



Universidad
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Mecánica

Desarrollo de un brazo robótico antropomórfico capaz de realizar el desafío de la botella

Patricio Felipe Morales Rosales
Profesor guía: Pablo Gutiérrez Matus
Comisión: Daniel Casagrande
Richard Molina

Trabajo de título para optar al título y/o grado de ingeniero civil mecánico

Rancagua, Chile
Enero, 2024

Dedicatoria

Para Damariz, mi compañera de vida, y para mis padres. Margarita, mi ángel en la tierra y Patricio, mi ángel en cielo.

Agradecimientos

Agradezco al profesor Pablo Gutiérrez Matus por permitirme conocer el interesante y desafiante mundo de la mecánica de fluidos, además de apoyarme y guiarme en el desarrollo de este documento. Agradecer a Adolfo Martínez, quien me acompañó de forma constante, respondiendo dudas y por sobre como apoyo profesional. También agradecer a Víctor Ahumada, quien fue el pionero en el tema del brazo robótico y me guió constantemente en el avance del proyecto.

Agradezco a los profesores de la comisión: Daniel Casagrande y Richard Molina, quienes tuvieron disposición de atender mis consultas y orientarme en el desarrollo del proyecto. También agradecer a Robert Guamán, quien de forma incondicional respondió mis dudas de robótica.

Agradecer a todo el equipo de pabellón del Hospital de Rengo; sin su apoyo constante, me hubiese sido imposible llegar siquiera a estas instancias. Gracias a cada uno de ustedes.

Agradecer a mi familia por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de la carrera.

Finalmente, agradecer al equipo de la Fábrica Digital O'Higgins, quienes pusieron sus instalaciones a disposición para la fabricación y manufactura del brazo robótico. Además, agradezco al Instituto de Ciencias de la Ingeniería y al proyecto FONDECYT 11191106 por el financiamiento para este trabajo de tesis.

Índice

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	8
ACTIVIDADES PRINCIPALES	8
LIMITACIONES	8
MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA	9
MARCO METODOLÓGICO.....	21
RESULTADOS.....	32
CONCLUSIÓN	41
REFERENCIAS	43
ANEXOS.....	46

Resumen

Lanzar una botella, que gire en el aire y caiga de pie representa un desafío que combina elementos de física, mecánica y control de movimiento. Esta tarea, que requiere una combinación precisa de fuerza, ángulo de lanzamiento y coordinación, ha sido tradicionalmente una habilidad humana. Sin embargo, con el avance de la tecnología, se ha explorado la posibilidad de automatizar y perfeccionar este proceso utilizando sistemas robóticos.

El presente trabajo de título se centra en el desarrollo de un brazo robótico antropomórfico diseñado para realizar el desafío del lanzamiento de botellas, una tarea que requiere una combinación de precisión, fuerza y coordinación.

El proceso comienza con la selección de servomotores, fundamentales para cumplir con las condiciones iniciales del lanzamiento de botellas. Estas condiciones incluyen variables como el ángulo con el que se suelta la botella, la distancia de lanzamiento y su trayectoria. Posteriormente, se procede al diseño de los componentes del brazo robótico. Este diseño se realiza en función de las especificaciones técnicas de los servomotores seleccionados, asegurando una integración óptima y una funcionalidad eficiente. Los componentes diseñados son fabricados utilizando tecnología de impresión 3D, una selección que permite una alta precisión y adaptabilidad en el proceso de manufactura.

Una vez fabricados, los componentes se ensamblan para conformar la estructura del brazo robótico. El control del movimiento y funcionalidad del brazo se logra a través de un microcontrolador Arduino. La programación del brazo, realizada en el entorno de Arduino, está específicamente diseñada para lanzar botellas. Finalmente, el brazo robótico se somete a una serie de ensayos, lanzando botellas con distintas fracciones de llenado. Estos lanzamientos se registran utilizando una cámara de alta velocidad, lo que permite un análisis detallado y preciso de cada lanzamiento. Los resultados obtenidos de estas pruebas se comparan con lanzamientos realizados por un brazo humano. Esta comparativa es esencial para evaluar la eficacia, precisión y capacidad del brazo robótico para replicar la acción de lanzar la botella.

Palabras clave: robótica, lanzamiento, botella, servomotores, precisión

Introducción

El desafío de la botella consiste en lanzar una botella parcialmente llena de agua y que esta gire en el aire aterrizando de pie. Tuvo gran popularidad a nivel mundial en el año 2016 (Finio, 2018) y con esto generó el interés en conocer los fenómenos físicos que están presentes en el desafío. Pero, poder estudiar la física presente en el lanzamiento de la botella tiene una gran problemática y es lo difícil de controlar los parámetros iniciales de lanzamiento: velocidad inicial, ángulo de lanzamiento, torque, punto de liberación y fuerza de agarre.

Debemos considerar que para arrojar una botella (independiente si aterriza de pie o no) el proceso consta de dos partes: La primera parte consiste en que el lanzador dará el impulso necesario a la botella y la segunda parte la botella rotará libremente. La segunda parte del desafío, donde la botella rota libremente es el principal foco de estudio, debido a la complejidad de controlar y repetir con exactitud las condiciones iniciales del lanzamiento realizado por un humano. En virtud de esto es crucial poder controlar y repetir experimentos con distintos parámetros y comparar los resultados obtenidos.

Ante la dificultad de controlar y replicar con precisión las condiciones iniciales de un lanzamiento manual, la implementación de un brazo robótico se vuelve esencial. Este dispositivo permitirá estandarizar el proceso, asegurando que cada botella sea impulsada bajo los mismos parámetros. De esta forma, el brazo robótico no solo elimina las variables indeseadas por el factor humano, sino que además facilitará la recopilación de datos consistentes y comparables. Esto aportará directamente en poder responder la pregunta principal del desafío de la botella: ¿De qué depende que un lanzamiento sea exitoso?

La robótica es la ciencia que estudia el diseño y aplicaciones de los robots. Estas son máquinas reprogramables capaces de realizar movimientos en una aplicación concreta. Es un área multidisciplinaria ya que requiere conocimientos de mecánica, electrónica y programación (Ibáñez & Andueza, 2018).

Uno de los principales objetivos de la ingeniería robótica es diseñar un manipulador con alta destreza. En cuanto a las aplicaciones robóticas industriales, como la soldadura, pintura, ensamblaje automatizado, están relacionadas con la productividad y el control de calidad. Por lo

tanto, se requiere lograr un manipulador robótico preciso. Una preocupación fundamental de la investigación actual en robótica es desarrollar brazos antropomórficos que cuenten con características similares a los brazos humanos y que sean capaces de emular la destreza, manipulación, relación peso–carga y el espacio de trabajo (Luthsamy et al., 2016).

Los brazos robóticos se han convertido en herramientas indispensables en una amplia gama de industrias debido a su versatilidad, precisión y capacidad para realizar tareas repetitivas y complejas con alta precisión (Mohan et al., 2023).

Objetivo general

- Desarrollar un brazo robótico antropomórfico, capaz de realizar el desafío de la botella controlando y registrando las condiciones iniciales de los lanzamientos.

Actividades principales

- Seleccionar y justificar los actuadores que ejecutarán el lanzamiento.
- Diseñar el brazo robótico en el software Autodesk Fusion 360 en base a los actuadores seleccionados.
- Verificar los esfuerzos y factores de seguridad de los componentes diseñados.
- Ensamblar el brazo robótico.
- Programar el brazo robótico tal que sea capaz de realizar lanzamientos con la botella.
- Registrar las condiciones iniciales y poder repetirlos.

Limitaciones

- Complejidad en la reproducción de movimientos humanos. El brazo robótico no puede replicar completamente la complejidad y variabilidad de los movimientos humanos al lanzar una botella.
- Limitaciones de los materiales y componentes. La eficiencia del brazo robótico depende directamente de la calidad de los servomotores y sensores.
- Precisión en la programación y control. El éxito del lanzamiento depende en gran medida de la precisión en la programación y el control de los movimientos del brazo robótico.
- Escalabilidad y aplicaciones prácticas. El proyecto se enfoca en un desafío específico y su aplicabilidad a otros contextos puede estar limitada.

Marco teórico y revisión de literatura

La física del desafío de la botella.

Al visualizar la rotación de una botella en el aire podemos asociarla con algunas situaciones como: un clavadista olímpico ejecutando un salto de competencia, un paracaidista dejándose caer desde un avión en movimiento o algo tan cotidiano como la caída de un pan tostado desde nuestra mesa. Algo en común tienen estos acontecimientos, y es que podemos observar una rotación, ¿pero observamos la misma rotación?

El pan al caer no es capaz de variar su forma geométrica, en cambio el clavadista y paracaidista si son capaces de variar su posición anatómica al momento del descenso. El agua en el interior de la botella tiene una distribución durante la rotación. Por lo tanto, como las otras situaciones, la rotación de una botella ofrece una ilustración original y muy perspicaz de los principios fundamentales de la mecánica rotacional (P. J. Dekker, 2018).

Momento angular

El momento angular L es una cantidad física que describe la cantidad de rotación que una partícula tiene en relación con un punto de referencia O . Se puede definir como el producto cruz entre el vector posición \vec{r} (que es la distancia radial desde el punto O hasta la partícula) y el momento de lineal \vec{p} (donde $\vec{p} = m\vec{v}$, siendo m la masa de la partícula y \vec{v} su velocidad en relación con algún marco inercial I) (Knudsen & Hjorth, 2000)

$$L \equiv \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad (1)$$

Al realizar la derivada de la ecuación (1) con respecto al tiempo y asumiendo que la partícula es acelerada por una fuerza \vec{F} , la ecuación de movimiento para L queda como:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{p}) = \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} \Leftrightarrow \frac{dL}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2)$$

Al producto cruz de \vec{r} y \vec{F} se denomina el torque $\vec{\tau}$ de una partícula con respecto a un punto O , por lo tanto:

$$\frac{dL}{dt} = \vec{T} \quad (3)$$

De la ecuación (3) se obtiene el primer teorema del momento angular: “La tasa de cambio del momento angular de una partícula alrededor de algún punto O es igual al torque sobre la partícula, con respecto a O ” (Knudsen & Hjorth, 2000).

Además, de la misma ecuación se obtiene el teorema de la conservación del momento angular: “Si no actúa ningún torque sobre la partícula, el momento angular con respecto a O es constante en el tiempo” (Knudsen & Hjorth, 2000).

Momento angular alrededor de un eje

Si consideramos un sistema de partículas interactuando, con una masa definida y con un momento angular con respecto a un origen dado, puede considerarse como un objeto extendido. Para simplificar, se consideran rotaciones alrededor de un eje que está fijo, se obtiene que el momento angular será L . Además, Murdock, (2018) establece que la velocidad angular ω de un objeto y su momento de inercia I con respecto al eje dado es:

$$L = I\omega \quad (4)$$

Conservación del momento angular

Para un sistema en el cual no hay torque externo neto, el momento angular total se mantiene constante: $L_i = L_f$. Este principio es conocido como la conservación del momento angular (Murdock, 2018).

La conservación del momento angular entre la botella y el movimiento del agua se produce debido a que el sistema combinado de la botella y el agua sólo está actuando bajo la fuerza de la gravedad, por lo tanto, no experimenta un torque resultante alrededor del centro de masa. Como resultado, el momento angular L alrededor del centro de masa debe conservarse (P. J. Dekker, 2018).

El momento de inercia de un cuerpo rígido es constante, por lo que su velocidad angular ω debe permanecer constante (Tipler & Mosca, 2007). Sin embargo, la movilidad del agua provoca una redistribución de la masa dentro de la botella durante el movimiento (figura 1), esto implica que el momento de inercia I ya no es constante.

Según la ecuación (4), cualquier variación en I tiene un efecto inversamente proporcional en ω . En el caso que la masa del agua se distribuye, el momento de inercia total I alrededor del centro de masa aumentará, lo que lleva a una disminución de ω para que se cumpla la conservación del momento angular (Murdock, 2018).

En el contexto del desafío de la botella, este principio físico se manifiesta de manera particular. Mientras que el centro de masa de la botella se mantiene relativamente constante debido a su forma rígida, la dinámica interna del agua añade complejidad al sistema. Este movimiento del agua altera el momento de inercia, por lo tanto, la velocidad angular de la botella durante su vuelo (P. J. Dekker, 2018). Este fenómeno subraya la importancia de entender como las leyes físicas se aplican en condiciones específicas y cambiantes, como las que representan el desafío de la botella.

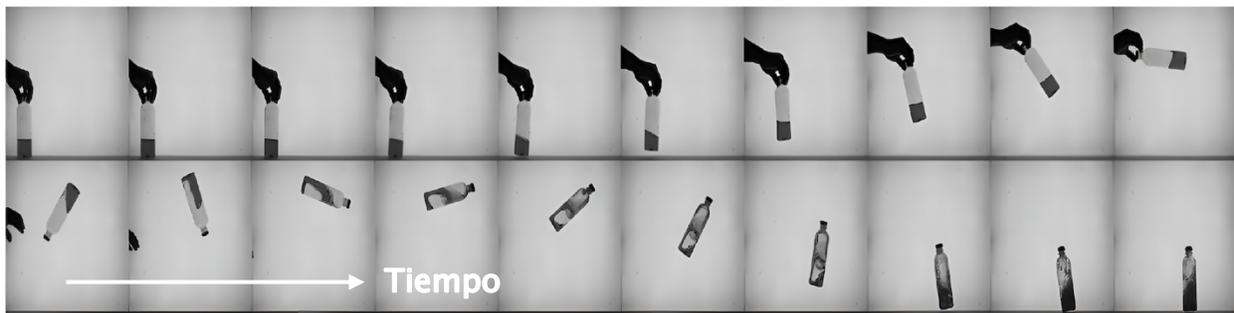


Figura 1. Secuencia fotográfica del lanzamiento de una botella con agua y la distribución de la masa de agua en el interior. Elaboración propia.

Centro de masa

En un sistema de partículas, está presente un punto que representa el promedio ponderado de todas las posiciones de todas las partículas (Tipler & Mosca, 2007).

Determinar el centro de masa de la botella es relativamente simple debido a que esta no cambia su forma geométrica. Sin embargo, calcular el centro de masa del agua es complicado debido a la distribución del agua que se genera durante el lanzamiento. No obstante, Dekker P. J. (2018) propone un modelo simplificado unidimensional que permite una descripción aproximada manejable del lanzamiento de la botella. El cual consiste en suponer que la masa del agua siempre se distribuye uniformemente a lo largo de la botella, comenzando desde el fondo y llegando hasta una altura, esta irá variando con el tiempo.

Se establece un valor mínimo de altura como h , que corresponde a la situación previa al lanzamiento, donde toda la masa de agua se encuentra en la parte inferior de la botella. El valor máximo posible de h está dado por una altura de la botella H (figura 2).

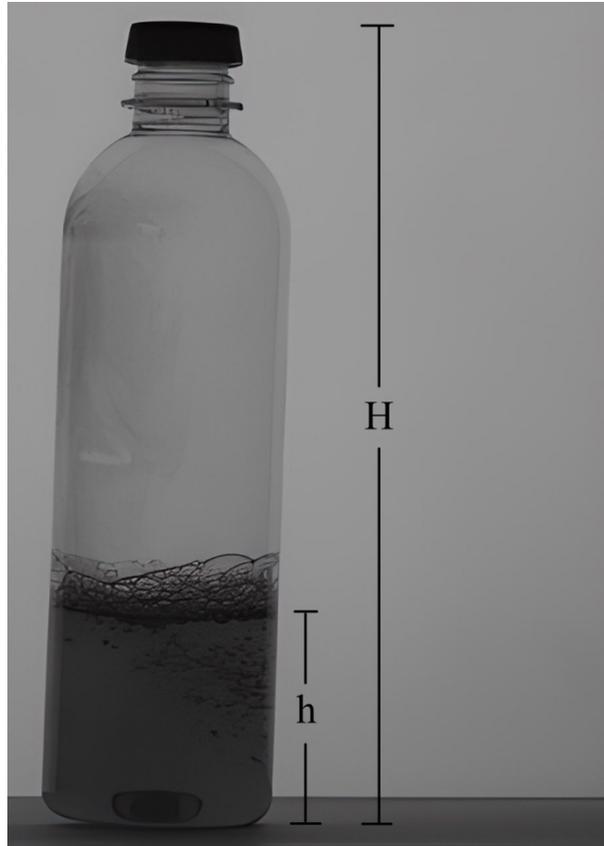


Figura 2. Modelo de botella utilizada en el experimento. Donde H representa su altura máxima y h es la altura que alcanza el fluido al interior de la botella. Elaboración propia.

Por lo tanto, la posición del centro de masa es:

$$h_{CM} = \frac{H}{2} \left(\frac{m_b + m_w \frac{h}{H}}{m_b + m_w} \right) \quad (5)$$

Donde, m_b es la masa de la botella y m_w es la masa del agua contenida.

Momento de inercia

Es una medida de la resistencia de un objeto a cambiar su velocidad angular alrededor de un eje. Depende tanto de la distribución de la masa del objeto como de la ubicación del eje de

rotación. Se puede calcular al sumar las contribuciones de todas las partículas individuales en el sistema (Hibbeler, 2016).

En la ecuación (5) propuesta por Dekker P. J. (2018), tenemos la posición del centro de masa, por lo tanto, para determinar el momento de inercia I con respecto a h_{CM} , es necesario conocer por separado los momentos de inercia de la botella I_b y del agua I_w . Además, se considera $I_0 = \frac{1}{12}m_bH^2$ y $M \approx m_w$. De esta forma el momento de inercia total equivaldría a la suma I_b con I_w .

