá ya que no tiene nada en el interior para golpear el interruptor de límite, por lo que por medio de un 'timer', detectará si ha excedido el tiempo necesario para agarrar el producto y detendrá la pinza indicado error al no poder agarrar nada.

C. Diseño del sistema transportador

El sistema transportador es otra parte importante del proyecto, ya que es el que automatiza el proceso de entrega de los chocolates al robot.

Está diseñado con 6 rodillos, 4 de ellos son rodillos guía para mantener estable el traslado del producto. Mientras que el primero es el rodillo conductor conectado al motor Nema 17, y el último rodillo, es el encargado de tensar la banda transportadora y asegurar una superficie de transporte segura. Este mecanismo se puede ver en la Fig. 13.

La banda seleccionada para el diseño fue de poliuretano (PU). El propósito de esta cinta transportadora es guiar por la banda una unidad de chocolate para acercarlo al 'Workspace' del manipulador, automatizando el proceso por

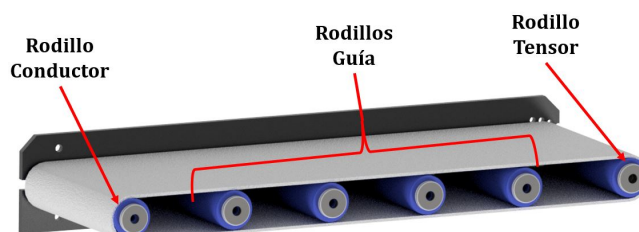


Fig. 13. Vista lateral del transportador [Hecho en Inventor]

completo. El diseño completo del sistema de transporte que se puede ver en la Fig. 14.

D. Caja de Circuitos

Para mantener seguros todos los componentes electrónicos, se ha diseñado un gabinete (Fig. 14) para protegerlos y mantenerlos en una sola posición. Este gabinete tiene suficiente espacio para ingresar nuevos componentes si se desea, y también tiene cortes en los costados para el diodo IR y la fuente de alimentación, igualmente proporciona un sitio cómodo para la pantalla LCD, desde la cual el usuario puede leer e interactuar con ella sin una sola complicación.

E. Diseño completo

El diseño final se complementa con la unión de cada sección, y se agrega una última pieza denominada "Paquete", la cual se encarga de establecer las ubicaciones de cada chocolate dentro del proceso. Fig 14.

Secciones principales:

- Manipulador 'Choco-Bot'
- Pinza con sistema de agarre
- Empaque de chocolates
- Banda transportadora
- Chocolate
- Apertura para control IR
- Pantalla LCD
- Caja de Circuitos
- Ventiladores de motores

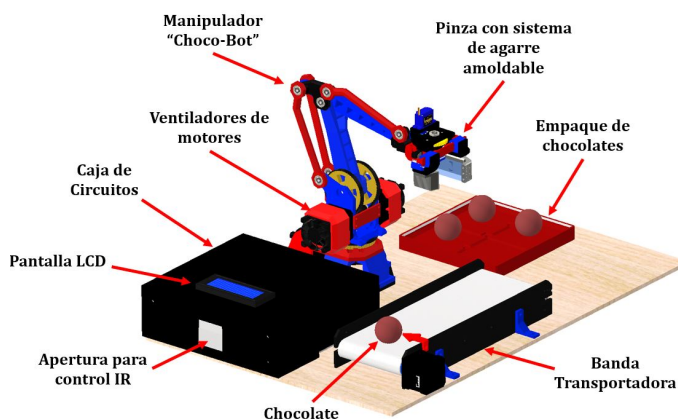


Fig. 14. Diseño completo [Hecho en Inventor]

F. Diseño electrónico

Se selecciona un Arduino MEGA como microcontrolador debido a la cantidad de pines para poder realizar todas las conexiones.

Para proporcionar el movimiento a los motores del robot se utilizan 4 drivers A4988. Estos controladores permiten al usuario cambiar la velocidad, la dirección y la activación de los motores. Por otro lado, para refrigerar los 3 motores que van colocados en el brazo se han utilizado 3 ventiladores 4010 (1 por motor). La distribución de energía y configuración de enlace se puede observar en la Fig. 15.

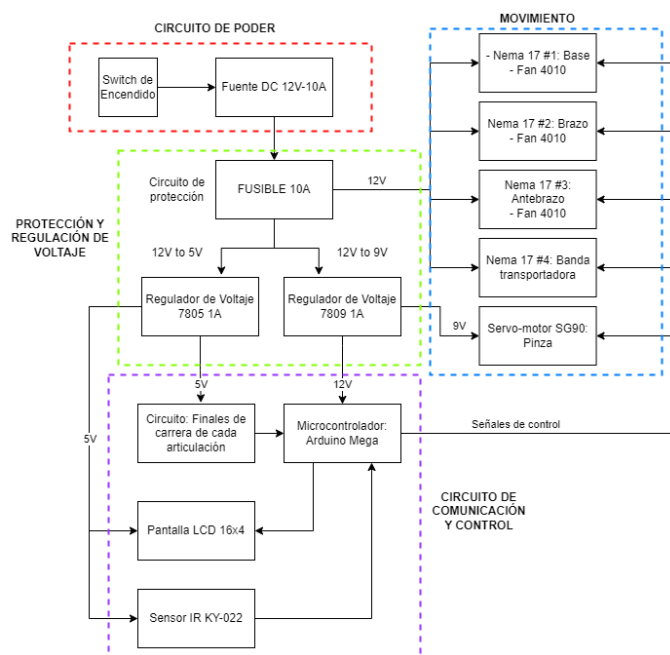


Fig. 15. Diagrama de Bloques [Hecho en Illustrator]