Utilizando el teorema del eje paralelo, se obtiene (P. J. Dekker, 2018):

$$I_b = I_0 + m_b \left(\frac{H}{2} - h_{CM} \right)^2 \quad (6)$$

$$I_w = \frac{1}{12}m_w h^2 + M \left(\frac{h}{2} - h_{CM} \right)^2 \quad (7)$$

Por lo tanto, el momento de inercia total queda como:

$$I = I_b + I_w = \frac{1}{12}(m_bH^2 + m_w h^2) + m_b \left(\frac{H}{2} - h_{CM} \right)^2 + m_w \left(\frac{h}{2} - h_{CM} \right)^2 \quad (8)$$

Fuerza Centrífuga

Es un tipo de fuerza ficticia que actúa cuando se describe un movimiento desde un sistema de referencia en rotación, esta fuerza siempre está dirigida hacia afuera de la curvatura, también es la que tiende a distanciar a la partícula del eje de rotación (Hibbeler, 2016).

Para cuantificar la fuerza centrífuga F_c tenemos la siguiente ecuación:

$$F_c = mr\omega^2 \quad (9)$$

Donde, m es la masa de la partícula, ω es la velocidad angular y r es la magnitud del radio de curvatura.

Conceptos básicos de la robótica

Desde una perspectiva de ingeniería, un brazo robótico consta de una base estable que ancla una estructura segmentada que forman al cuerpo del robot (Manolescu & Secco, 2022). Las

conexiones entre los segmentos se llaman articulaciones y determinan individualmente un eje de movimiento, también conocido como el grado de libertad (Aronsson, 2021).

El último enlace del brazo robótico es el efector final, es un dispositivo especialmente diseñado para interactuar con el entorno. Este puede tener muchas formas y tamaños, como una pinza, cabeza de succión, imanes, agarre de manipulación suave, una herramienta de perforación o corte, un módulo de cámara, entre otras opciones (Manolescu & Secco, 2022).

La mayoría de las articulaciones se construyen utilizando actuadores que son capaces de iniciar movimientos dependiendo de su retroalimentación de señal de control (Oridate, 2016). En conjunto con el movimiento lineal o rotacional de un actuador, las articulaciones pueden clasificarse principalmente como prismáticas o deslizantes, rotatorias, esféricas o de rótula y helicoidales (figura 3) (Aronsson, 2021).

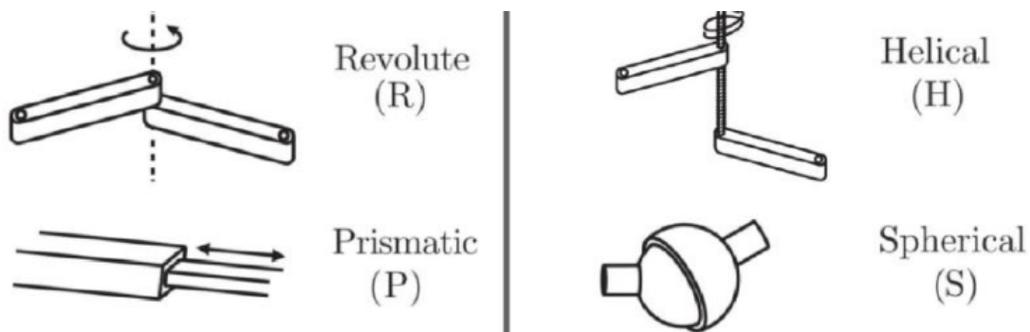


Figura 3. Tipos de articulaciones robóticas (Manolescu & Secco, 2022).

Los grados de libertad de un cuerpo se determinan por la cantidad de variables independientes necesarias para determinar la posición del cuerpo (Aronsson, 2021). Un ejemplo de esto es un cuerpo libre en el espacio tridimensional tiene 6 grados de libertad, que consisten en 3 rotaciones y 3 traslaciones (figura 4). Para calcular los grados de libertad de un mecanismo o construcción, se aplica el criterio de Kutzbach-Grubler (ecuación 10) (Aronsson, 2021). Coordinar todo el movimiento de un brazo robótico mientras se determina su posición, orientación y velocidad es una tarea fundamental en la robótica (Manolescu & Secco, 2022).

$$G = 3(N - 1) - 2(3 - f)m_f \quad (10)$$

Donde, G son los grados de libertad, N es el número de eslabones (incluyendo base), f son los grados de libertad en las articulaciones y m_f es el número de articulaciones con f grados de libertad.

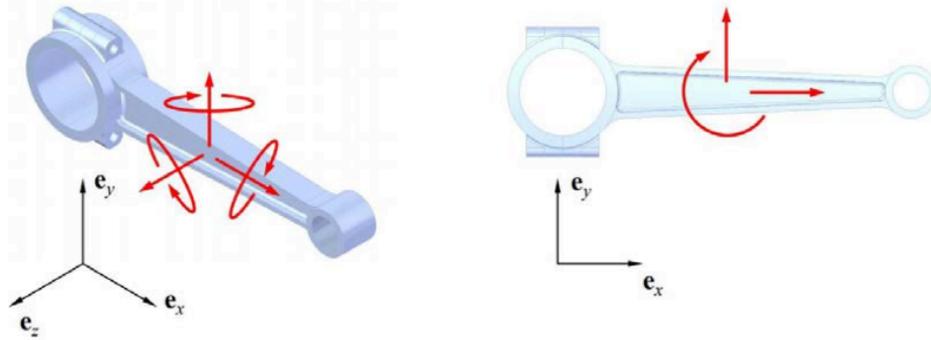


Figura 4. Cuerpo libre en el espacio 3D y 2D. (Aronsson, 2021).

Brazo robótico antropomórfico

Es un dispositivo robótico articulado que consta de varios segmentos conectados por articulaciones que imitan la estructura de un brazo humano. Estos son capaces de realizar movimientos tridimensionales precisos y coordinados. Se utilizan en diversas aplicaciones, como la manufactura industrial, la cirugía asistida por robot, la automatización de tareas y la investigación científica (Siciliano et al., 2009). Este tipo de brazo robótico destaca por su parecido y rendimiento comparable con el brazo humano (Staretu, 2021).

Está compuesto por los siguientes elementos:

- Enlaces y articulaciones: Se considera como un cuerpo rígido que define la relación entre dos ejes articulares vecinos de un manipulador. Los manipuladores consisten en enlaces rígidos, los cuales están conectados por articulaciones que permiten el movimiento relativo de los enlaces vecinos. Los enlaces se mueven para posicionar el efector final (Aronsson, 2021).
- Actuadores: Estos desempeñan un papel similar que los músculos en el brazo humano, siendo capaces de convertir la energía almacenada en movimiento. Los

actuadores impulsados por motores eléctricos proporcionan movimientos suaves y controlados de gran precisión (Ibáñez, 2018).

- **Controlador:** Es el dispositivo principal que procesa la información y lleva a cabo instrucciones en un robot, como controlar los movimientos ejecutados, controlar los sensores integrados en el brazo robótico, recopilar información, entre otras acciones (Aronsson, 2021).
- **Eector final:** Es el mecanismo en el extremo del brazo robótico, diseñado para interactuar con el entorno. El diseño y tipo de material del efector dependerán del tipo de aplicación para la cual se haya diseñado el robot (Ferran, 2020).
- **Sensores:** Son dispositivos físicos que permiten al brazo robótico recibir una retroalimentación sobre su entorno. El sensor recopila información y la envía electrónicamente al controlador del brazo robótico (Oridate, 2016).

Cinemática

Es la rama de la mecánica que describe el movimiento de un cuerpo sin tener en cuenta la reacción o el efecto del movimiento. Es la principal opción matemática capaz de describir con precisión la relación entre las coordenadas de las articulaciones, el efector final y su disposición final (Aronsson, 2021).

Hay dos formas de utilizar la cinemática en el contexto de un brazo robótico:

- **Cinemática directa:** Utiliza las ecuaciones cinemáticas para calcular la posición, orientación y velocidad del efector final, conociendo los ángulos de las articulaciones. El resultado de la cinemática directa es una única cadena de solución posible, vinculada a toda la estructura del brazo robótico, sin importar su movimiento (Manolescu & Secco, 2022).
- **Cinemática inversa:** Utiliza las ecuaciones cinemáticas para calcular una configuración de la posición o ángulo de las articulaciones que es necesaria para colocar al efector final en una ubicación y orientación dada o deseada (Manolescu & Secco, 2022).

Electrónica

El movimiento de las articulaciones robóticas se puede lograr mediante la implementación de distintos componentes: hidráulicos, neumáticos y electromecánicos. Sin embargo, los componentes hidráulicos requieren piezas de grandes dimensiones y los componentes neumáticos carecen de control de posición y precisión. Por lo tanto, los actuadores eléctricos son más fáciles de implementar para el desarrollo de un brazo robótico (Wallén & Määttä, 2020).

El uso de servomotores requiere la implementación de un controlador el cual permitirá la comunicación y manipulación del actuador. De modo que el brazo robótico estará compuesto por dos principales componentes eléctricos encargados de realizar el desafío de la botella.

Microcontrolador

Arduino es un microcontrolador de código abierto que se puede programar, borrar y volver a programar en cualquier momento. Cuenta con 32 bits, con un microprocesador de 48 MHz y una memoria flash de 256 kB. Tiene un voltaje de alimentación de 5 V y además puede trabajar con voltajes de entrada de 6–24 V por medio de VIN (Voltaje de entrada) (Arduino, 2023).

Utiliza un hardware conocido como la placa de desarrollo de Arduino y un software para desarrollar el código, denominado el entorno de desarrollo integrado de Arduino (IDE). Esta plataforma integrada simplifica la ejecución en computadoras personales y permite a los usuarios programar en Arduino utilizando el lenguaje de programación C (Louis, 2018).

C provee un control aceptable y acceso a funciones de bajo nivel que, generalmente, contiene controladores necesarios para acceder a características específicas de recursos de hardware. Un sistema embebido, regularmente, contiene un microcontrolador para procesar entradas y salidas, generando un enlace o interfaz entre entradas y salidas de sistemas mediante un algoritmo codificado y almacenado en la memoria del sistema (Castillo–Martínez et al., 2018).

Servomotor

Son los actuadores más comunes en robótica básica. Este consiste en un motor de corriente directa, controlado por un sistema embebido interno, el cual transfiere la energía mecánica mediante una serie de engranes hasta un eje externo (Castillo–Martínez et al., 2018).

Permite un control preciso de movimiento a través de impulsos eléctricos. Este utiliza retroalimentación para controlar un motor de corriente directa utilizando modulación por ancho de banda (PWM por sus siglas en ingles). La retroalimentación ajusta la salida midiendo la diferencia entre la posición deseada y final para lograr una alta precisión (Aronsson, 2021). El circuito de control envía la señal de PWM y se controla el servomotor mediante Arduino. El funcionamiento de los servomotores de 180° es simple, se procesa un tren de pulsos de un periodo establecido, en el que la relación entre el tiempo en alto y en bajo de la señal se utiliza para posicionarlo en los diferentes ángulos (figura 5).

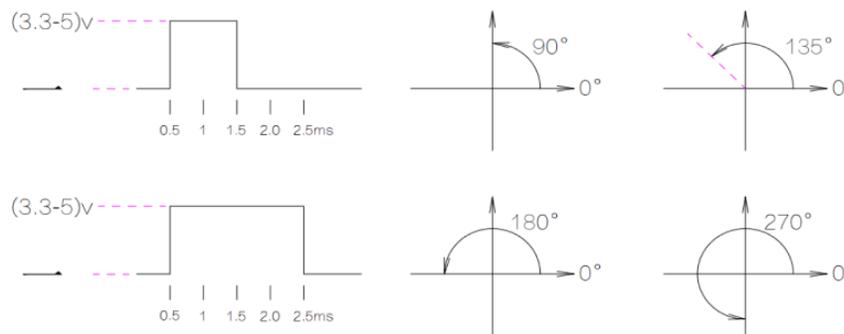


Figura 5. Señal PWM en servomotor. Anexo 1.1

Sensor de proximidad inductivo

Sirven para detectar la presencia o ausencia de objetos metálicos. Cuando se detecta un objeto metálico su salida eléctrica cambia de estado (ON/OFF), de forma similar a un interruptor. Cuando un objeto metálico entra en contacto con el campo electromagnético del sensor, una pequeña corriente es inducida en el objeto lo que ocasiona que el circuito oscilador pierda energía, este cambio es detectado por un circuito comparador, el cual finalmente emite una señal de activación/desactivación a la salida en el sensor (Naylamp Mechatronics SAC, 2019).

Cámara Phantom VEO 410S

Es un tipo de cámara de alta velocidad que permite la adquisición de imágenes con un máximo de 10.860 cuadros por segundo (Vision, 2023). La gran tasa de adquisición permite detectar detalles que a simple vista no pueden ser notados.

Matlab

Es un sistema algebraico computacional compuesto por un entorno de desarrollo integrado que emplea un lenguaje propio de alto nivel. Su elemento básico de operación es la matriz, lo que permite resolver problemas que involucran este tipo de variables de forma más rápida que empleando un lenguaje de programación centrado en variables escalares como C (Pérez, 2019).

Se compone por funciones específicas denominadas Toolbox, aumentando el entorno de trabajo y dando mayores posibilidades de resolución de problemáticas. Particularmente, Image Processing Toolbox proporciona una amplia gama de algoritmos estándar de referencia y apps de flujo para procesar, visualizar y analizar imágenes, y desarrollar algoritmos.

Entre las diversas funciones de Image Processing Toolbox se encuentra regionprops. Esta función mide propiedades como el área, los centroides geométricos y el cuadro delimitador de cada uno de los objetos de una imagen.

Autodesk Fusion 360

Es un software de diseño, ingeniería, electrónica y fabricación, todo en uno. Conecta todo el proceso de desarrollo de productos en un único software basado en la nube con CAD 3D (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), y PCB (Printed Circuit Board) integrados (Brown & Briggs, 2019). Una aplicación que ofrece Fusion 360 es el análisis de elementos finitos (FEA), este es un método computarizado para predecir cómo reacciona un producto a las fuerzas del mundo real, la vibración, el calor, el flujo y otros efectos físicos. Este análisis muestra si un producto se romperá, se desgastará o funcionará de la manera en que fue diseñado. El software determina el factor de seguridad por medio de la teoría de la energía de la distorsión de Von Mises. Este puede ser pensado como un valor único de esfuerzo (esfuerzo efectivo) para el estado general de esfuerzo dentro de un elemento. La teoría de la energía de distorsión compara el esfuerzo de Von Mises con la resistencia a la fluencia (Ortiz, 2010).

$$\sigma' \geq S_y \quad (11)$$

Introduciendo un factor de seguridad F_s se tiene:

$$\sigma' = \frac{S_y}{F_s} \Leftrightarrow F_s = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (12)$$

Cuanto mayor sea el número de F_s , más seguro será el producto o la estructura. Cuando se tiene que $F_s = 1$, esto indica que la estructura o componente fallará inmediatamente cuando se alcance la carga de diseño y no será capaz de soportar ninguna carga adicional (SafetyCulture, 2023).

El factor de seguridad establecido para cada equipo o material tiene ciertos aspectos de recomendaciones generales y en algunos casos deben apegarse a normas establecidas. Para el caso del brazo robótico, si bien no implicara un peligro para el usuario durante los lanzamientos, si tendrá ciertas variables que pueden influenciar en el funcionamiento óptimo del brazo robótico. La vibración generada por los servomotores es un tipo de variable que no se puede controlar y eliminar en su totalidad.

Otra variable por considerar es la posibilidad que la botella impacte contra el brazo robótico durante el lanzamiento de esta. Por lo tanto, en base a los eventos que pueden afectar el correcto funcionamiento del brazo robótico, es que se considera un factor de seguridad $F_s = 4$. Este valor se considera base a las recomendaciones generales de SafetyCulture (2023) para la selección del factor de seguridad, las cuales establecen un $F_s \approx 3-4$ para el uso de materiales cuyas propiedades no son fiables y cuyas condiciones de carga y ambientales no son severas, o cuando se utilizan materiales fiables en condiciones difíciles y ambientales.

Marco metodológico

Estudio del lanzamiento de la botella

Dekker P. J. (2018) presenta un estudio sobre la física acerca de los diversos lanzamientos de una botella con agua centrándose en la capacidad de estas para aterrizar de pie. Se demuestra que la redistribución de la masa del agua durante el lanzamiento reduce la velocidad angular de la botella, lo que facilita un aterrizaje exitoso (caiga de pie la botella). Además, se discute la optimización de la cantidad de llenado de agua en la botella (fracción de llenado) para aumentar las posibilidades de que esta aterrice de pie. Se destaca que la física del agua es altamente compleja, razón por la cual se abordó el problema desde la mecánica clásica (P. J. Dekker, 2018).

El proceso comienza usando distintas fracciones de llenado en la botella, basándose en las recomendaciones de Dekker P. J. (2018). Se realizan múltiples lanzamientos con cada fracción de llenado, y cada uno de estos es grabado en detalle. Para la generación de videos se tiene en montaje experimental muy simple (figura 6).

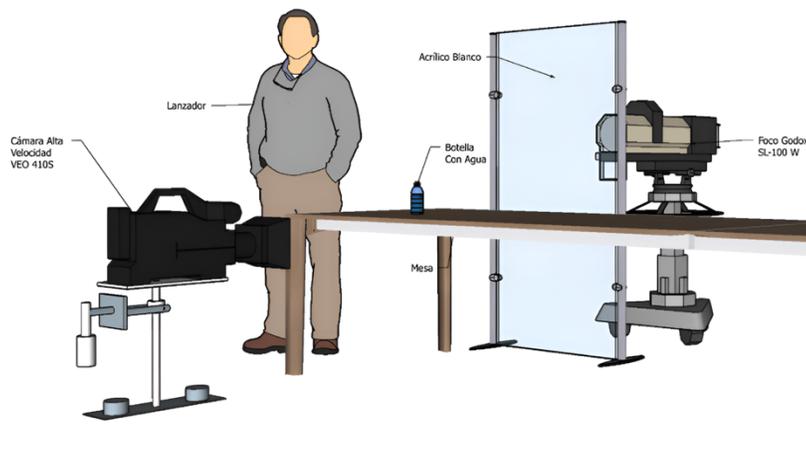


Figura 6. Montaje experimental del estudio del desafío de la botella. Elaboración propia.

Este consta de un lanzador inexperto, una botella clásica sin deformaciones (figura 2), con altura $H = 21.5$ cm, un diámetro $d_b = 6.2$ cm, una masa $m_b = 0.036$ kg (botella vacía) y con capacidad para almacenar 500 mL en su interior. Utilizando una cámara de alta velocidad, modelo VEO 410S, se graban una serie de lanzamientos. El entorno del experimento es un espacio

delimitado con un fondo de acrílico blanco de dimensiones 100x100 cm, el cual está iluminado por un foco de luz de 100 W Godox SL-100.

Las grabaciones se realizan con una frecuencia de adquisición de 400 cuadros por segundo, la distancia entre la cámara y el lanzador es de aproximadamente 2 metros. Cada serie consta de 40 grabaciones y cada video está compuesto por 400 a 500 imágenes guardadas en formato TIFF. Posteriormente se analizan las imágenes por medio del software Matlab para observar las diferencias en la dinámica de vuelo y el éxito del aterrizaje en función de la cantidad de agua en la botella.

Las secuencias analizadas fueron lanzamientos con distintas fracciones de llenado, en específico se tienen: 1/3 fracción de llenado (167 mL), 1/4 fracción de llenado (125 mL) y la tercera serie consta de simular 1/3 de fracción de llenado, pero usando una resina sólida en el fondo de la botella. Esta tercera serie es agregada para observar el comportamiento de un sólido, cuya distribución de masa no cambia dentro de la botella que menciona Dekker P. J. (2018), y es que la rotación de la botella rígida (un sólido en vez de agua) tiene una rotación muy diferente al resto de lanzamientos con botellas agua y con pelotas de tenis. Además, que la velocidad angular es perfectamente constante para la botella rígida en comparación con los otros dos casos. Obtenidas las grabaciones de las secuencias de interés, se procede al análisis de las imágenes por medio de Matlab.

Análisis de imágenes de las distintas series

Se emplea un código de Matlab (ver Anexo 4.2) para procesar las imágenes de diversas secuencias. Inicialmente, se accede al directorio de cada secuencia y se aplican ajustes iniciales a las imágenes (figura 7.a). La cámara VEO 410S se instala lateralmente para ampliar el campo visual en el eje vertical y capturar la trayectoria del lanzamiento de la botella.

Las imágenes se rotan 90 grados antihorarios y se ajustan al área de interés, descartando las regiones no relevantes. Estos pasos se aplican a todas las imágenes de cada serie, almacenando los resultados en una matriz con dimensiones constantes de largo y ancho, y la cantidad de imágenes por serie (figura 7.b).

Para determinar las propiedades de las regiones de la botella, se utiliza la función `regionprops`, requiriendo tanto la imagen original como su versión binarizada (figura 7.c). La Binarización se realiza considerando que los píxeles pertenecen a las categorías de objeto (blancos o 1) o fondo (negros o 0).

Finalmente, se determina el centro geométrico y la orientación de la botella con respecto a la horizontal mediante `regionprops` (figura 8.a). Con la orientación conocida para toda la secuencia, se mide el ángulo del centro geométrico de la botella respecto a la horizontal durante el lanzamiento. Dividiendo la cantidad de imágenes por la frecuencia de adquisición (400 cuadros por segundo), se obtiene la orientación en función del tiempo de la botella. Derivando esta orientación, utilizando la función “`gradient`” de Matlab, se calcula la velocidad angular durante el lanzamiento (figura 8.b).

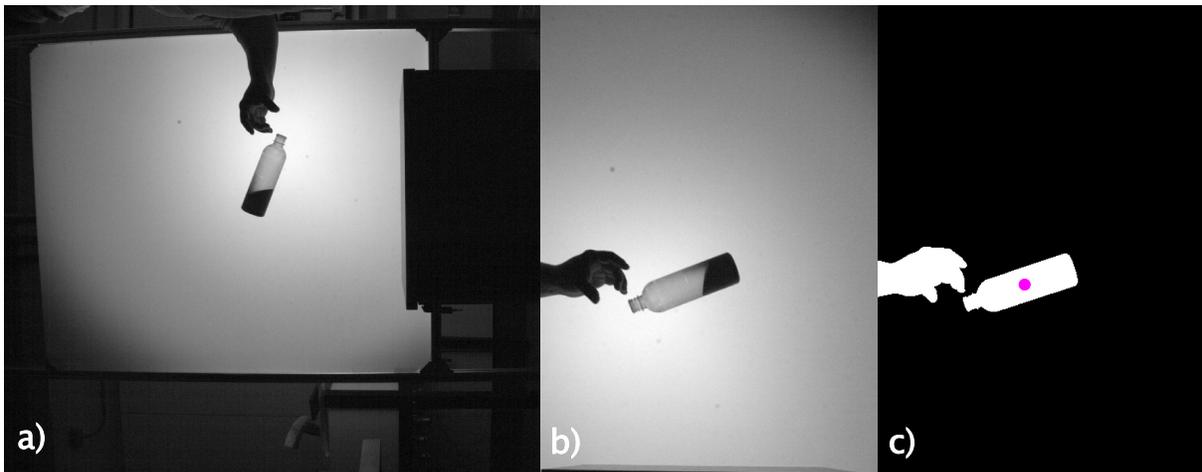


Figura 7. Tratamiento de imágenes con Matlab. a) Imagen en bruto del lanzamiento de una botella. b) Rotación de la imagen en bruto 90 grados en sentido antihorario y recorte de acuerdo con el área de interés. c) Binarización de la figura, píxeles blancos representan el valor “1” y los negros “0”. El centro geométrico de la botella se marca con un círculo color magenta. Elaboración propia.

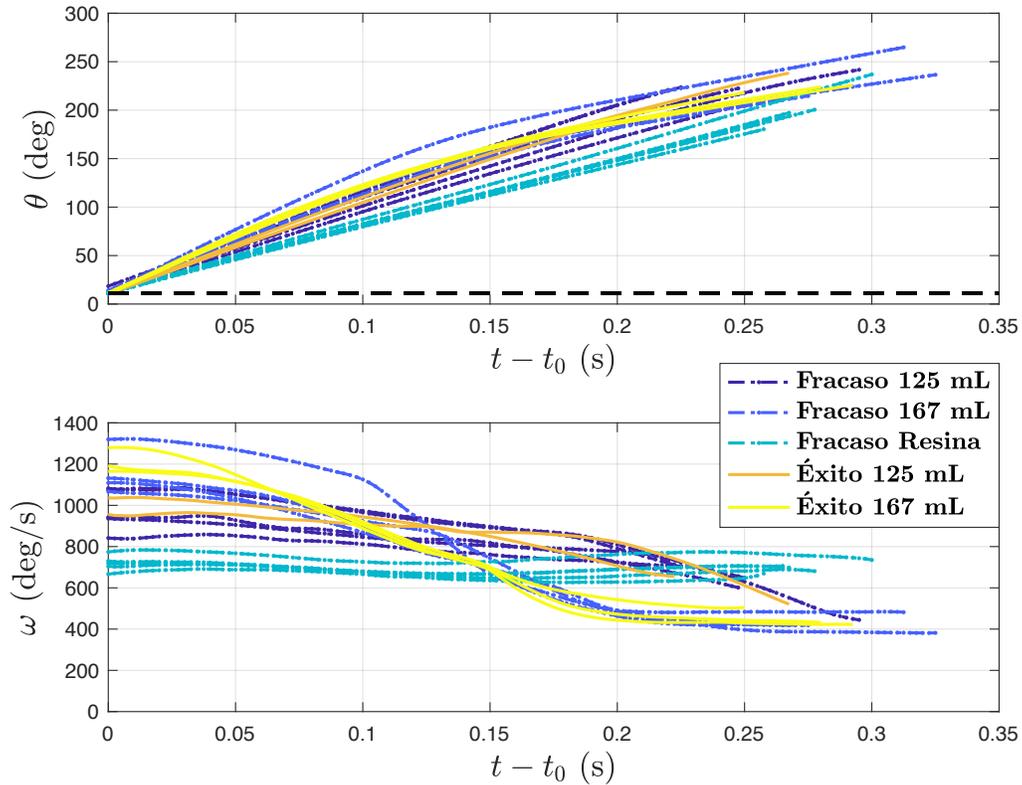


Figura 8. Resultados previamente obtenidos de los lanzamientos manuales (Éxito y Fracaso) con regionprops para las series de 167 mL, 125 mL y Resina, los cuales serán comparados con los resultados obtenidos con el brazo robótico. a) Orientación en grados del centro geométrico de la botella respecto a la horizontal impuesta por regionprops. b) Velocidad angular resultante de la orientación con el uso de la función "gradient". El detalle de la obtención y uso del tiempo $t - t_0$ (S) está disponible en la sección de resultados. Elaboración propia.

Análisis de los sistemas

El análisis de los componentes del brazo robótico implica descomponer los elementos que trabajan de manera conjunta (figura 9). Este proceso implica identificar, entender y evaluar cada componente por separado para obtener una comprensión de cómo contribuyen al rendimiento integral del sistema robótico.

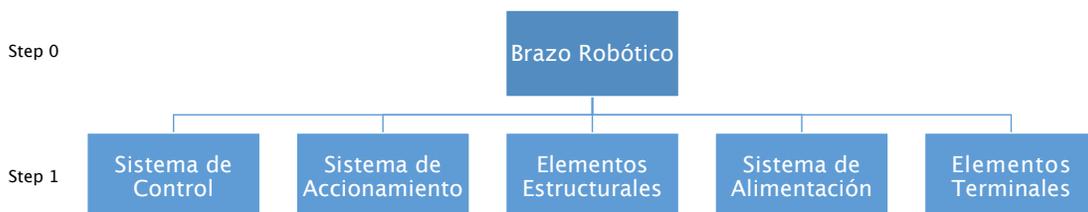


Figura 9. Subsistemas del brazo robótico. Elaboración propia.

Sistema de control: se encuentra a cargo de un controlador Arduino. Este dispositivo emite señales eléctricas precisas a los servomotores, dictando el movimiento correspondiente mediante un código de programación. La especificación del ángulo deseado para cada servomotor permite la transformación de la señal en movimiento.

Sistema de accionamiento: este recae en los servomotores de corriente continua, los cuales convierten las señales eléctricas en movimiento rotacional. Cada servomotor presenta variaciones en términos de carga y velocidad de accionamiento, adaptándose a funciones específicas del brazo robótico.

Elementos estructurales: los enlaces estructurales conectan cada servomotor, formando la base que sostiene y estabiliza el brazo robótico durante los lanzamientos. Este diseño busca prevenir movimientos no deseados y garantizar un sistema robusto.

Sistema de alimentación: la placa de desarrollo Arduino funciona con una alimentación de 5 V (Arduino, 2023). A pesar de su capacidad para alimentar componentes con voltajes similares o inferiores, algunos servomotores requieren voltajes superiores (ver Anexos 1). En consecuencia, se implemente una fuente de alimentación externa que cumple con los requisitos energéticos del sistema.

Elementos terminales: encargado de realizar acciones específicas, debe ser capaz de manipular y liberar la botella en el momento indicado por el código de programación. Esto implica soportar diferentes fracciones de llenado de agua. Además, debe ser capaz de sujetar firmemente la botella durante toda la etapa de lanzamiento.

Criterios de selección para los servomotores del brazo robótico

La primera consideración en la conformación del brazo robótico es determinar la cantidad de servomotores requeridos y asignarlos a las articulaciones correspondientes que participan del lanzamiento de una botella. La concepción del brazo robótico se basa en su carácter antropomórfico, con la capacidad específica de llevar a cabo el lanzamiento de una botella. Usando el brazo humano como modelo, se identifican las articulaciones clave presentes en este (figura 10).

Se observa que la ejecución exitosa del lanzamiento implica un papel preponderante de las articulaciones de la muñeca y los dedos (efectores finales). El codo, por otro lado, experimenta una leve flexión durante el lanzamiento, regresando posteriormente a su posición original. A partir del análisis detallado de la figura 10, se identifican tres articulaciones cruciales que serán representadas por los servomotores. Estas son el servomotor del codo, el servomotor de la muñeca y el servomotor del efector.

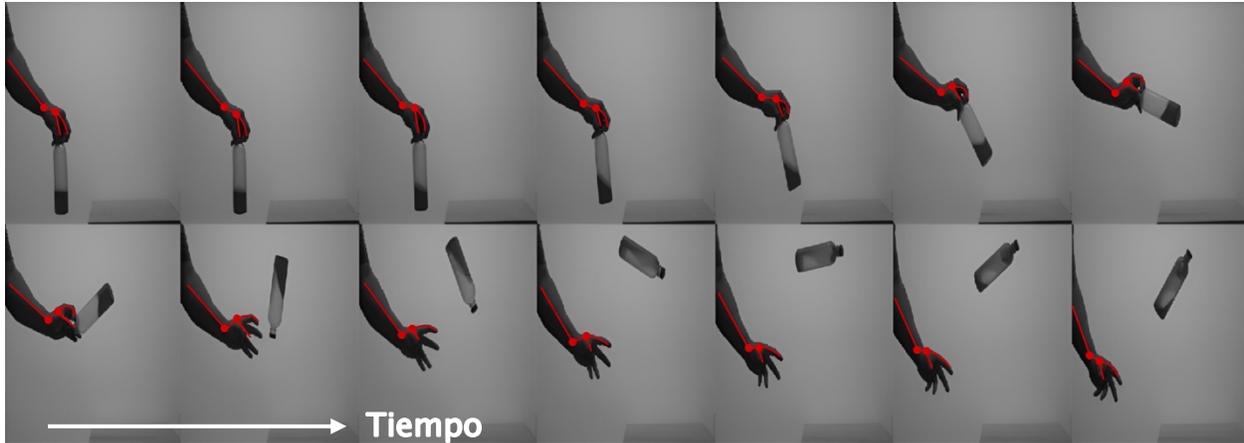


Figura 10. Secuencia del movimiento de un brazo humano durante el lanzamiento de una botella. Elaboración propia.

Diseño del brazo robótico en Autodesk Fusion 360

Las piezas del brazo robótico se diseñan en base a los servomotores seleccionados (ver anexo 1), además este diseño al ser antropomórfico debe simular la anatomía del brazo humano. Por lo tanto, las piezas del diseño consideran el antebrazo (enlace entre el servomotor del codo y el de la muñeca), torso (enlace entre el servomotor de la muñeca y del efector) y efector final (representación de los dedos de la mano humana).

Selección del material

Las propiedades del material a seleccionar deben contar con las siguientes características: resistencia mecánica, ser ligero, disponibilidad y facilidad de corte y trabajo (Oridate, 2016). El material que cuenta con dichas cualidades es PLA para impresión 3D (ver anexo 2). Agregando a las características mencionadas por Oridate (2016), trabajar con PLA permite imprimir un nuevo elemento en caso de modificaciones en el periodo de pruebas del brazo robótico, por lo tanto, es el material seleccionado para desarrollar físicamente el brazo robótico.

Análisis de elementos finitos

Los elementos diseñados en Autodesk Fusion 360 fueron sometidos a la carga máxima posible generada por la botella. Este caso considera que la botella está completamente llena de agua (masa = 0.55 kg), esto genera la mayor carga externa a la cual puede estar sometido el brazo robótico. Además, es necesario considerar la fuerza centrífuga (ecuación 9) que se genera producto del lanzamiento de la botella.

La velocidad angular ω corresponde al servomotor de la muñeca y se considera según el fabricante (ver anexo 1.2) que esta tiene un valor de $\omega_{max} = 631.58 \text{ deg/seg}$. Según los resultados de la figura 11.b) la velocidad angular generada por el servomotor está por debajo del mínimo observado en los datos analizados, no se considera una diferencia significativa para el estudio. La ω_{max} será alcanzada justo en el instante previo a que el brazo robótico suelte la botella y según las secuencias de imágenes analizadas de las series de videos, el lanzamiento comienza con un ángulo $\Phi_i = 90^\circ$ (figura 11.a) y la botella se suelta aproximadamente en un ángulo $\Phi_f = 180^\circ$ respecto a la horizontal (figura 11.b). Los ángulos Φ_i y Φ_f se consideran respecto a la base de la mesa (horizontal), con un sentido de rotación antihorario a partir del semieje negativo x. Por lo tanto, cuando se alcanza el ángulo Φ_f la velocidad angular será ω_{max} .

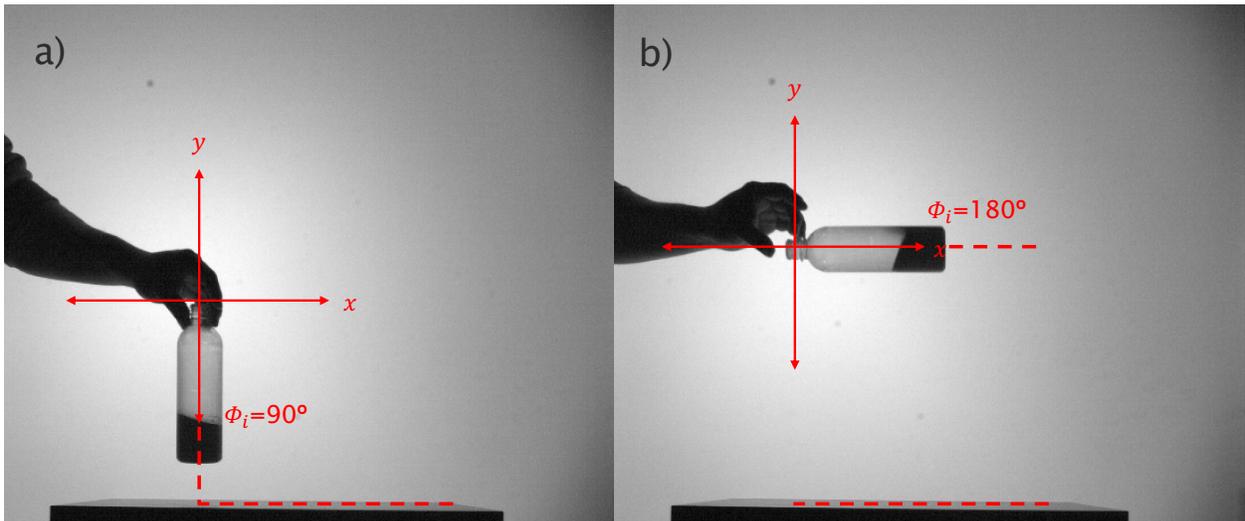


Figura 11. Inclinationes respecto a la horizontal (mesa) durante el lanzamiento del brazo humano. a) Φ_i ángulo inicial del lanzamiento de la botella. b) Φ_f ángulo final del lanzamiento de la botella. Elaboración propia.