Para implementar la interfaz se ha utilizado una pantalla LCD de 20x4, y para la comunicación hombre-máquina se implementó un diodo IR KY-022 con control remoto. La pantalla seleccionada se comunica con el microcontrolador mediante el serial I2C para guardar pines. El propósito de seleccionar una pantalla grande es desarrollar una interfaz que sea fácil de entender y manipular.

El esquema del circuito electrónico completo se muestra en la Fig. 16.

Se utiliza una fuente de alimentación de 12, 10A para alimentar a los componentes del manipulador. La selección de esta fuente de alimentación se hace calculando la corriente máxima que el circuito puede tomar en cualquier punto. El cálculo de la corriente se aprecia en la Tabla II.

Para optimizar su uso y manejo se diseña en el software Proteus una PCB (placa de circuito impreso) de dos lados, que se muestra en la Fig. 17, su diseño se caracteriza por clasificarse como una PCB Shield que va que se incorpora al Arduino Mega fácilmente.

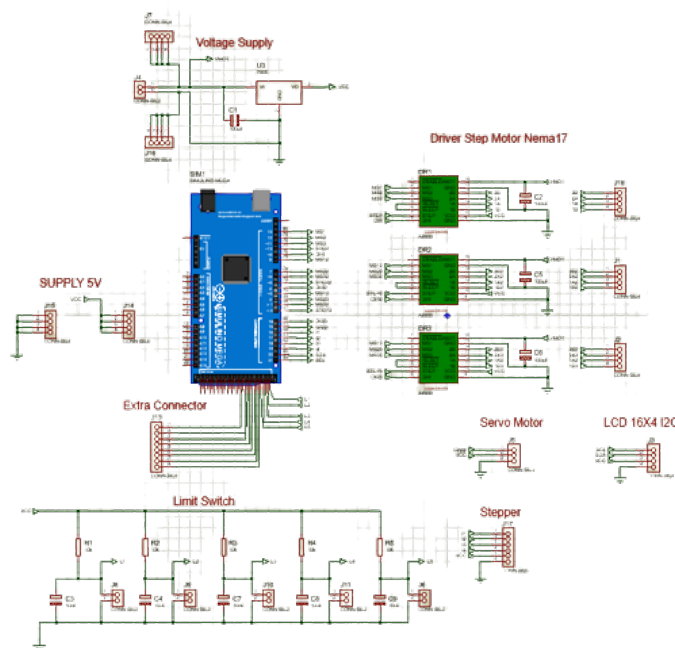


Fig. 16. Circuito Electrónico [Hecho en Proteus]

TABLA II
CONSUMO ACTUAL DEL PROYECTO

Consumo actual total de Choco-Bot			
Componente	Unidad Corriente	Cantidad	Corriente Total
Arduino MEGA	73.19 mA	1	73.19 mA
NEMA17, A4988	1.2 A	4	4.8 A
SG-90 Servo	6 mA	1	6 mA
4010 Fan	100 mA	3	300 mA
LCD 20x4	75 mA	1	75 mA
Others	—	—	1 A
Total	—	—	6.254 A

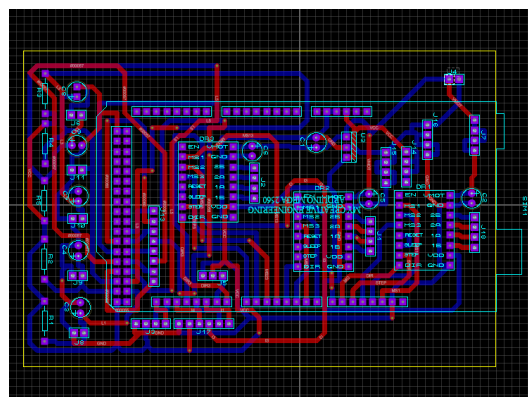


Fig. 17. PCB [Diseñado en Proteus]

V. FASE DE IMPLEMENTACIÓN

Las piezas se fabricaron en impresión 3D con filamento PLA en una impresora Ender 3 Pro con tolerancia de $\pm 0,2\text{mm}$. La pieza base de la Fig. 18 fue la única impresa con PETG, debido a su resistencia a altas temperaturas y propiedades

mecánicas para resistir el cuerpo principal del manipulador.