Identificadas las fuerzas externas se realiza el análisis de elementos finitos. Se realiza el cálculo manual de las reacciones generadas por los esfuerzos producidos por la botella. Se determinan las reacciones finales presentes en la base del brazo robótico y estos datos serán utilizados para calcular el factor de seguridad de cada elemento del brazo robótico por medio del software Fusion 360 (ver anexo 3.2).

Modelado del brazo robótico e impresión de piezas finales

Obtenidos los factores de seguridad y las deformaciones de los elementos se ensamblan las piezas resultantes en el software Fusion 360, obteniendo el diseño definitivo del brazo robótico (figura 12). A continuación, todas las piezas son impresas usando como material base PLA. Para el proceso de impresión se usó la impresora Artillery Sidewinder X2 disponible en la Fábrica Digital O'Higgins.

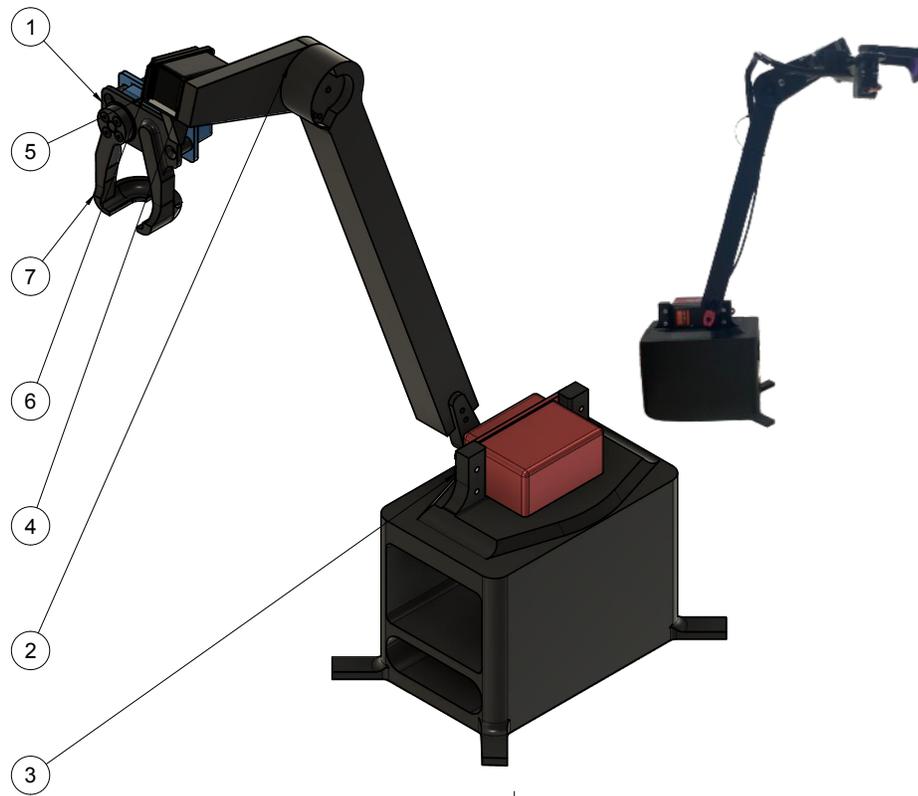


Figura 12. Diseño y ensamblaje de piezas del brazo robótico. (1) Pinza fija del efector final. (2) Antebrazo. (3) Servomotor del codo y base del brazo robótico. (4) Dorso del brazo (5) Servomotor de la muñeca. (6) Servomotor del efector. (7) Pinza móvil del efector. Se incluye figura del prototipo final ensamblado. Elaboración propia.

Montaje del circuito electrónico

Finalizado el ensamblaje se procede a realizar las conexiones de los elementos que componen el brazo robótico (figura 13). Estos son: la placa de Arduino, los 3 servomotores, el sensor de proximidad inductivo, la fuente de alimentación y el protoboard, esta última servirá para distribuir de forma organizada y clara todas las conexiones. El esquema de conexiones es el siguiente:

- La placa Arduino conectará su cable positivo y su negativo al protoboard.
- La fuente de alimentación estará conectada al protoboard obteniendo un positivo y un negativo.
- El cable positivo de los servomotores estará conectado a la línea positiva y el cable negativo a línea negativa del protoboard. Su cable de control estará conectado a su correspondiente pin de entrada en la placa Arduino.
- El cable positivo del sensor de proximidad estará conectado a la línea positiva de Arduino en el protoboard y su cable negativo a la línea negativa.

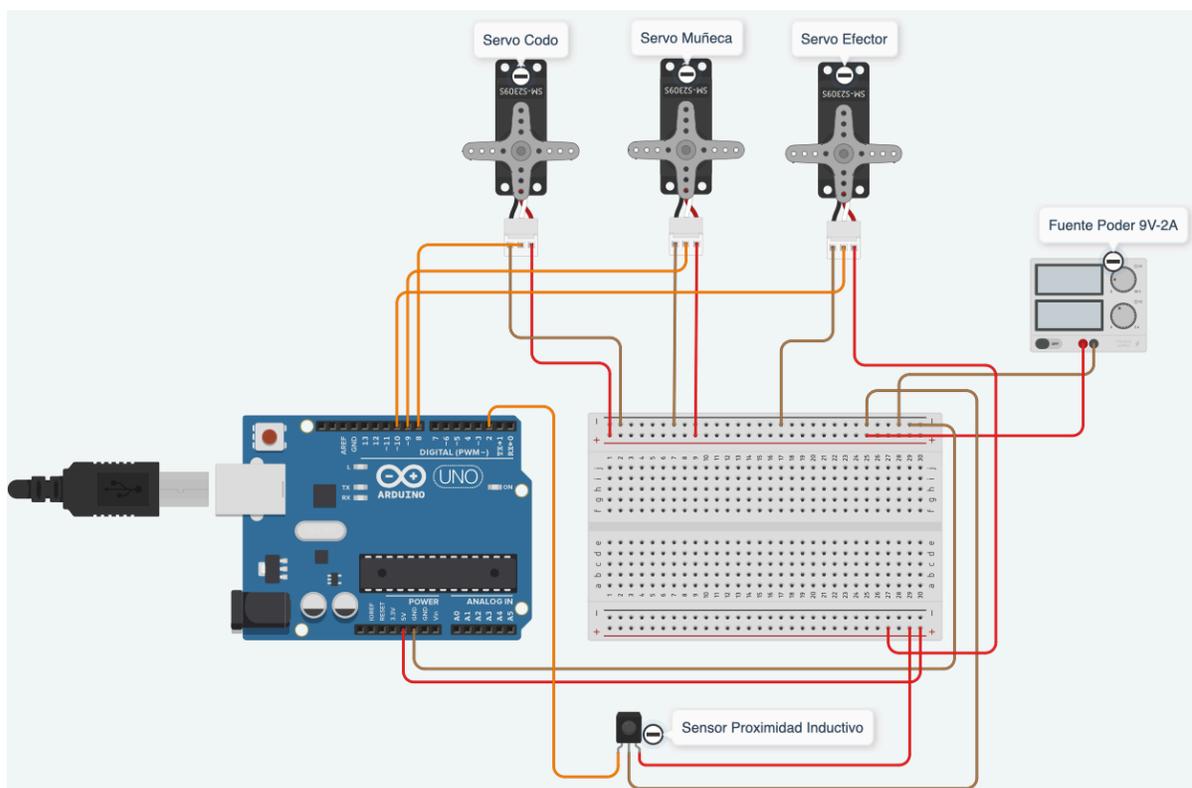


Figura 13. Montaje circuito elementos brazo robótico. Entorno simulación TinkerCAD.

Programación del brazo robótico

Al generar un código en la aplicación de Arduino, la placa actuará de microcontrolador procesando los datos que le llegan del usuario a través del puerto serie y enviando señales correspondientes a los diferentes servomotores (Ferran, 2020).

El código de programación está enfocado en el objetivo principal del brazo robótico y es que pueda lanzar la botella. Se busca replicar las condiciones de un lanzamiento realizado por un brazo humano (figura 10). Por lo tanto, se describe el lanzamiento de una botella en los siguientes pasos:

- Primero: se sostiene la botella por su gollete, la botella se mantiene perpendicular con respecto a la mesa (figura 11.a), se eleva la botella de la superficie de la mesa aproximadamente 10 cm y es importante que la masa de agua se mantenga en equilibrio para no generar movimientos internos que afecten el lanzamiento.
- Segundo: se impulsa la botella pasando de $\Phi_i = 90^\circ$ a $\Phi_f = 180^\circ$. Se le denomina etapa de lanzamiento controlado. Este paso es fundamental para el estudio y se centra en replicarlo de manera precisa. Es clave para entender y analizar mejor el movimiento y la dinámica del lanzamiento de la botella.
- Tercero: cuando $\Phi_f \geq 180^\circ$ es el instante que la botella es soltada y comienza la etapa de lanzamiento libre, donde no hay fuerzas externas que afecten la rotación de la botella, pero la distribución de la masa de agua genera la disminución de velocidad angular ω de la botella (P. J. Dekker, 2018).

Se comienza calibrando los servomotores y se corrobora el rango de movilidad descrito por el fabricante. Estos tendrán ángulos de trabajo distintos, por lo tanto, es importante identificar su posición inicial (ángulo inicial $\theta=0^\circ$). La calibración es vital previo al montaje final para evitar que las piezas se dañen producto de errores en la indicación de ángulos. A continuación, se identifican el rango de trabajo de los servomotores.

El código final (ver Anexo 4.1) tiene como objetivo controlar los tres servomotores y captar la señal del sensor de proximidad inductivo para enviar una señal eléctrica al servomotor del efector final. Finalmente, se puede resumir en un flujograma de trabajo (ver Anexo 4.1). Donde

se inicia el con el brazo robótico en posición para que se le entregue la botella, este la sujete, finaliza cuando lanza la botella y vuelve a la posición inicial.

Pruebas y grabaciones

Ya armado el brazo robótico y con el código de programación funcional, es necesario realizar pruebas de lanzamientos para ajustar los ángulos en los cuales los servomotores cumplen con el objetivo de lanzar la botella. Los ángulos críticos por determinar son el ángulo Φ_i y el Φ_f del servomotor de la muñeca. El ángulo Φ_i es el inicio de nuestro lanzamiento y el ángulo Φ_f es el fin del lanzamiento y además es el ángulo que detecta el sensor de proximidad, el cual está instalado en la pinza fija y se activa en el momento preciso en que el servomotor alcanza el ángulo final Φ_f .

Las pruebas del brazo robótico se iniciarán con series de 40 lanzamientos, utilizando distintas fracciones de llenado: 110 mL, 130 mL, 150 mL, 170mL y la botella con resina que simula una fracción de llenado de 167 mL. Estas pruebas tienen dos objetivos principales. El primer objetivo es verificar si los servomotores tienen la capacidad de soportar las distintas cargas aplicadas sin que estos fallen. El segundo objetivo es analizar el grado de repetibilidad de los lanzamientos del brazo robótico. Esto se analizará por medio del código Matlab y utilizando la función `regionprops` (ver Anexo 4.2 y 4.3), se estudiará el desplazamiento del centro geométrico de la botella y se comparará con el desplazamiento generado por los lanzamientos del brazo humano (ver Anexo 4.4).

Para continuar con las comparaciones entre los lanzamientos de la botella entre el brazo robótico y el brazo humano, se realizan la misma cantidad de grabaciones usando fracciones de llenado de: 167 mL, 125 mL y resina. Donde cada serie contara con 40 grabaciones ($n=40$) y serán analizados con el código de Matlab utilizado para el análisis del brazo humano. Se calculará el promedio de cada fracción de llenado y se obtendrán valores representativos de cada serie. Finalmente, se comparan los gráficos de orientación y velocidad (figura 8.a y 8.b) angular entre el brazo humano y el brazo robótico (figura 17).

Resultados

Selección de los servomotores

Establecida la cantidad de servomotores y su correspondencia con los tipos de articulaciones, la selección de estos componentes se fundamenta en su capacidad para desempeñar funciones específicas en el proceso de lanzamiento de la botella. Se destaca, además, la necesidad de que los servomotores seleccionados sean resistentes a las salpicaduras de gotas de agua, dada la naturaleza del entorno de trabajo. Esta característica asegura la durabilidad y el rendimiento eficiente de los servomotores durante la ejecución de las tareas asociadas al lanzamiento de la botella. A continuación, se mencionan los servomotores seleccionados para cada articulación.

Servomotor del efector: Su propósito principal es garantizar que la pinza pueda soportar la carga generada por la masa de la botella durante el lanzamiento, considerando la masa máxima de la botella de 0.55 kg. En este contexto, se ha seleccionado el servomotor DS3235-180, cuya capacidad de carga máxima de aproximadamente 5.4 N lo hace idóneo para esta aplicación (ver Anexo 1.1).

Servomotor de la muñeca: Esta elección debe contemplar la carga máxima generada por la botella, la carga del efector y la carga del servomotor del efector. Además, se debe considerar un aspecto crucial identificado en el análisis de las series de lanzamientos realizadas con el brazo humano: la velocidad angular (figura 8.b). El servomotor de la muñeca debe cumplir con el rango de velocidad angular generado por el brazo humano, aproximadamente 650-1300 deg/seg. Por lo tanto, en base a los requisitos mencionados se ha seleccionado el servomotor GX x70 Angle-350 (ver Anexo 1.2).

Servomotor del codo: Este debe tener la capacidad de soportar las cargas generadas por todos los elementos del brazo robótico (a excepción de la base), así como la carga máxima generada por la botella de agua durante el lanzamiento. En virtud de estos criterios, se ha elegido el servomotor DS5180SSG 80 kg (ver Anexo 3.1).

Factor de seguridad

Mediante el software Fusion 360 se obtiene un factor de seguridad $F_s \geq 15$ para todos los elementos analizados del brazo robótico, dicho valor supera el F_s recomendado por SafetyCulture (2023). Por lo tanto, en base al estudio FEM, los elementos no presentarán fallas durante los lanzamientos de botellas.

Ángulos involucrados en el lanzamiento de la botella

El brazo robótico debe simular al máximo las condiciones del brazo humano al lanzar la botella. Se observa que el brazo humano lanza la botella con un $\Phi_i = 90^\circ$ (figura 11.a), por lo tanto, se realizan lanzamientos desde la posición mencionada (figura 14.a). Además, se aprecia que el lanzamiento finaliza con un ángulo final $\Phi_f = 180^\circ$ respecto a la horizontal (figura 11.b). La apertura del efector final debe accionarse justo en el instante que el servomotor de la muñeca llega al ángulo final y para asegurar el accionamiento de este el sensor de proximidad inductivo detectará un objeto metálico justo cuando el servomotor de la muñeca llega a la posición de $\Phi_f = 180^\circ$. Por lo tanto, se utiliza este ángulo final como referencia para los siguientes lanzamientos.

En el proceso de experimentación con el ángulo inicial de lanzamiento $\Phi_i = 90^\circ$, no se lograron lanzamientos exitosos. Ante esta limitación, se procedió a explorar distintos valores de Φ_i con el objetivo de identificar la configuración óptima para alcanzar lanzamientos exitosos (figura 15). Se ejecutan pruebas con ángulos iniciales con valores de: $\Phi_i = 0, 10, 30, 50$ y 70 grados para fracciones de llenado (ψ) de 125 y 167 mL.

Se realizan 40 lanzamientos para cada ángulo inicial y fracción de llenado. Se determina el porcentaje de éxito en base a la cantidad de lanzamientos exitosos divididos por el total de datos ($n=40$). El ángulo inicial que obtuvo un mayor porcentaje de lanzamientos exitosos para ambas fracciones de llenado fue $\Phi_i = 70^\circ$ con un porcentaje de lanzamientos exitosos del 25% para 125 mL y un 35% para 167 mL, por lo tanto, es el ángulo utilizado para el resto de las pruebas con el brazo robótico (figura 14.c).

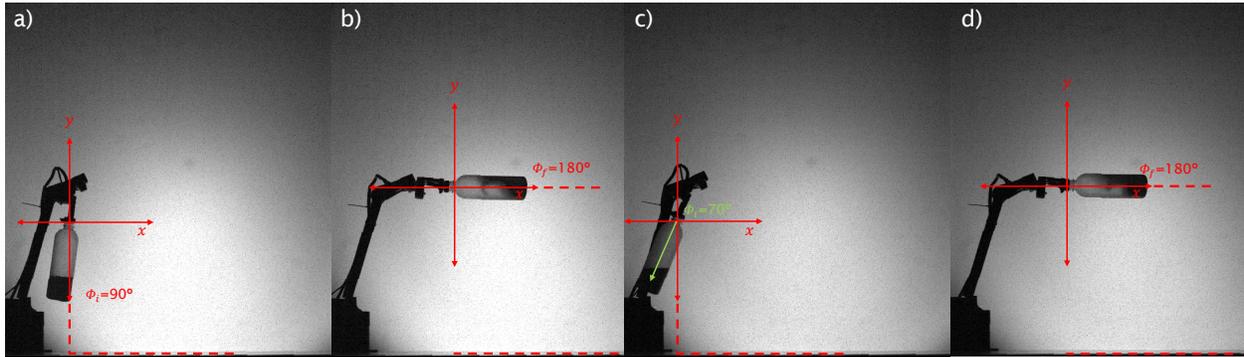


Figura 14. Inclinaciones respecto a la horizontal (mesa) durante el lanzamiento del brazo robótico. a) $\phi_i = 90^\circ$ ángulo inicial del lanzamiento de la botella. b y d) ϕ_f ángulo final del lanzamiento de la botella. c) $\phi_i = 70^\circ$ ángulo inicial del lanzamiento de la botella.