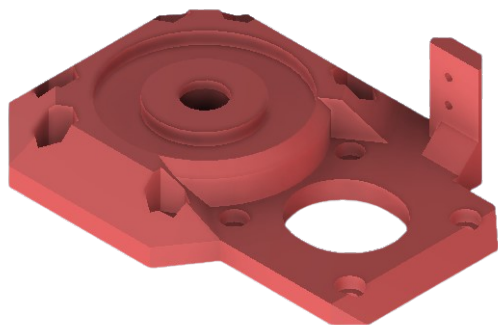


Fig. 18. Pieza base de cuerpo [Diseñado en Inventor]

En la tabla III. se puede ver una comparativa entre ambos materiales, PLA y PETg

TABLA III
COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE PLA Y PETg

Propiedad	PLA	PETg
Temperatura de deflexión térmica	55°C	68°C
Módulo de elasticidad	2.3 GPa	2.1 GPa
Máx. Temperatura de fusión	145-160°C	220-245°C
Temperatura de transición del vidrio	55-60°C	80-82°C
Elongación	2 %	14 %
Fuerza de tracción final	26.4 MPa	45.8 MPa

A. Montaje de estructura

Lo primero que se implementa es la estructura del brazo robótico, y el montaje de la base. Para ello se necesitan las piezas de soporte, el zócalo de la base, el engranaje de la base y el motor paso a paso de la base para construir la parte inferior del robot. Para proporcionar rotación en la base, se coloca un cojinete axial en el receptáculo de la base. Este paso se representa en la Fig. 19

Se coloca un engranaje sobre el rodamiento para que pueda girar libremente. Además, se incorpora un pequeño engranaje para el eje del motor, y una correa GT2 para comunicar estos dos, el motor y la base, como se muestra en la Fig. 20.

Para finalizar con el ensamble de la base, se debe acoplar la parte del cuerpo principal en el engranaje de la base para que pueda girar sin problema, como se muestra en la Fig. 21. Esta pieza es la que sujeta el resto de motores para el brazo y el antebrazo.

El siguiente paso en el montaje de la estructura es la construcción de la parte media del robot. Esta parte consiste en el brazo del robot, que contiene los engranajes para que los demás motores se comuniquen con las articulaciones.

Los engranajes están acoplados y ajustados a sus respectivas piezas, como se indica en la Fig. 23. Al hacer este paso, los engranajes se pueden comunicar con sus respectivos motores paso a paso con correas GT2, tal como se hizo para la base.

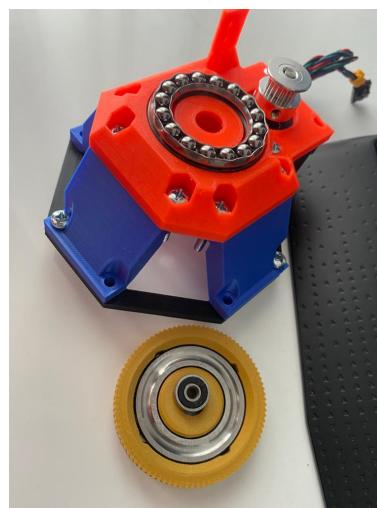


Fig. 19. Parte inferior del conjunto del brazo

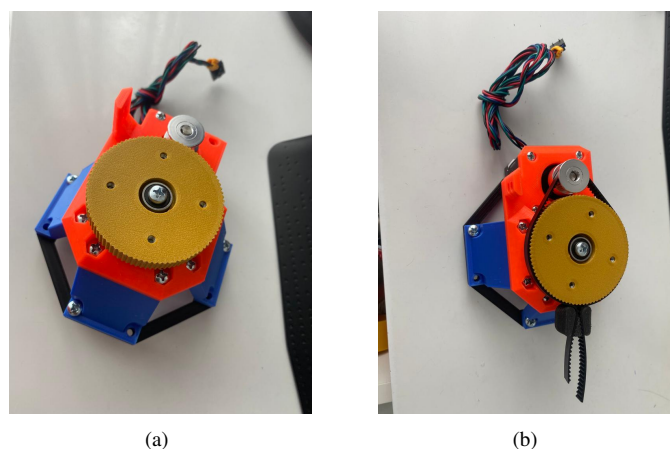


Fig. 20. Establecimiento de la comunicación entre el engranaje base (a) y el eje (b)

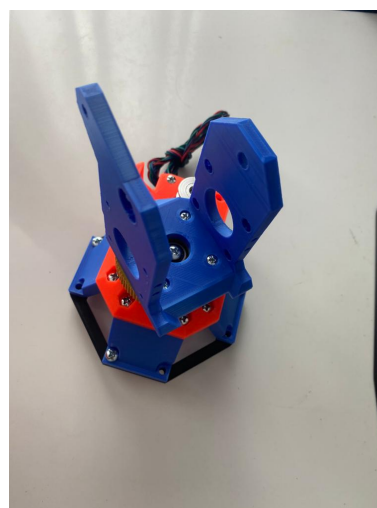


Fig. 21. Acoplamiento de la pieza del cuerpo principal

Para proporcionar una mejor rotación de las piezas, se deben

colocar unos rodamientos en las piezas correspondientes como se muestra en la Fig. 22.

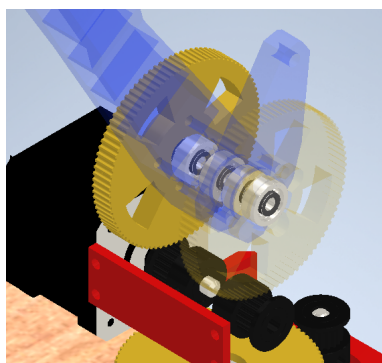


Fig. 22. Rodamientos incluidos en la parte media del cuerpo del robot.

Después de eso, las dos piezas resultantes se ensamblan para obtener una parte completa del cuerpo medio del robot. Esta pieza obtenida es la que se muestra en la Fig. 23.



Fig. 23. Subensamblaje de pieza de cuerpo medio

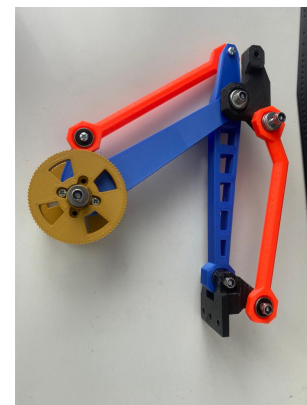
El paso final para obtener la estructura completa del robot es construir el mecanismo de articulación que contiene la muñeca, el codo y el antebrazo del robot. Para esto, el antebrazo debe ensamblarse a la parte media del cuerpo con la ayuda del codo, como se muestra en la Fig. 24. Mientras que la muñeca se coloca en la punta del antebrazo para darle sujeción a la muñeca que sostiene el end-effector.

Las barras de unión se colocan en la estructura de los brazos, para comunicar las transmisiones. Este proceso se puede ver en la Fig. 24. Estas barras de unión no están conectadas directamente a las articulaciones, están conectadas a la pieza del codo para mover el brazo y el antebrazo.

El ensamble concluye al unir la parte inferior de la base con las articulaciones del brazo y antebrazo como se observa en la Fig. 28.



(a)



(b)

Fig. 24. Posicionamiento de las barras de unión

B. Montaje del End-effector

Se incorpora la pieza 'base de la pinza' con la pieza de la 'muñeca', formando la primera sección de la pinza. Con la base puesta, se colocan las piezas 'corredoras' que sostienen los 'puntos de agarre' del manipulador, en esta sección se coloca el mecanismo de piñón-cremallera que da la movilidad de cierre y apertura de la garra como se muestra en la Fig. 12.

El uso de la banda elástica tiene como finalidad que la banda elástica adquiera la forma del chocolate, dotándolo de tensión, para agarrarlo y moldear la pinza a la forma del chocolate. Esto significa que no importa cuál sea la forma del chocolate, debido a la banda elástica, la pinza se amoldará a la forma del chocolate.

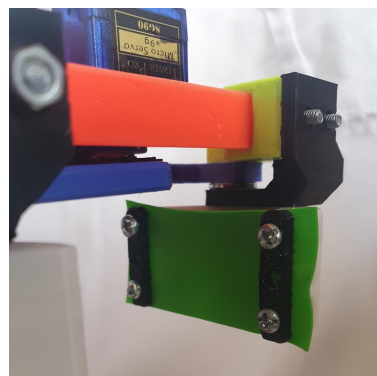


Fig. 25. Inserción de la banda elástica en el dedo

Para asegurar el chocolate en su lugar, sin dañarlo, se agregan dos pequeñas piezas de espuma en el dedo opuesto para emular un efecto de golpe, como se muestra en la Fig. 26.

C. Implementación electrónica

Una vez que el robot está completamente ensamblado, el enfoque debe establecerse en la parte electrónica del proyecto. Como se indicó anteriormente, se ha diseñado un circuito

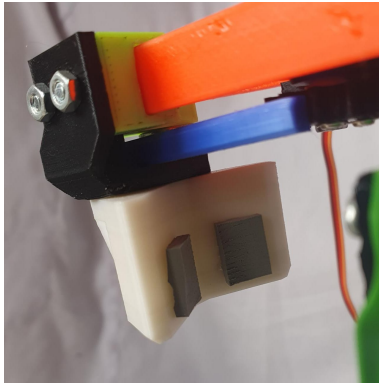


Fig. 26. Implementación de parachoques de espuma en el dedo opuesto

PCB para el proyecto.

Esta PCB se fabrica en baquelita de doble cara, de manera que en uno de los lados, el único componente que se inserte sea el microcontrolador, haciendo que la PCB sea un escudo. En el lado opuesto de la PCB, se colocan todos los demás componentes de control, como los controladores A4988, el diodo IR y las conexiones para los motores. Es así que este PCB se coloca dentro del gabinete electrónico, junto con la fuente de alimentación, como se muestra en la Fig. 27.