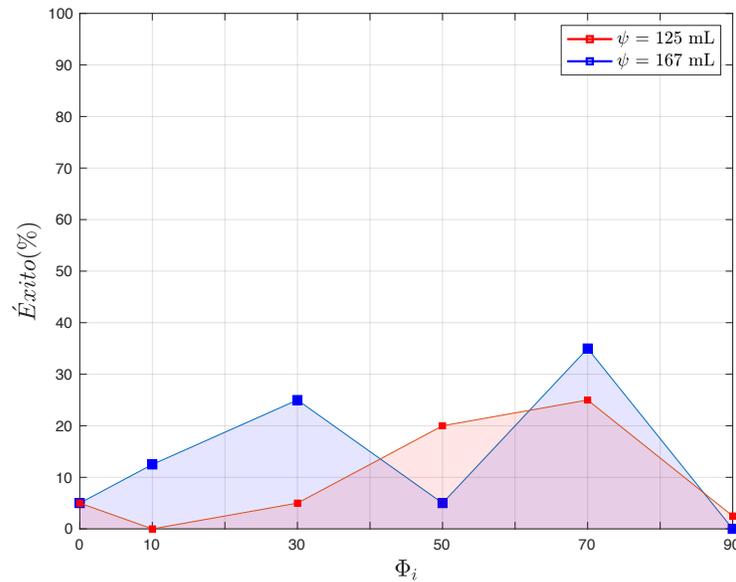


Figura 15. Porcentaje de lanzamientos exitosos para distintos ángulos iniciales Φ_i y para distintas fracciones de llenado (ψ) manteniendo la velocidad angular inicial ω_i . Todos los lanzamientos se realizaron con la máxima velocidad angular generada por el servomotor de la muñeca. Elaboración propia.

A continuación, se realizan análisis comparativos de la velocidad angular resultante para los ángulos iniciales de $\Phi_i = 70^\circ$ y $\Phi_i = 90^\circ$ y con fracciones de llenado de 125 mL y 167 mL. En el estudio de la fracción de llenado de 125 mL, se realizan los lanzamientos de botellas con $\Phi_i = 70^\circ$ y se registró un rango de velocidad angular inicial ω_i entre 789–887 deg/seg. Para $\Phi_i = 90^\circ$, el rango fue de 562–772 deg/seg (figura 16.a). Aunque los rangos no exhiben diferencias significativas, consideran valores extremos, instando a la necesidad de determinar valores representativos.

Se calcula el promedio de la velocidad angular ($\overline{\omega}_i$) para cada serie de lanzamientos con su respectivo Φ_i . Para $\Phi_i = 70^\circ$, se obtuvo un $\overline{\omega}_i$ de 840 deg/seg en casos de fracaso y 838 deg/seg en casos exitosos. En el caso de $\Phi_i = 90^\circ$, el valor de $\overline{\omega}_i$ es de 684 deg/seg. Los $\overline{\omega}_i$ con $\Phi_i = 70^\circ$ no difieren significativamente entre sí. Sin embargo, se observa una diferencia significativa al comparar estos promedios con valor obtenido para $\Phi_i = 90^\circ$. El mismo análisis se realiza para la fracción de llenado de 167 mL, donde los rangos de velocidades angulares iniciales fueron de 671–840 deg/seg para $\Phi_i = 70^\circ$ y de 559–671 deg/seg para $\Phi_i = 90^\circ$ (figura 16.b).

Los valores de $\overline{\omega}_i$ para $\Phi_i = 70^\circ$ fueron de 753 deg/seg en casos de fracaso y 791 deg/seg en casos exitosos. Para $\Phi_i = 90^\circ$ el valor de $\overline{\omega}_i$ 606 deg/seg. Al comparar estos resultados con los obtenidos para la fracción de llenado de 125 mL, se evidencian variaciones en los rangos y promedios de velocidades angulares iniciales. Estas diferencias sugieren la sensibilidad del sistema a las variaciones en la fracción de llenado de las botellas, además del ángulo inicial óptimo ($\Phi_i = 70^\circ$) para alcanzar velocidades angulares iniciales con las que el brazo robótico pueda realizar un lanzamiento exitoso. Hay que mencionar que se usa en todo momento la velocidad angular máxima del servomotor de la muñeca, donde se puede observar que las velocidades angulares registradas no son iguales. Esto puede deberse al movimiento interno del fluido al momento de ejecutar el lanzamiento desde el ángulo Φ_i .

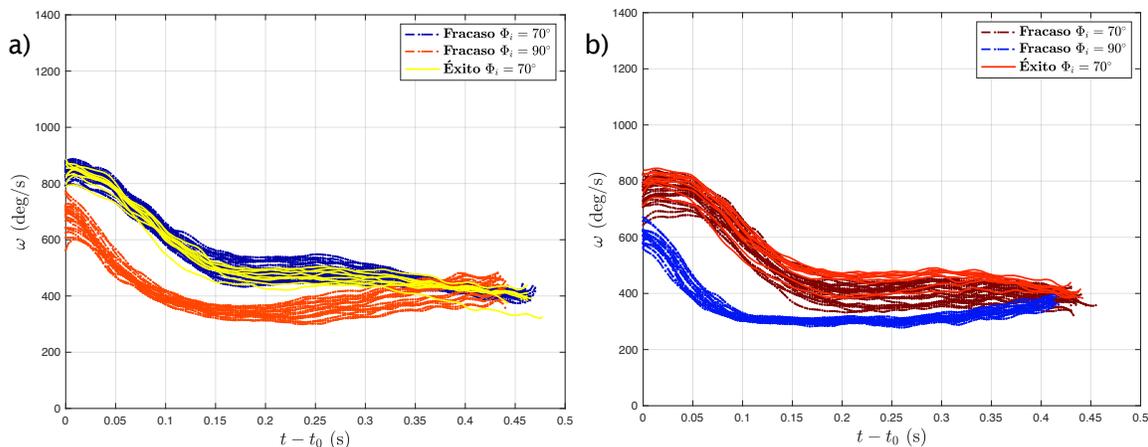


Figura 16. Velocidad angular resultante de las series de lanzamientos. a) Fracción de llenado (ψ) 125 mL y $\Phi_i = 70^\circ$ y $\Phi_i = 90^\circ$. b) Fracción de llenado (ψ) 167 mL y $\Phi_i = 70^\circ$ y $\Phi_i = 90^\circ$. No se registran lanzamientos exitosos para $\Phi_i = 90^\circ$.

Brazo robótico versus brazo humano

Definido el ángulo inicial de lanzamiento óptimo ($\Phi_i = 70^\circ$) para el brazo robótico, se realizan lanzamientos con tres fracciones de llenado: 125 mL, 167 mL y resina. El análisis se centró en comparar el desplazamiento del centro geométrico de la botella en los ejes X e Y , así como la orientación (θ) y la velocidad angular (ω) durante los lanzamientos (figura 19).

El lanzador humano generó un desplazamiento del centro geométrico de la botella que cubre un área más extensa de caída, aproximadamente en un rango de 200–370 mm en el eje horizontal. Además, no logró realizar lanzamientos desde el mismo punto de partida, evidenciando un rango de distancia entre 170–340 mm en el eje vertical (figura 17.a).

Por otro lado, el brazo robótico generó un desplazamiento que abarca una menor área de caída, aproximadamente en un rango entre 310–370 mm en el eje horizontal. A diferencia del lanzador humano, el brazo robótico logró realizar lanzamientos desde un mismo punto de partida que comprende un rango de 190–210 mm en el eje vertical (figura 17.b).

Estos resultados sugieren que, en términos de precisión y consistencia en el punto de partida, el brazo robótico supera al brazo humano. Adicionalmente, se observa que los puntos finales (impacto de la botella con la mesa) generados por el brazo robótico son más consistentes en comparación con el lanzador humano, esto quiere decir que el brazo robótico logra repetir las condiciones iniciales del lanzamiento. La trayectoria trazada por el brazo robótico durante los lanzamientos muestra una mayor repetibilidad en términos de alcanzar el mismo punto final.

En el análisis de la orientación promedio ($\bar{\theta}$) y la velocidad angular promedio ($\bar{\omega}$), se procedió a normalizar la orientación de todas las series, donde se seleccionó un ángulo de referencia (12 deg). Estos se ajustaron para trasladarse lo más cercano posible al ángulo de referencia. Además, se determinó el tiempo inicial t_0 de los puntos iniciales, restándolo al tiempo total t para que todos los puntos comiencen en un mismo origen y en función de un nuevo tiempo $t - t_0$ (figura 18.a).

La velocidad angular promedio ($\bar{\omega}$) alcanzada por el lanzador humano para la fracción de llenado (ψ) = 125 mL (caso exitoso y fracaso) es aproximadamente $\bar{\omega} = 1000$ deg/seg, mientras que para la fracción de llenado (ψ) = 167 mL (caso exitoso y fracaso) es de aproximadamente de

$\bar{\omega} = 1200$ deg/seg. En contraste, las $\bar{\omega}$ generadas por el brazo robótico para ambas fracciones de llenado (ψ) 125 y 167 mL (caso exitoso y fracaso) tienen un valor aproximado de $\bar{\omega} = 800$ deg/seg. Para los casos de botella con resina, no se observa una diferencia significativa en la velocidad angular promedio, siendo para un lanzado humano un valor de $\bar{\omega} = 700$ deg/seg y para el brazo robótico un valor de $\bar{\omega} = 600$ deg/seg aproximadamente (figura 18.b).

Es relevante destacar que las series con resina no experimentan una disminución de la velocidad angular a lo largo del tiempo, confirmando los resultados previos de Dekker P. J. (2018) sobre la conservación del momento angular y cómo la distribución de la masa del agua afecta el momento de inercia de la botella, generando la disminución de la velocidad angular.

A pesar de que el brazo robótico no logra igualar la velocidad angular generada por el lanzador humano, de igual manera se obtienen resultados exitosos. Además, es fundamental mencionar que el servomotor de la muñeca es capaz de generar la velocidad angular indicada por el fabricante a pesar de tener una carga aplicada (ver Anexo 1.2).

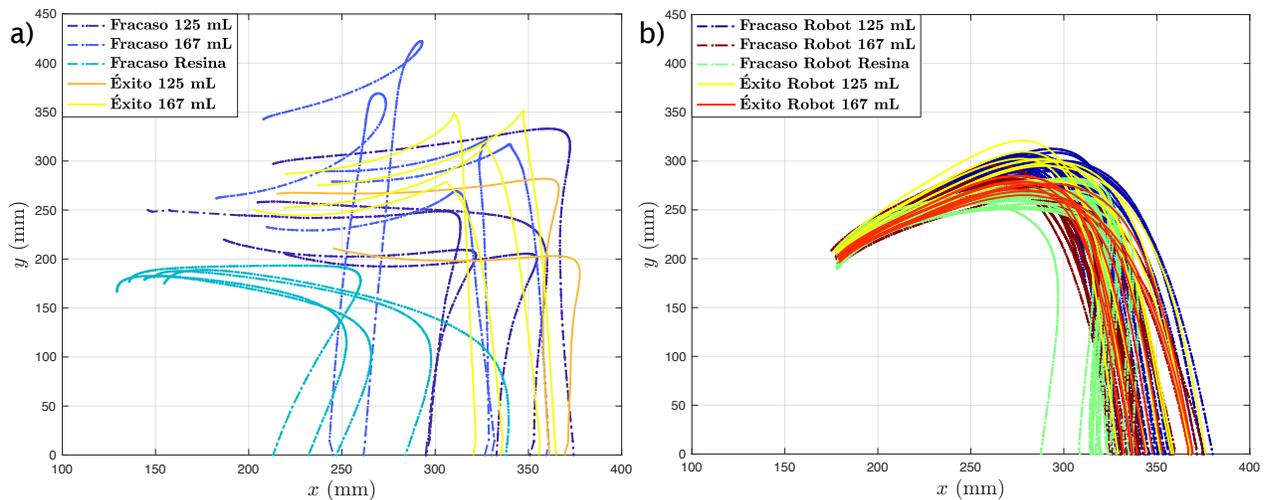


Figura 17. Desplazamiento del centro geométrico de la botella en los ejes X-Y. a) Lanzador humano para fracciones de llenado (ψ) 125 mL y 167 mL. b) Lanzador robot para fracciones de llenado (ψ) 125 mL y 167 mL.

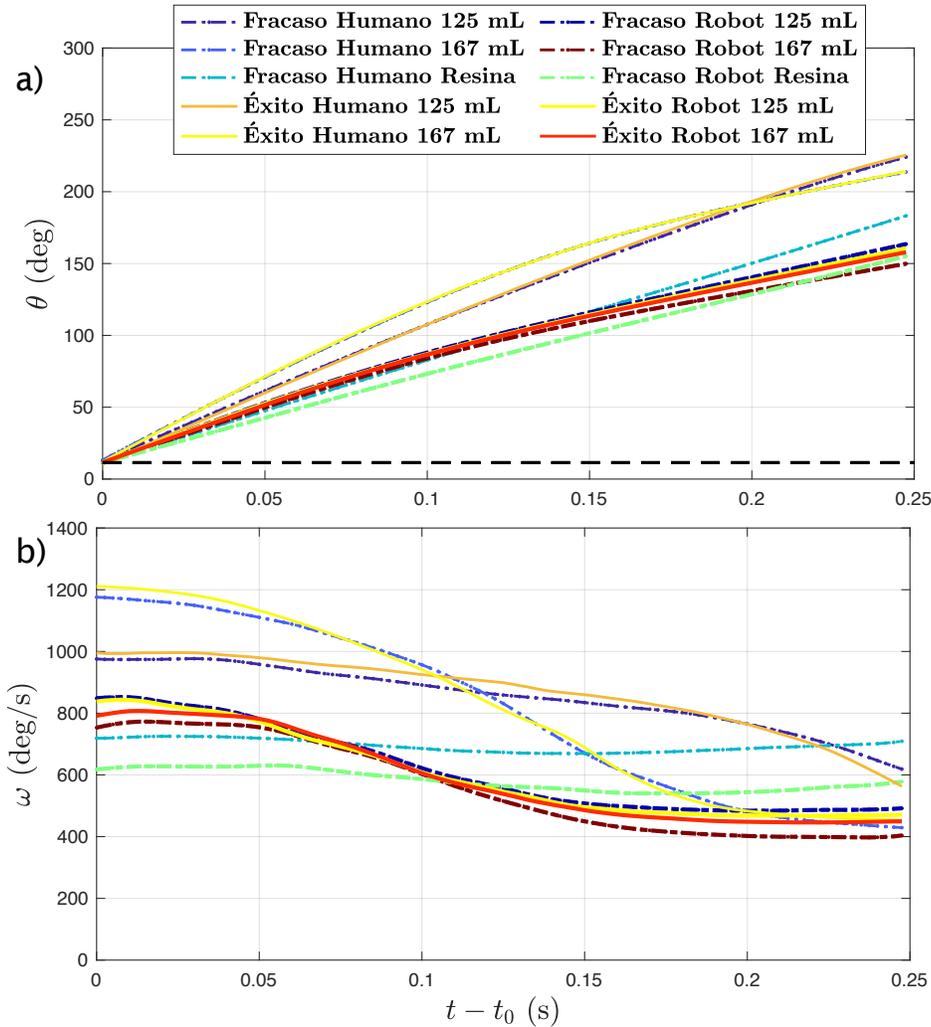


Figura 18. Comparación de los promedios resultantes (éxito y fracaso) entre el brazo humano y el brazo robótico para lanzamientos de botellas con fracción de llenado (ψ) 125 y 167 mL. a) Orientación en grados del centro geométrico de la botella respecto a la horizontal impuesta por regionprops. b) Velocidad angular resultante de la orientación con el uso de la función “gradient”. Elaboración propia.

Dispersión de los puntos iniciales

De acuerdo con la figura 18.b, se destaca que el brazo robótico ha demostrado generar lanzamientos similares entre sí. Por esta razón, se lleva a cabo un análisis de la dispersión de los puntos mediante la desviación estándar de los gráficos de orientación, considerando fracciones de llenado (ψ) que varían entre 110, 125, 130, 150, 167, 170 y resina. Para realizar este análisis, se eligen dos momentos de interés, específicamente $t - t_0 = 0$ y $t - t_0 = 0.25$ seg. A estos tiempos, se les asigna automáticamente valores de θ para el gráfico de orientación. Luego, se calcula el promedio de todos los valores de $\theta_{t-t_0=0 \text{ seg}}$ y $\theta_{t-t_0=0.25 \text{ seg}}$ de cada serie que consta de 40 valores

(n=40). Posteriormente, se determina la desviación estándar de estos promedios para evaluar la dispersión de los puntos en los tiempos seleccionados (ver Anexo 4.4).

En el caso del brazo robótico, se observa que los puntos con una menor dispersión en $t - t_0 = 0$ seg son aquellos asociados con fracciones de llenado (ψ) 125, 150 y 167 mL. Al comparar estos resultados con las fracciones de llenado del lanzador humano, se constata que, en los casos de fracaso con 125 mL, el brazo robótico exhibe una dispersión menor en comparación con el lanzador humano. No obstante, para los casos exitosos, no se registran diferencias significativas. En cuanto a la fracción de llenado de 167 mL, tanto en los casos de fracaso como en los exitosos, la dispersión de los puntos iniciales es significativamente menor en los lanzamientos con el brazo robótico en comparación con el lanzador humano (figura 19.a). Resultados similares se corroboran para un tiempo $t - t_0 = 0.25$ seg, donde nuevamente las fracciones con menor dispersión de puntos son las de 125, 150 y 167 mL para el brazo robótico. Al comparar la dispersión de los puntos con el lanzador humano, se evidencian diferencias significativas para ambos casos, especialmente con una fracción de 167 mL (figura 19.b)

Estos resultados sugieren que el brazo robótico tiene la capacidad para mantener una consistencia notoria en la dispersión de los puntos iniciales y en el transcurso del lanzamiento.