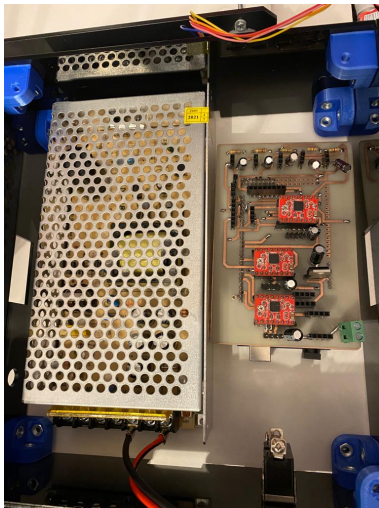


Fig. 27. Implementación de la PCB en el gabinete

Luego de realizar la PCB en su totalidad, se asegura el correcto funcionamiento del proyecto con la calibración de los drivers A4988, que en este caso, se utiliza la Ecuación 12 para ajustar el voltaje de los drivers.

$$V_{ref} = 8 \times I_{limit} \times R_{ref} [10] \quad (12)$$

Para el proyecto, la corriente límite es de 1,2 A debido a los motores paso a paso NEMA-17, donde la resistencia de referencia es 0,1Ω. Al aplicar la Ecuación 12, el voltaje de referencia da un valor de 0.96V.

Otro punto importante que se agrega al proyecto fue la refrigeración de los motores paso a paso por medio de pequeños ventiladores 4010. Estos ventiladores se conectaron a los motores como se muestra en el diagrama de la Fig. 14 y la Fig. 28.

D. Ensamble Final

Una vez completado el montaje de la pinza y realizado las configuraciones electrónicas, también finaliza el montaje completo del robot. El resultado del ensamble final de la estructura, la pinza, la caja de circuito, banda transportadora y la caja de empaquetado se muestra en la Fig. 28.

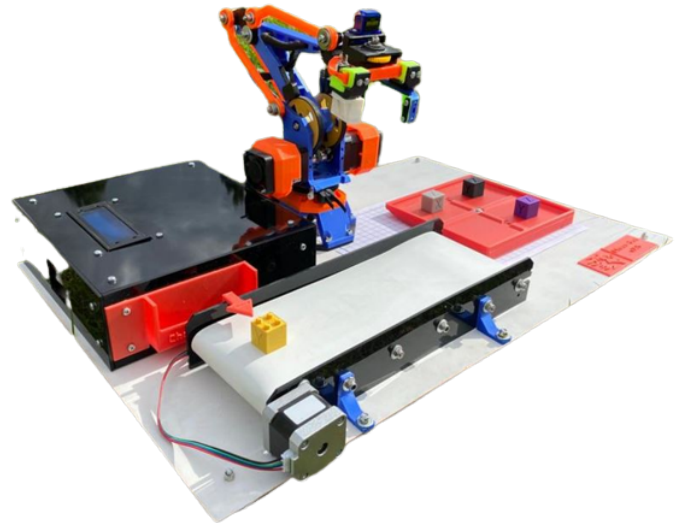


Fig. 28. Ensamble Final del 'Choco-Bot'

VI. INTERFAZ VISUAL Y PROTOCOLOS DE RUTINAS

La interfaz visual se denominó 'Choco-Bot v7.4' que cuenta con una interfaz desarrollada para que el usuario pueda controlar el robot con total libertad y sin ninguna complicación. Esta interfaz divide el control de Choco-Bot v7.4 en dos formas diferentes: control automático y control manual. El usuario puede seleccionar cualquiera de las opciones de control presionando el botón correspondiente en el control remoto.

A. Selección de Modo

Para seleccionar el control automático, el usuario debe presionar el botón (1). El mismo principio se aplica en todos los menús de Choco-Bot v7.4. Fig. 29

MODE SELECTION :													
1)	A	U	T	O	M	A	T	I	C	M	O	D	E
2)	M	A	N	U	A	L	M	O	D	E			

Fig. 29. Selección Menu

1)	B	A	S	E	A	N	G	L	E				\$	\$	\$
2)	A	R	M	A	N	G	L	E					\$	\$	\$
3)	F	O	R	E	A	R	M	A	N	G	L	E		\$	\$
4)	S	T	A	R	T	M	O	V	E	M	E	N	T		!

Fig. 34. Control de entrada de ángulo (método de cinemática directa)

un grado. Cuando se selecciona una opción en la esquina inferior derecha, aparece un ! será impreso. Para confirmar el valor, el usuario debe presionar el botón PLAY/PAUSE en el control remoto y Choco-Bot v7.4 guardará el valor deseado. Cuando todos los valores son los deseados, el usuario puede presionar el botón 4 en el control remoto para iniciar el movimiento del brazo.