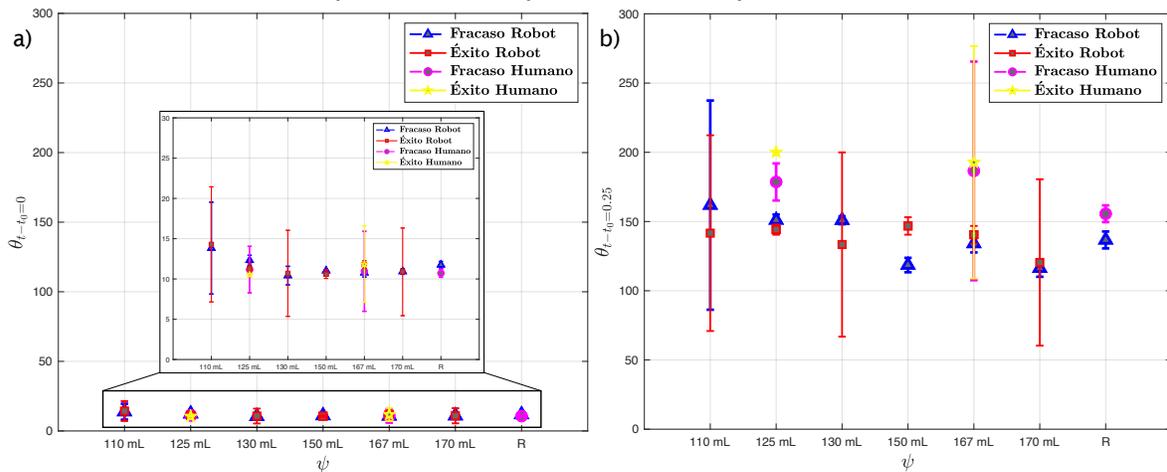


Figura 19. A) Dispersión del promedio de los puntos en $\theta_{t-t_0=0}$ seg. b) Dispersión del promedio de los puntos en $\theta_{t-t_0=0.25}$ seg. Elaboración propia.

Casos exitosos brazo humano versus brazo robot

A continuación, se comparan los resultados exitosos de un total de 40 lanzamientos para botellas con fracciones de llenado ψ 125 y 167 mL. Los porcentajes de éxito fueron de 17.5% y

22.5% para el lanzador humano, y del 25% y 35% para el brazo robótico (figura 20). Por lo tanto, el brazo robótico obtiene una mayor cantidad de lanzamientos exitosos.

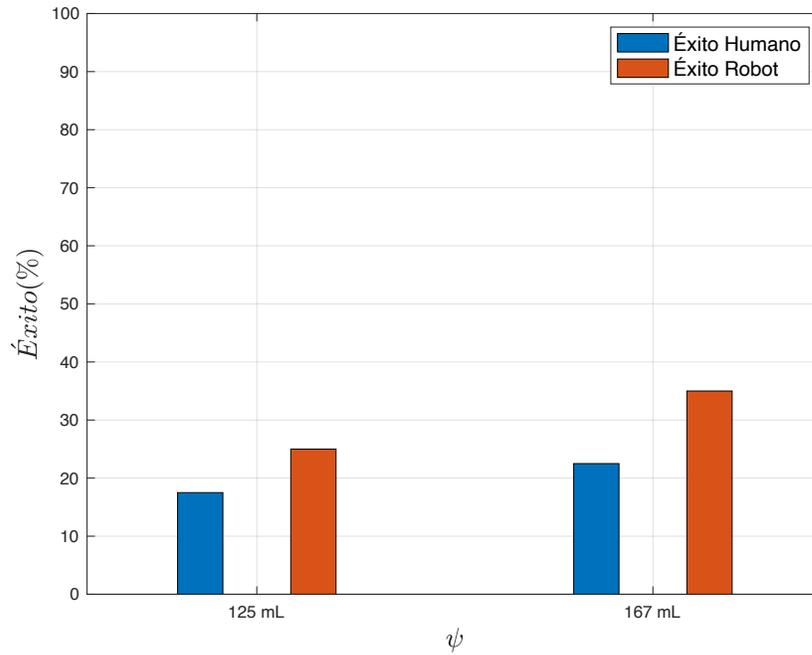


Figura 20. Porcentaje de lanzamientos exitosos del brazo humano versus el brazo robótico. Elaboración propia.

Finalmente, se presenta la secuencia de imágenes de un lanzamiento realizado por el brazo robótico con un resultado exitoso.

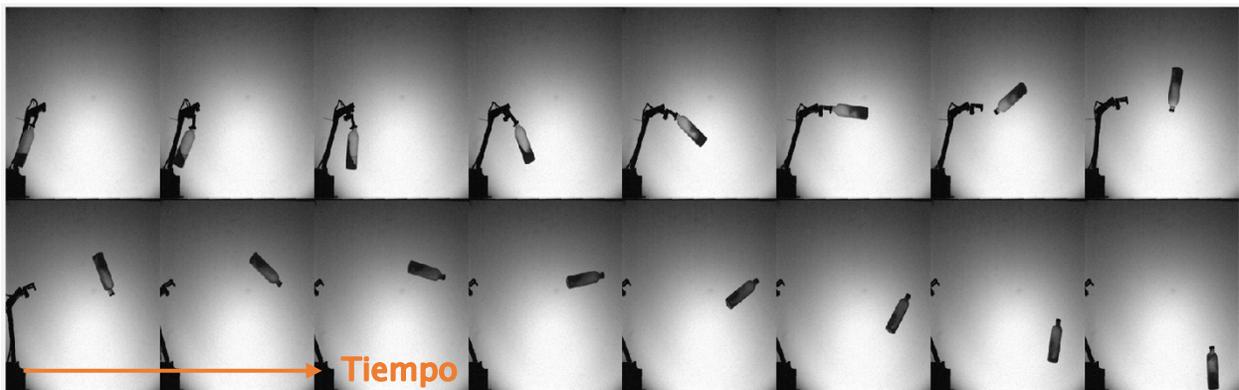


Figura 21. Secuencia fotográfica del brazo robótico realizando el lanzamiento de una botella con agua. Elaboración propia.

Conclusión

En el marco del presente proyecto, se desarrolló un brazo robótico antropomórfico con la capacidad de abordar el desafío de la botella, que implica lanzar una botella parcialmente llena de agua de manera que gire en el aire y aterrice en posición vertical. Durante la ejecución de los lanzamientos, se registraron datos como el ángulo inicial Φ_i del lanzamiento, el ángulo final Φ_f correspondiente al momento de liberación de la botella, la velocidad angular ω durante la fase de vuelo y el desplazamiento durante esta etapa (desde el instante de liberación de la botella hasta el impacto con la mesa).

La estructura del brazo robótico se compone de 3 servomotores que simulan las articulaciones de los dedos, muñeca y codo. Los enlaces que conectan los servomotores están fabricados con material PLA, el cual, según el análisis de elementos finitos (FEM) realizado en Fusion 360, mostró un factor de seguridad superior a 15. Este valor, significativamente superior al límite establecido (4), garantiza la integridad estructural del brazo robótico durante las pruebas de lanzamiento.

Los lanzamientos realizados por el brazo humano exhibieron una falta de repetibilidad, lo que dificultó el registro preciso de los parámetros iniciales del desafío de la botella. Aunque el brazo humano logró generar una mayor velocidad angular al soltar la botella en comparación con el brazo robótico, no demostró consistencia para diferentes fracciones de llenado de la botella.

En contraste, el brazo robótico destacó al lograr una alta tasa de repetibilidad en los lanzamientos, tanto en el desplazamiento del centro geométrico de la botella como en los ángulos finales del lanzamiento. Además, demostró consistencia en las velocidades angulares para diversas fracciones de llenado de la botella.

La programación integral del brazo robótico se realiza en un microcontrolador Arduino, y los servomotores se alimentan con una fuente de poder externa para maximizar su capacidad de trabajo. La inclusión de un sensor de proximidad inductivo permite detectar un objeto metálico (instalado en la pinza fija) en el momento preciso en que el servomotor alcanza el ángulo final deseado, activando de inmediato el efector final para liberar la botella y ejecutar el lanzamiento, imitando así el acto humano de lanzamiento.

A pesar de que el brazo robótico ha demostrado una mejora en la precisión de los resultados en comparación con el brazo humano inexperto, todavía no se han identificado de manera concluyente las condiciones específicas que garantizan lanzamientos exitosos de manera consistente. No obstante, el análisis comparativo de variables clave como las fracciones de llenado, los ángulos finales de lanzamiento y la velocidad angular entre los lanzamientos realizados por el brazo robótico y el brazo humano proporciona indicios valiosos sobre los posibles rangos óptimos para alcanzar lanzamientos exitosos.

Posibles mejoras o recomendaciones para trabajos futuros:

- Adquirir un servomotor para la muñeca con una mayor velocidad angular y torque. Esta mejora busca simular con mayor fidelidad los lanzamientos humanos, aportando así una mayor versatilidad al brazo robótico.
- Rediseño de las piezas constituyentes del brazo robótico con el objetivo de reducir la carga que estas generan sobre los actuadores.
- Realizar pruebas con distintos ángulos finales Φ_f con el propósito de identificar el ángulo óptimo de lanzamiento que maximice la cantidad de lanzamientos exitosos.
- Optimizar el código de programación para el brazo robótico y explorar la posibilidad de utilizar un microcontrolador con mayor capacidad de procesamiento.
- Cálculo de la cinemática directa e inversa del brazo robótico. Este análisis permitirá simular los lanzamientos mediante un software a elección, proporcionando valores teóricos que podrán ser comparados con los valores reales obtenidos durante las pruebas del brazo robótico.

Referencias

- Arduino. (2023) Datasheet Arduino UNO R4 Wifi.
- Aronsson, A. (2021). Multipurpose Robot Arm. DIVA. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1558904&dswid=3894>
- Brown, C., & Briggs, N. (2019, enero). *Fusion 360: Simulación de la realidad con FEA*. Autodesk. Recuperado 1 de diciembre de 2023, de <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Fusion-360-Simulating-Reality-FEA-2017>
- Castillo-Martínez, M. Á., Carvajal-Gámez, B. E., & Gallegos-Funes, F. J. (2018). Efectos en la resolución de servomotores con interfaz PWM por la generación de señales en microcontroladores. *Research in Computing Science*, 14(7), 89–98. <https://doi.org/10.13053/rcs-147-7-8>
- DS Servo. (2023, 5 enero). *Servomotor DS3235-180*. AliExpress. Recuperado 26 de noviembre de 2023 de: https://es.aliexpress.com/item/1005003445900825.html?spm=a2g0o.productlist.main.7.203f4f18CHFho2&algo_pvid=ba6e22e6-dd92-46a9-91ef-5765ff02aa50&algo_exp_id=ba6e22e6-dd92-46a9-91ef-5765ff02aa50-3&pdp_npi=4%40dis%21CLP%2124754%2118322.0%21%21%2127.48%21%21%402103277f17010506145087296e8c88%2112000025823333107%21sea%21CL%212659649585%21&curPageLogUid=Ggg8LZ66fKjI#nav-specification
- DS Servo. (2021, 29 abril). *Servomotor DS5180 SSG*. Alibaba. Recuperado 26 de noviembre de 2023, de https://www.alibaba.com/product-detail/High-Torque-Metal-Gear-Waterproof-Digital_60708786797.html
- Ferran, P. G. (2020). *Diseño y construcción de un brazo robótico controlado mediante Arduino* [Tesis de grado]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Finio, B. (8 de Marzo de 2018). The Physics of Bottle-Flipping. Obtenido de Scientific American: <https://www.scientificamerican.com/article/the-physics-of-bottle-flipping/>
- GX Servo. (2023, 1 junio). *Servomotor GX x70 Angle-350*. AliExpress. Recuperado 26 de noviembre de 2023, de <https://es.aliexpress.com/item/1005003372257463.html?gatewayAdapt=glo2esp>
- Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering Mechanics Statics And Dynamics* (14.^a ed.). Pearson Education, Inc.

https://www.academia.edu/44304213/Ingeniería_mecánica_Decimocuarta_edición_ESTÁTICA

Ibáñez, A., & Andueza, Á. (2018). *Programacion de un brazo robotico basado en Arduino y controlado remotamente*. [Tesis de grado]. Universidad Pública de Navarra.

Knudsen, J. M., & Hjorth, P. G. (2000). The angular momentum theorem. En *Advanced texts in physics* (pp. 219–235). https://doi.org/10.1007/978-3-642-57234-0_10

Louis, L. (2018). *Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research* (Vol. 1). <https://doi.org/10.5121/ijcacs.2016.1203>

Luthsamy, S., Al-Qrimli, H. F., & Taha, S. S. B. W. (2016). Design and control of an anthropomorphic robotic arm. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/309549518_Design_and_Control_of_an_Anthropomorphic_Robotic_Arm

Manolescu, D., & Secco, E. L. (2022). Design of a 3-DOF robotic arm and implementation of D-H forward kinematics. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/363227308_Design_of_a_3-DOF_Robotic_Arm_and_implementation_of_D-H_Forward_Kinematics

Mohan, A., Jatin, A., & Vashisht, P. (2023). Enhancing robotic arm performance: integrating arduino control and aerodynamic principles for 6 degrees of freedom. *International journal of innovative research in engineering and management*, 10(3), 141–145. <https://doi.org/10.55524/ijirem.2023.10.3.21>

Murdock, D. (2008). *Worked Examples from Introductory Physics Vol. II: Rotation, Vibrations and Waves*. Tenn. Tech. Univ.

Naylamp Mechatronics SAC. (2019, septiembre). *SENSOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO SN04-N (NPN-NO)*. Naylamp Mechatronics. Recuperado 24 de noviembre de 2023, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/404-sensor-de-proximidad-inductivo-sn04-n-npn-no.html>

Oridate, A. (2016). DESIGN, SIMULATION AND FABRICATION OF a 5-DOF ROBOTIC ARM (with implementation of inverse kinematics). *oauife*. https://www.academia.edu/27913612/DESIGN_SIMULATION_AND_FABRICATION_OF_A_5_DOF_ROBOTIC_ARM_with_implementation_of_inverse_kinematics

- Ortiz, A. (2010, marzo). *Capítulo 5 Teoría de Falla por Carga Estática*. u-cursos. Recuperado 3 de diciembre de 2023, de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/ME5600/1/material_docente/bajar?id_material=390616
- P. J. Dekker, L. A. (2018). Water bottle flipping physics. *Am. J. Phys.*, 733–739.
- Pérez, F. (2019). *Control de motores en entorno MATLAB sobre plataforma Arduino*. e_BUAH. Biblioteca digital Universidad de Alcalá. <http://hdl.handle.net/10017/38639>
- SafetyCulture. (2023a, noviembre). *Factor de seguridad: Coeficiente de seguridad en el diseño y el uso*. Recuperado 3 de diciembre de 2023, de <https://safetyculture.com/es/temas/factor-de-seguridad/#:~:text=Definición%20del%20factor%20de%20seguridad&text=Si%20las%20consecuencias%20de%20un,el%20producto%20o%20la%20estructura>.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). Robotics. En *Advanced textbooks in control and signal processing*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>
- Starețu, I. (2021). Robotic Arms with Anthropomorphic Grippers for Robotic Technological Processes. *MDPI*. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063077>
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for scientists and engineers*. Macmillan Higher Education.
- Ultimaker. (2017, 15 mayo). *Ficha de datos técnicos PLA*. Ultimaker. Recuperado 26 de noviembre de 2023, de <https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf>
- Vision. (2023). Datasheet Phantom VEO 1310–1010–610. *Vision Research–AMETEK*.
- Wallén, A., & Määttä, N. (2020). *Anthropomorphic Robot ARM*. DIVA. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1462059&dswid=-4011>

Anexos

Anexo 1: Datasheet servomotores seleccionados para el brazo robótico.

Anexo 1.1: Servomotor efector final DS3235-180

Tabla A.1.1 Especificaciones técnicas servomotor efector final DS3235-180 (DS Servo, 2023).