- **Control de entrada de coordenadas:** Choco-Bot v7.4 también permite al usuario introducir coordenadas como entradas para controlar el movimiento del robot. El principio para ingresar las coordenadas es el mismo que en el ingreso de ángulos, pero con algunas pequeñas diferencias. Fig 35

1)	C	O	O	R	.	X				\$	\$	\$			
2)	C	O	O	R	.	Y				\$	\$	\$			
3)	C	O	O	R	.	Z				\$	\$	\$			
4)	S	T	A	R	T	M	O	V	E	M	E	N	T	.	!

Fig. 35. Control de entrada de coordenadas (método de cinemática inversa)

La entrada de coordenadas afectará a todos los ángulos del robot, por lo que cuando el usuario confirma un conjunto de coordenadas, Choco-Bot v7.4 moverá todos los motores para alcanzar la posición deseada. Este método es un poco más preciso que el anterior, ya que tiene dos opciones diferentes de pasos. El usuario puede modificar la coordenada por 1 o por 0,01 para obtener valores decimales.

El paso predeterminado es de 1, pero el usuario puede cambiar al paso 0.01 presionando el botón CH en el control remoto. Para volver al paso 1, el usuario debe presionar el botón EQ en el control. Aparecerá un indicador (.) en la corneta inferior derecha si el paso seleccionado es de 0,01. Es importante indicar la dirección de los ejes positivos X, Y y Z de Choco-Bot v7.4 para que el usuario pueda ingresar los valores correctos. Las direcciones de los ejes se muestran en la Fig. 36, cuando el robot está en la posición de inicio:

Por poner un ejemplo, si el usuario quiere mover la pinza a la caja de embalaje, la coordenada en X debe ser negativa, y en Y positiva por las posiciones. La coordenada Z funciona de una manera ligeramente diferente. Se refiere a la posición de la pinza respecto al punto de referencia, que es la unión de la base y el brazo. Esto significa que, por

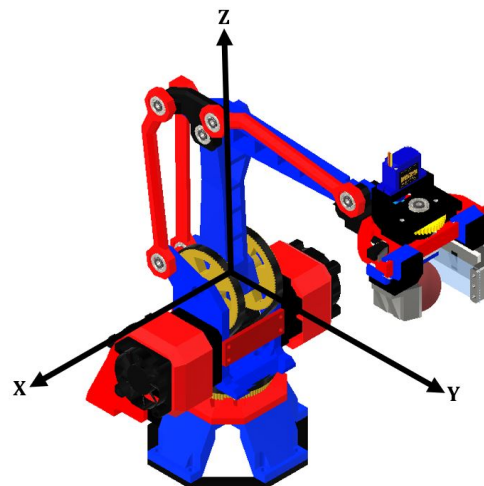


Fig. 36. Eje de coordenadas iniciales de Choco-Bot v7.4

ejemplo, para tomar un chocolate, el usuario debe ingresar valores negativos en Z. Si Choco-Bot v7.4 detecta una posición inalcanzable y el usuario desea mover la pinza a ese punto, el mensaje en la Fig. 37 mensaje de advertencia de punto inalcanzable para la entrada de coordenadas se mostrará en la interfaz durante 3 segundos y posteriormente ingresará al cálculo por medio de método iterativo para moverse a coordenadas aproximadas a las ingresadas.

Fig. 37. Mensaje de advertencia de punto inalcanzable para entrada de coordenadas

De esta forma, Choco-Bot v7.4 está protegido contra posiciones no deseadas y daños en el proceso.

- **Información cinemática:** En cualquier tipo de entrada de movimiento (ya sea ángulos o coordenadas), si el usuario presiona el botón 5, la información sobre la posición exacta del robot se mostrará en la pantalla como se muestra en la Fig. 38 \$ representa coordenadas y % ángulos.

Fig. 38. Pantalla de información cinemática. \$ representa coordenadas y % ángulos

Al observar esta información, el usuario puede verificar la posición del robot en coordenadas

(valores de la izquierda), y también conocer los valores de cada uno de los ángulos en esa posición específica (valores de la derecha).

- **Control Gripper:** El control de la pinza es bastante simple. Tiene sólo dos opciones, abrir la pinza y cerrarla (ver Fig. 39).

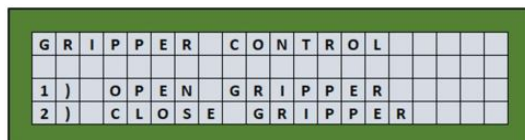


Fig. 39. Menu control Gripper

Es importante tener en cuenta que para cerrar la pinza, debe haber un objeto debajo de la pinza misma, de lo contrario, Choco-Bot v7.4 fallará debido a su diseño.

- **Movimiento Conveyor:** La opción del movimiento del transportador es la más sencilla entre todas las opciones de la interfaz. Cada vez que el usuario presione el botón para activar el movimiento del transportador, simplemente girará el motor del transportador para trasladar el chocolate debajo de la pinza.

VII. FASE DE PRUEBA Y VALIDACIÓN

A. Cinemática Directa (C.D)

Los valores de entrada son los que se muestran en la Fig. 40.



Fig. 40. Ángulos de cinemática directa ingresados

Después de hacer que el robot se moviera presionando el botón de acción, se revisa el menú de información de cinemática para comparar el resultado obtenido por el microcontrolador y el cálculo de MATLAB. Estos resultados se muestran en la Fig. 41.

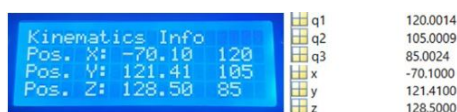


Fig. 41. Resultados cinemática directa en interfaz LCD y MATLAB

Como se puede observar, los valores para la cinemática directa no varían en gran cantidad en comparación con los valores obtenidos en MATLAB.

B. Cinemática Inversa (C.I)

Los valores de entrada se muestran en la Fig. 42, y los valores resultantes en conjunto con la proyección de MATLAB se aprecian en la Fig. 43.



Fig. 42. Coordenadas de cinemática inversa ingresados

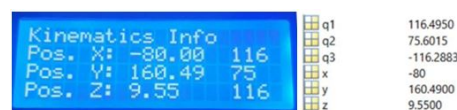


Fig. 43. Resultados cinemática inversa en interfaz LCD y MATLAB

1. **Método Geométrico:** Se realizaron un total de 20 pruebas para obtener la precisión del algoritmo de análisis geométrico para cinemática inversa.

Las pruebas realizadas se basaron en ingresar una coordenada específica dentro del espacio de trabajo del brazo robótico. Y luego compare el resultado de la coordenada con los valores deseados. Tabla IV.

Según las pruebas realizadas, se alcanzó una tasa de error del 2,85 %, lo que indica que el método utilizado tiene una fiabilidad del 97,15 %.

TABLA IV
PRUEBAS DE C.I CON MÉTODO GEOMÉTRICO

NºPrueba	X_D	X_F	Y_D	Y_F	Z_D	Z_F
1	-155.18	-154.2	130	132.3	-29.28	-29.5
2	80	80	110	110	70	70
3	0	0.8	200	201.5	-65	-65.8

Pruebas de C.I con Método Geométrico

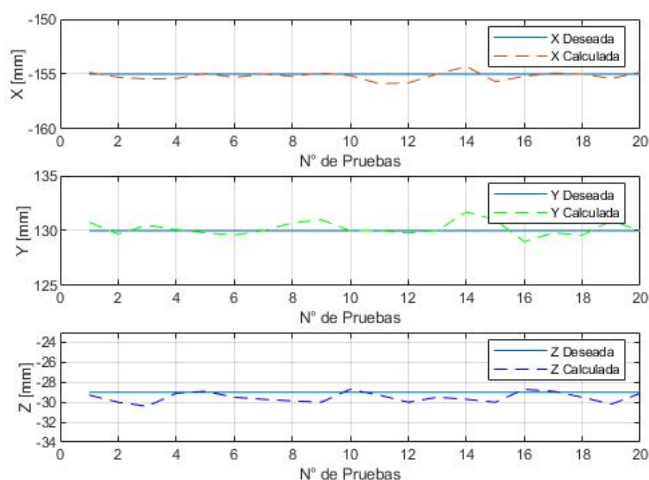


Fig. 44. Pruebas de C.I con Método Geométrico [Hecho en Matlab]

2. **Método Iterativo C.I:** De igual forma para este método se realizaron 20 pruebas donde se ingresó la coordenada deseada y se obtuvo la coordenada analizada. Este método dio un error del 5,014 %, pero solo si se tienen en cuenta los tiempos en los que el algoritmo iterativo encontró una

aproximación, ya que el algoritmo tiene un límite máximo de 1000 iteraciones, hubo ocasiones en las que no se alcanzó a encontrar una solución aceptable. Por tanto, este método se convierte en un método que no es del todo fiable y tiene un mayor porcentaje de error que el método geométrico, algunas de las pruebas realizadas se observa en la tabla V

TABLA V
PRUEBAS DE C.I CON MÉTODO ITERATIVO

Nº Prueba	X_D	X_F	Y_D	Y_F	Z_D	Z_F
1	-155.18	-150.5	130	129.6	-29.28	-26.7
2	80	76.5	110	112.23	70	70.64
3	0	2.37	200	203.41	-65	-62.89