Especificaciones de operación			
Rango de temperatura de almacenamiento	-30°C a 80°C		
Rango de temperatura de operación	-15°C a 70°C		
Rango de voltaje de operación	5-7.4 V		
Especificaciones mecánicas			
Tamaño	40x20x38.5 mm		
Peso	60 g		
Relación de engranajes	373		
Rodamiento	Doble rodamiento		
Cable conector	300 mm		
Motor	Motor sin núcleo		
Rendimiento impermeable	IP66		
Especificaciones eléctricas			
Voltaje de operación	5 V	6 V	7 V
Corriente en reposo	5 mA	5 mA	5 mA
Velocidad de funcionamiento (sin carga)	0.13 sec/60°	0.12 sec/60°	0.11 sec/60°
Par de torsión (en reposo)	29 kg-cm	32 kg-cm	35 kg-cm
Corriente de arranque	1.9 A	2.1 A	2.3 A
Especificación de control			
Sistema de control	PWM		
Rango de ancho de pulso	500-2500 μsec		
Posición neutral	1500 μsec		
Grado en ejecución	180° o 270° (cuando 500-2500 μsec)		
Ancho de banda muerto	2 μsec		
Frecuencia de operación	50-330 Hz		
Dirección de rotación	Sentido antihorario (cuando 500-2500 μsec)		

1. Dimensions

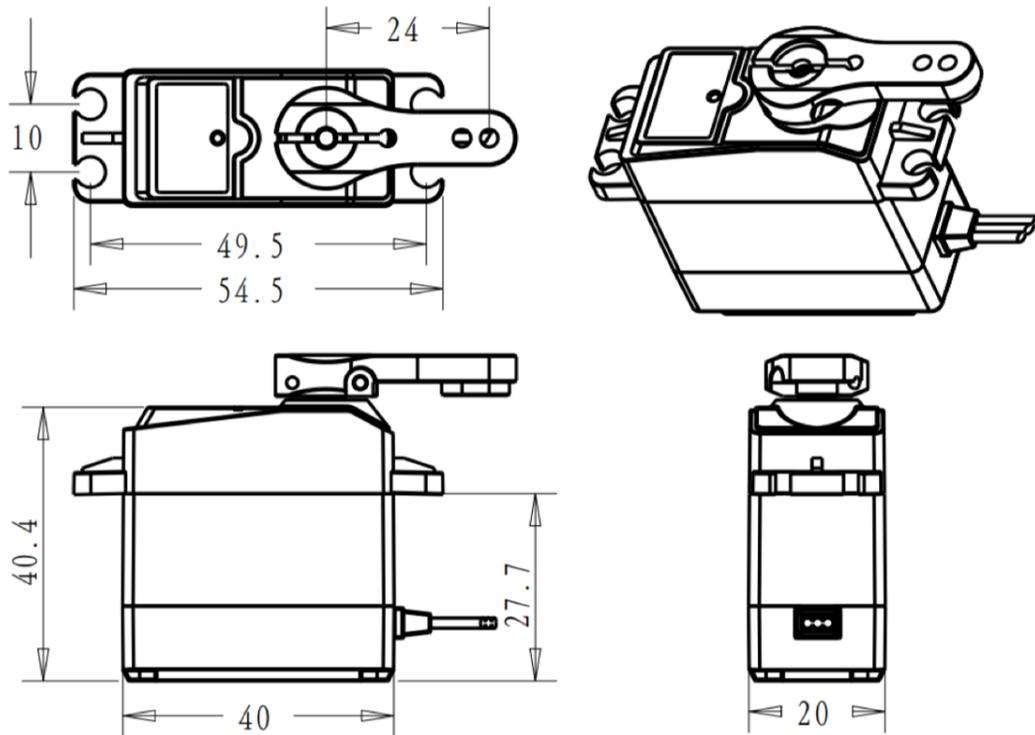
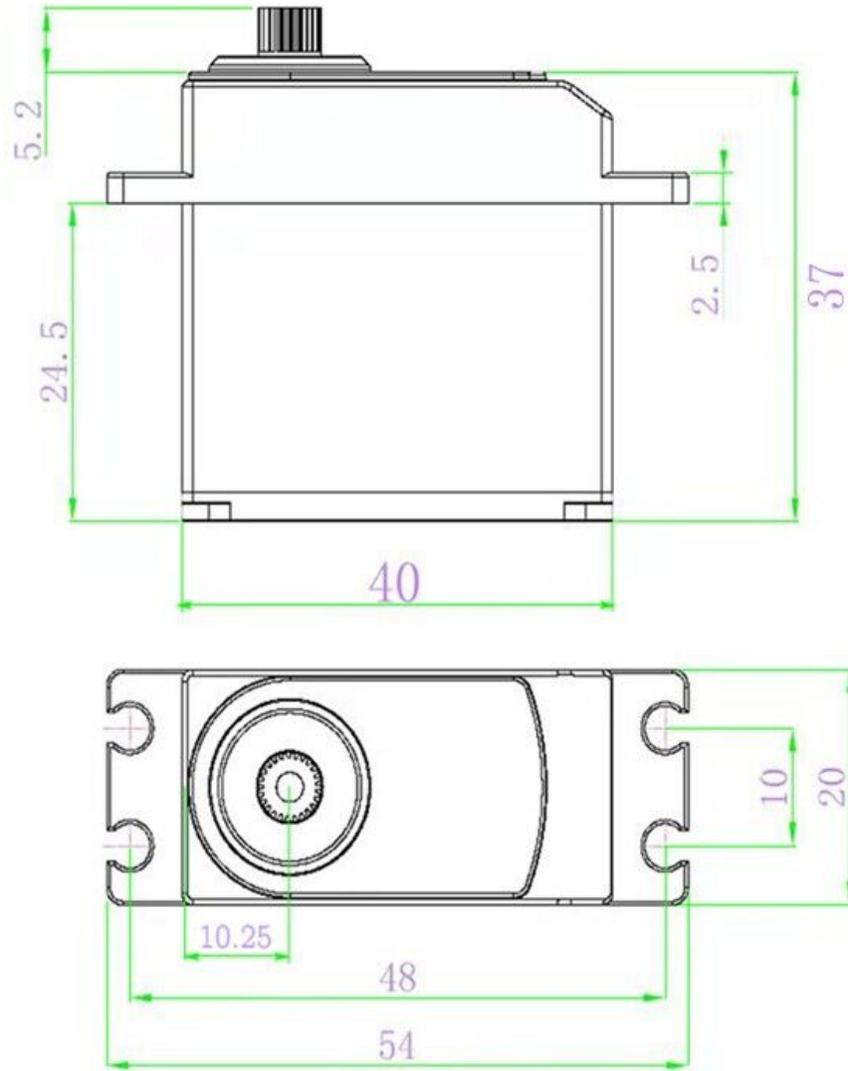


Figura A.1.1 Dimensiones servomotor DS3235-180 (DS Servo, 2023).

Anexo 1.2: Servomotor muñeca GX x70 Angle-350

Tabla A.1.2 Especificaciones técnicas servomotor muñeca GX x70 Angle-350 (GX Servo,2023).

Especificaciones de operación			
Rango de temperatura de almacenamiento	-30°C a 80°C		
Rango de temperatura de operación	-15°C a 70°C		
Rango de voltaje de operación	5-7.4 V		
Especificaciones mecánicas			
Tamaño	40x20x40 mm		
Peso	81 g		
Rodamiento	Doble rodamiento		
Motor	Motor sin núcleo		
Rendimiento impermeable	IP66		
Especificaciones eléctricas			
Voltaje de operación	6 V	7.4 V	8.4 V
Corriente en reposo	5 mA	5 mA	5 mA
Velocidad de funcionamiento (sin carga)	0.12 sec/60°	0.10 sec/60°	0.095 sec/60°
Par de torsión (en reposo)	60 kg-cm	70 kg-cm	72 kg-cm
Corriente de arranque	1.9 A	2.1 A	2.3 A
Especificación de control			
Sistema de control	PWM		
Rango de ancho de pulso	500-2500 µsec		
Posición neutral	1500 µsec		
Grado en ejecución	180° o 358° (cuando 500-2500 µsec)		
Ancho de banda muerto	1 µsec		
Frecuencia de operación	1520 µsec/330 Hz		
Dirección de rotación	Sentido antihorario (cuando 500-2500 µsec)		



UNIT: MM

Figura A.1.2 Dimensiones servomotor GX x70 Angle-350 (GX Servo, 2023).

Anexo 1.3: Servomotor codo DS5180SSG 80 kg

Tabla A.1.3 Especificaciones técnicas servomotor codo DS5180SSG (DS Servo,2021).

Especificaciones de operación			
Rango de temperatura de almacenamiento	-30°C a 80°C		
Rango de temperatura de operación	-15°C a 70°C		
Rango de voltaje de operación	6-8.4 V		
Especificaciones mecánicas			
Tamaño	65x30x48 mm		
Peso	162 g		
Relación de engranajes	373		
Rodamiento	Doble rodamiento		
Cable conector	300 mm		
Motor	Motor sin núcleo		
Rendimiento impermeable	IP66		
Especificaciones eléctricas			
Voltaje de operación	6 V	7.4 V	8.4 V
Corriente en reposo	4 mA	5 mA	6 mA
Velocidad de funcionamiento (sin carga)	0.19 sec/60°	0.17 sec/60°	0.15 sec/60°
Par de torsión (en reposo)	69 kg-cm	78 kg-cm	85 kg-cm
Corriente de arranque	4.1 A	5 A	6.5 A
Especificación de control			
Sistema de control	PWM		
Rango de ancho de pulso	500-2500 µsec		
Posición neutral	1500 µsec		
Grado en ejecución	180° o 270° (cuando 500-2500 µsec)		
Ancho de banda muerto	3 µsec		
Frecuencia de operación	50-330 Hz		
Dirección de rotación	Sentido antihorario (cuando 500-2500 µsec)		

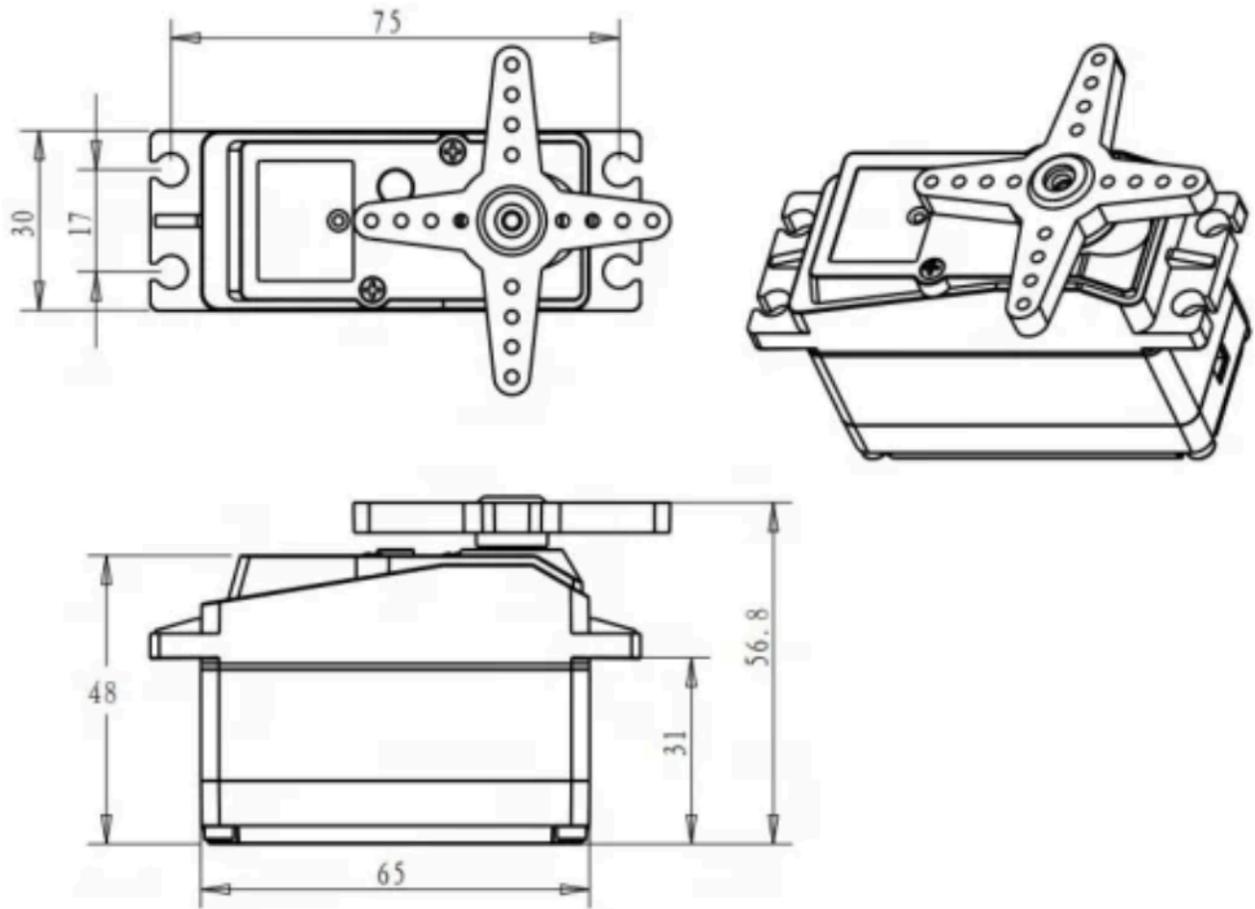


Figura A.1.3 Dimensiones servomotor codo DS5180SSG (DS Servo,2021).

Anexo 2: Ácido poliláctico (PLA)

Tabla A.2.1. Propiedades mecánicas PLA (Ultimaker, 2017).

	Valor típico	Método de ensayo
Módulo elasticidad a la tracción	2346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	3.3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	5.2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	103 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	3150 MPa	ISO 178

Anexo 3: Cálculos esfuerzos resultantes durante el lanzamiento de la botella

Tabla A.3.1. Masas de los elementos presentes en el brazo robótico.

Servomotor codo	0.162 kg
Servomotor muñeca	0.081 kg
Servomotor efector	0.06 kg
Pinza móvil	0.01 kg
Pinza fija y soporte servo efector	0.02 kg
Dorso del brazo	0.05 kg
Antebrazo	0.242 kg
Base brazo robótico	0.97 kg

Iniciamos obteniendo las fuerzas que generan las masas de los elementos presentes en la tabla A.3.1.

$$F = mg \quad (\text{A.3.1})$$

$$W_{s3} = 0.162 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.59 \text{ N}$$

$$W_{s2} = 0.081 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.8 \text{ N}$$

$$W_{s1} = 0.06 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.6 \text{ N}$$

$$W_{pf} = 0.02 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.2 \text{ N}$$

$$W_D = 0.05 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.49 \text{ N}$$

$$W_{Ant} = 0.242 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.37 \text{ N}$$

$$W_{bas} = 0.97 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.52 \text{ N}$$

*Nota: No se considera la masa propia de la pinza móvil.

Para efectos prácticos del cálculo, se realizan simplificaciones al momento de representar las figuras. Las fuerzas externas generadas por la botella se considerarán de forma independiente para ambas pinzas, es decir, estas no serán repartidas. Además, solo se consideran fuerzas puntales generadas por las masas de los propios elementos.

El primer elemento para el cálculo de esfuerzos es la pinza móvil donde se identifican las fuerzas externas generadas por la botella durante el lanzamiento (figura A.3.1).

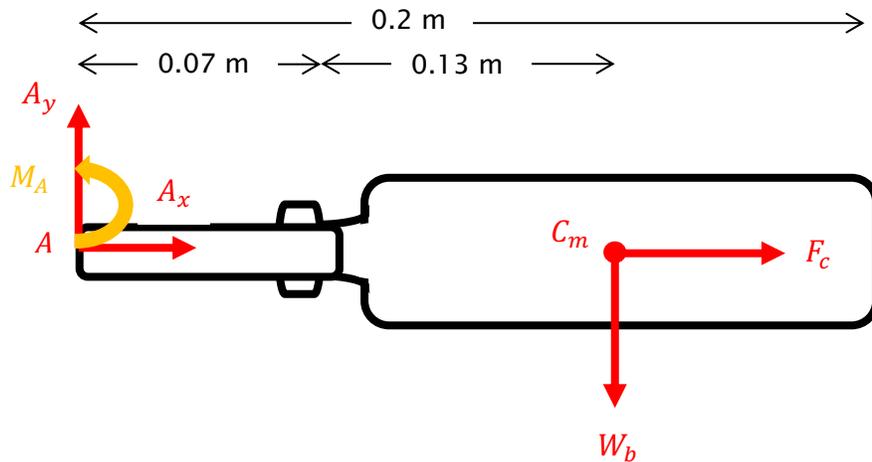


Figura A.3.1. Diagrama de cuerpo libre de la pinza móvil en el instante previo a soltar la botella llena de agua.

Si consideramos un punto A en el extremo de la botella y nuestro sistema de referencia está representado por las reacciones positivas A_x , A_y y M_A . El centro de masa de la botella llena de agua C_m se considera en la mitad de la botella para simplificación del análisis. Además, como se mencionó anteriormente, la masa de la pinza móvil es despreciable. Por lo tanto, sólo se consideran las reacciones del punto A y las reacciones generadas por la botella W_b (masa de la botella) y F_c (fuerza centrífuga). El valor de F_c se obtiene de la ecuación (9):

$$F_c = mr\omega^2$$

Donde, la masa de la botella es $m = 0.55 \text{ kg}$, el radio de cobertura $r = 0.2 \text{ m}$ y la velocidad angular que se considera es la máxima velocidad angular indicada por el fabricante del servomotor de la muñeca, la cual es $\omega = 12 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$. Reemplazando los valores en la ecuación (9) se obtiene que la fuerza centrípeta resultante tiene un valor de $F_c = 15.84 \text{ N}$. Si consideramos que justo en el instante previo a lanzar la botella el sistema se encuentra detenido, podemos considerar equilibrio estático, por lo tanto, se realiza el siguiente análisis:

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow A_x + F_c = 0 \Leftrightarrow A_x = -F_c = -15.84 \text{ N} \quad (\text{A.3.2})$$

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow A_y - W_b = 0 \Leftrightarrow A_y = W_b = 5.4 \text{ N} \quad (\text{A.3.3})$$

$$\sum M_A = 0 \Leftrightarrow M_A - W_b * 0.2 = 0 \Leftrightarrow M_A = 1.08 \text{ Nm} \quad (\text{A.3.4})$$

Se realiza el mismo procedimiento para la pinza fija y soporte del servomotor del efector (figura A.2.2).

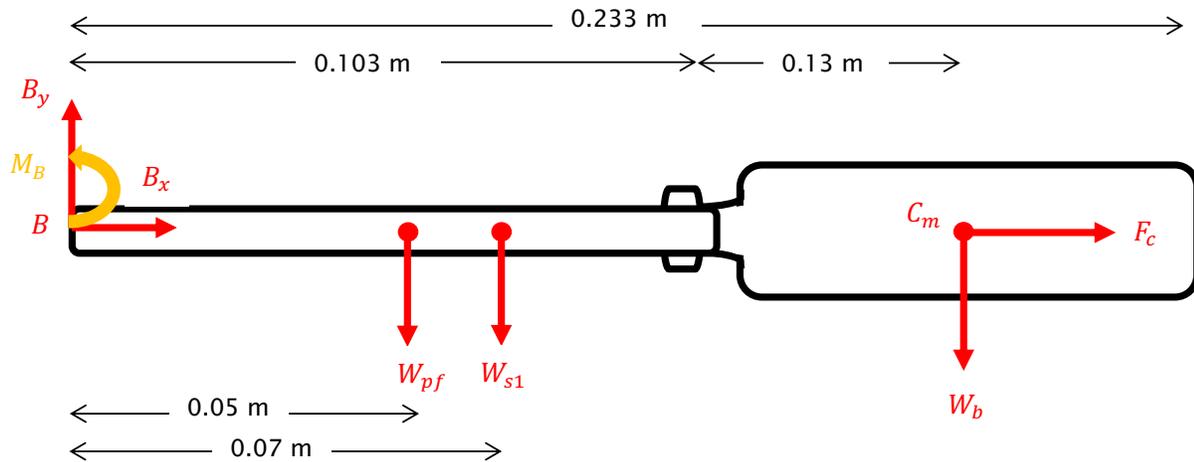


Figura A.3.2. Diagrama de cuerpo libre de la pinza fija y soporte del servomotor del efector previo a soltar la botella llena de agua.