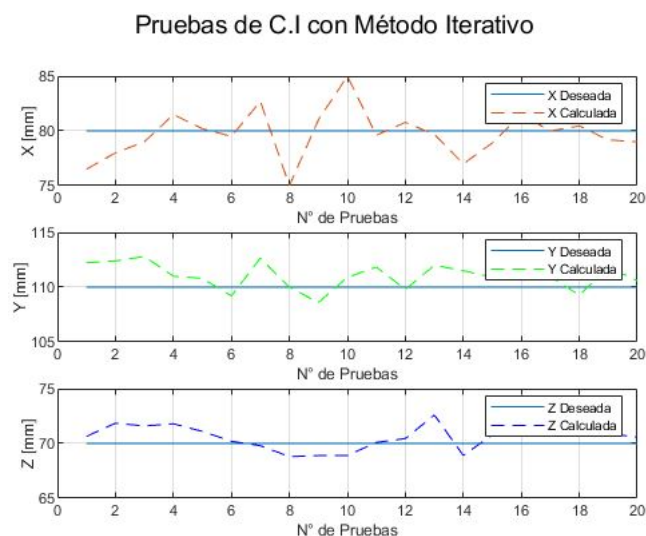


Fig. 45. Pruebas de C.I con Método Iterativo [Hecho en Matlab]

Los resultados de los dos métodos se puede observar en la Fig. 44 y 45, donde la primera siendo el método geométrico se observa un comportamiento de resultados constante donde los cálculos se aproximan a los resultados de coordenadas deseadas, teniendo como rango de error de ± 0.7 mm, mientras que por otro lado, con el método iterativo se puede observar un comportamiento mucho mas irregular de los resultados donde su rango de error es de ± 5 mm.

3. Pruebas de rutina de empaquetado de chocolates:

Se realizaron 20 pruebas de rutina automáticas, en las que el manipulador coloca los 4 chocolates en la caja. Los resultados se pueden ver en la Fig. 46.

Se puede concluir que 16 de cada 20 veces el robot funciona con total normalidad. Los fallos se dan cuando el chocolate presenta dimensiones esféricas muy irregulares y la pinza no puede agarrar la unidad de chocolate y completar la rutina.

VIII. CONCLUSIONES

- El uso de sistema de engranajes y bandas de transmisión para incrementar el torque de cada motor determina

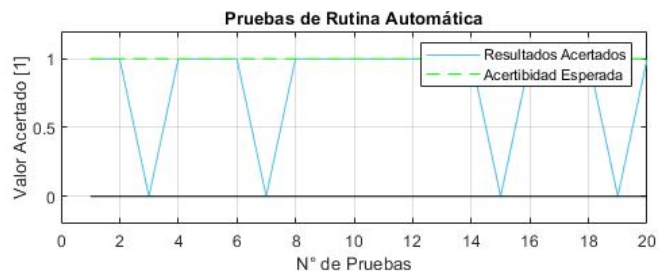


Fig. 46. Pruebas de Rutina Automática [Hecho en Matlab]

directamente la eficiencia de la tarea a realizar por parte del manipulador,

- Se pudo diseñar e incorporar una pinza con punta adaptable para adaptarse a cualquier superficie irregular del chocolate.
- Se logró crear e incorporar una interfaz de usuario capaz de interactuar con todas las funcionalidades del brazo robótico, así como para: Cinemática Directa, Cinemática Inversa, Rutina Homing, Rutina Chocolate y también poder observar la cantidad de chocolates empaquetados.
- El análisis cinemático realizado por el método de la teoría Denavit-Hartenberg permite establecer relaciones de movimiento en cada articulación para determinar la posición final de la pinza o 'End-Effector'.
- Los resultados de los métodos geométrico e iterativo para la cinemática inversa establecen para el método geométrico como la mejor opción de C.I con un 97.15 % de confiabilidad.

Video de Funcionamiento: <https://youtu.be/plmk8X362J4>

REFERENCIAS

- [1] D. S. de Pedro Rada, "Implantación de una solución de pick and place en un robot industrial utilizando un sistema de visión artificial basado en redes convolucionales," *Comillas Universidad Pontificia ICAI*.
- [2] "Fortaleciendo el sector de cacao en ecuador," <https://latinoamerica.rikolto.org/es/project/fortaleciendo-el-sector-de-cacao-en-ecuador>, accessed: 2022-04-13.
- [3] "Análisis de cacao 2020," <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/07/An%C3%A1lisis-de-cacao-24-de-junio-2020-7.pdf>, accessed: 2022-06-4.
- [4] "Robots de paletizado de kuka | kuka ag. (2022)," <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/robot-de-paletizado>, accessed: 2022-06-4.
- [5] "Robots de paletizado de kuka. (2022)," <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/robot-de-paletizado>, accessed: 2022-06-4.
- [6] S. Liu and G. S. Chen, *Dynamics and control of robotic manipulators with contact and friction*. John Wiley & Sons, 2019.
- [7] J. J. Craig, "Introduction to robotics mechanics and control," vol. 3, 2005.
- [8] P. I. Corke, "A robotics toolbox for matlab," *Robotics Toolbox for MATLAB*, vol. 10.4, no. 1, 2020.
- [9] RUSKOMPONEN, "BRAZO ROBÓTICO," <https://cults3d.com/es/modelo-3d/artefacto/robot-arm-februandi>, accessed: 2022-09-02.
- [10] L. M. Engineers, "In-Depth: Control Stepper Motor with A4988 Driver Module & Arduino," <https://lastminuteengineers.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>, accessed: 2022-10-02.