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow B_x + F_c = 0 \Leftrightarrow B_x = -F_c = -15.84 \text{ N} \quad (\text{A.3.5})$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Leftrightarrow B_y - W_{pf} - W_{s1} - W_b = 0 \Leftrightarrow B_y - 1.59 \text{ N} - 0.2 \text{ N} - 5.4 \text{ N} = 0 \\ &\Leftrightarrow B_y = 7.2 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.3.6})$$

$$\begin{aligned} \sum M_B = 0 &\Leftrightarrow M_B - W_{pf} * 0.05 - W_{s1} * 0.07 - W_b * 0.233 = 0 \\ &\Leftrightarrow M_B - 0.01 - 0.042 - 1.26 = 0 \Leftrightarrow M_B = 1.31 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (\text{A.3.7})$$

Por lo tanto, las reacciones obtenidas en el punto B son: $B_x = -15.84 \text{ N}$, $B_y = 7.2 \text{ N}$ y $M_B = 1.31 \text{ Nm}$, estas serán utilizadas en el siguiente elemento del brazo robótico (dorso). A continuación, se analiza el dorso del brazo robótico (figura A.3.3).

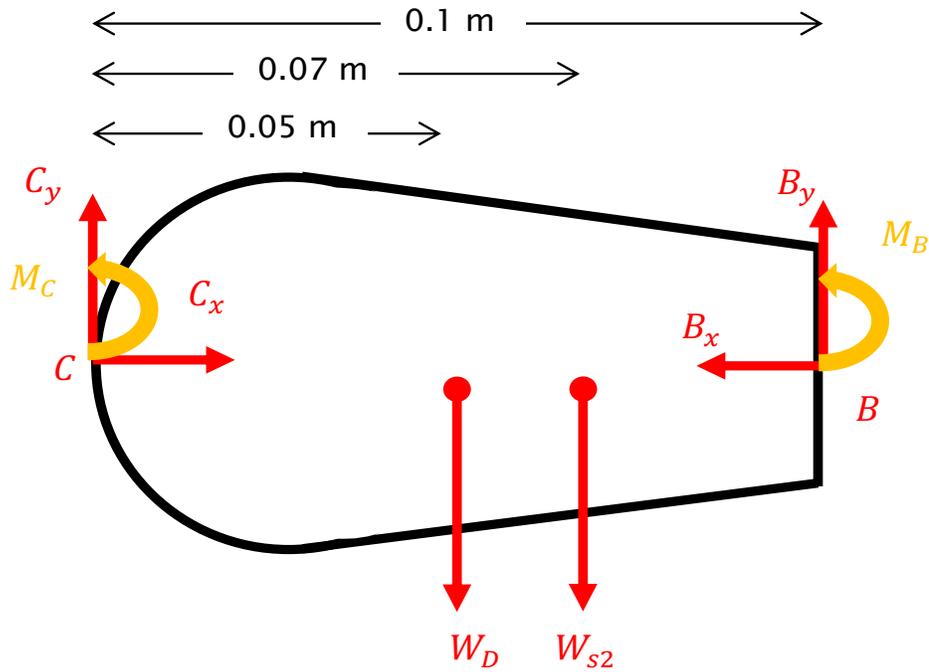


Figura A.3.3. Diagrama de cuerpo libre del dorso del brazo robótico previo a soltar la botella llena de agua.

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow C_x - B_x = 0 \Leftrightarrow C_x = B_x = 15.84 \text{ N} \quad (\text{A.3.8})$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Leftrightarrow C_y - W_D - W_{s2} + B_y = 0 \Leftrightarrow C_y - 0.49 \text{ N} - 0.8 \text{ N} + 7.2 \text{ N} = 0 \\ &\Leftrightarrow C_y = -5.91 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{A.3.9})$$

$$\begin{aligned} \sum M_C = 0 &\Leftrightarrow M_C - W_D * 0.05 - W_{s2} * 0.07 + B_y * 0.1 = 0 \\ &\Leftrightarrow M_C - 0.025 - 0.056 + 0.72 = 0 \Leftrightarrow M_C = -0.64 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (\text{A.3.10})$$

Las reacciones resultantes en el punto C son: $C_x = 15.84 \text{ N}$, $C_y = -5.91 \text{ N}$ y $M_C = -0.64 \text{ Nm}$, estas serán utilizadas en el siguiente elemento del brazo robótico (antebrazo). A continuación, se analiza el antebrazo del brazo robótico (figura A.3.4).

El antebrazo tendrá una inclinación de $\theta = 45^\circ$ para efectos del análisis estático. Si bien la inclinación máxima ($\theta = 90^\circ$) representa una mayor carga para el eje y , sin embargo, lanzar la botella con dicha inclinación no sería posible debido a la altura del brazo robótico.

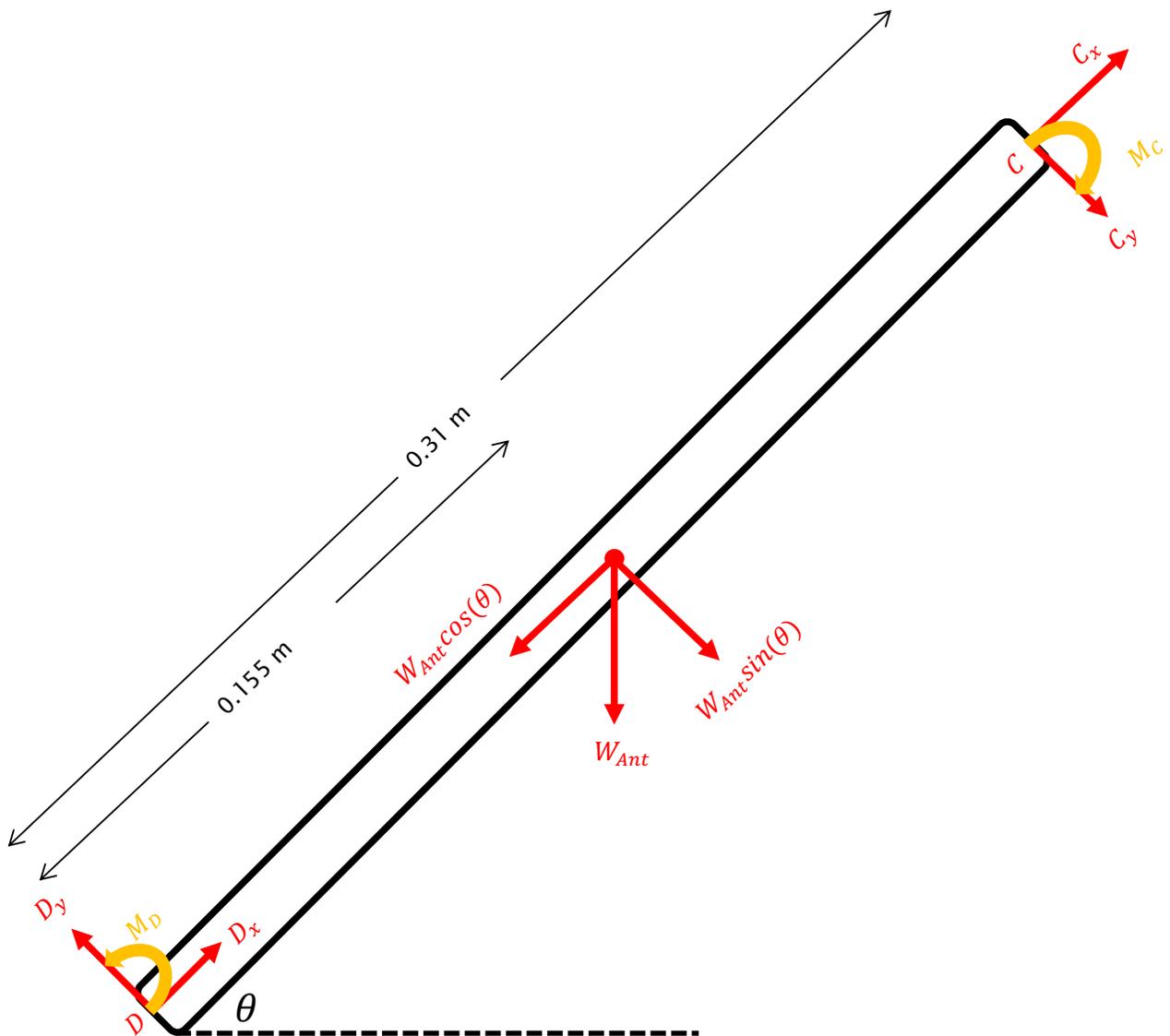


Figura A.3.4. Diagrama de cuerpo libre del antebrazo del brazo robótico previo a soltar la botella llena de agua.

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &\Leftrightarrow D_x - W_{Ant} * \cos(\theta) + C_x = 0 \Leftrightarrow D_x & (A.3.11) \\ &= 2.37 * \cos(45^\circ) - 15.84 \Leftrightarrow D_x = -14.16 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F_y = 0 &\Leftrightarrow D_y - W_{Ant} * \sin(\theta) - C_y = 0 \Leftrightarrow D_y = W_{Ant} * \sin(45^\circ) + 5.91 & (A.3.12) \\ &= 0 \Leftrightarrow D_y = 7.59 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_D = 0 &\Leftrightarrow M_D - W_{Ant} * \sin(\theta) * 0.155 - C_y * 0.31 = 0 \Leftrightarrow M_D & (A.3.13) \\ &= W_{Ant} * \sin(45^\circ) * 0.155 + 1.83 = 0 \Leftrightarrow M_D = 2.09 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Anexo 3.1 Informe del estudio de los elementos del brazo robótico sometidos al análisis de elementos finitos (FEM)

Tabla A.3.2 Resultados del esfuerzo de Von Mises máximo y factor de seguridad para cada elemento del brazo robótico sometido al análisis FEM. Elaboración propia.

Elemento brazo robótico	Esfuerzo Von Mises máx [MPa]	Factor de seguridad
Pinza móvil efector final	0.369	≥ 15
Pinza fija efector final	1.524	≥ 15
Torso efector final	0.261	≥ 15
Antebrazo	0.145	≥ 15
Base brazo robótico	0.097	≥ 15

Anexo 4: Códigos de programación

Anexo 4.1 Código Arduino para el control del brazo robótico y flujograma

```
1 #include <Servo.h>
2 // Definición de los servomotores para el codo, muñeca y dedos
3 Servo elbow; // Servo para el codo
4 Servo wrist; // Servo para la muñeca
5 Servo fingers; // Servo para el efector final
6 // Define el pin para el sensor SN04
7 const int sensorSn04 = 2;
8 bool estadoAnterior = HIGH;
9 void setup() {
10 // Asocia cada servo a un pin específico
11 elbow.attach(8); // Codo en pin 8
12 wrist.attach(9); // Muñeca en pin 9
13 fingers.attach(10); // Dedos en pin 10
14 // Verifica si todos los servos están correctamente conectados
15 if(elbow.attached() && wrist.attached() && fingers.attached()){
16     ResetServos();
17     MoveServos();
18 }
19 // Configura el pin del sensor SN04 como entrada con resistencia de
20 pull-up
21 pinMode(sensorSn04, INPUT_PULLUP);
22 }
23 void ResetServos() {
24 // Establece las posiciones iniciales de los servos
25 int elbowInit = 85; // Posición inicial del codo
26 int wristInit = 0; // Posición inicial de la muñeca
27 int fingerInit = 60; // Posición inicial del efector
28 // Escribe las posiciones iniciales en cada servo
29 fingers.write(fingerInit);
30 elbow.write(elbowInit);
31 wrist.write(wristInit);
32 // Espera hasta que todos los servos alcancen sus posiciones iniciales
33 while(fingers.read() != fingerInit
34 && elbow.read() != elbowInit
35 && wrist.read() != wristInit){
36     delay(1);
37 }
38 }
39 void MoveServos() {
40 // Movimientos secuenciales de los servos
41 // 1.- Mueve el efector final a 60 grados (apertura del efector)
42 int fingers1 = 60;
43 fingers.write(fingers1);
44 // 2.- Mueve el codo a 85 grados
45 int elbow1 = 85;
46 elbow.write(elbow1);
47 }
```

```

48 // 3.- Mueve la muñeca a 30 grados y espera 4 segundos para instalar la
49 botella en el efector
50 int wrist2 = 30;
51 wrist.write(wrist2);
52 delay(4000);
53 // 4.- Mueve los dedos a 90 grados y espera 4 segundos (cierre del
54 efector)
55 int fingers2 = 90;
56 fingers.write(fingers2);
57 delay(4000);
58 // Mueve la muñeca entre 30 y 100 grados (lanzamiento de la botella)
59 for (int deg = 30; deg <= 100; deg+=70){
60     wrist.write(deg);
61 }
62 }
63 void loop(){
64     // Lee el estado del sensor SN04
65     int estado = digitalRead(sensorSn04);
66
67     // Si el sensor se activa, el efector final pasa de 90 a 70 deg
68 (apertura del efector).
69     if (estado == LOW && estadoAnterior == HIGH){
70         fingers.write(70);
71         delay(60);
72         elbow.write(120);
73         delay(6000);
74         fingers.write(90);
75         // Mueve el codo de 120 a 85 grados gradualmente para volver a la
76 posición inicial y queda en modo de espera el brazo robótico.
77         for (int deg = 120; deg >= 85; deg --){
78             elbow.write(deg);
79             delay(1);
80         }
81     }
82     estadoAnterior = estado;
83 }

```

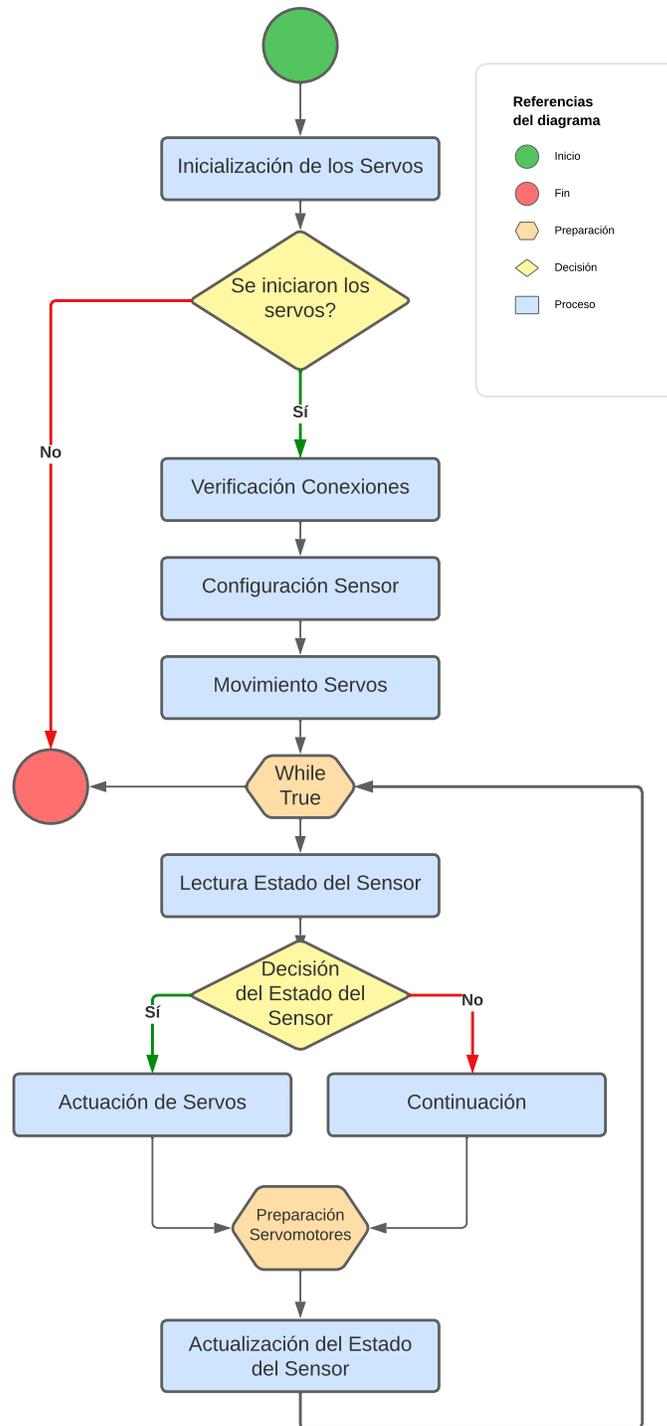


Figura A.4.1 Flujograma del código Arduino para lanzamiento de una botella. Elaboración propia.

Anexo 4.2 Código Matlab para el análisis cinemático de la botella en movimiento mediante el procesamiento de imágenes.

```
1 function [Mtaco, Mtaco2, Tiempo, Theta, Omega, Alpha] = Etapa1()
2
3 % Inicialización de variables y parámetros para el procesamiento de
4 imágenes
5 facq = 400; % Frecuencia de adquisición de las imágenes
6 Thres = 20; % Umbral usado en algún punto del procesamiento (no utilizado
7 en este fragmento)
8 ThresFrame = 250; % Otro umbral (también no utilizado aquí)
9 ConvPix_mm = 213/252.5095; % Factor de conversión de píxeles a milímetros
10 Dir = dir('Img*.tif'); % Directorio de imágenes a procesar
11 tt = 1; % Variable de iteración inicial
12 Im = imread(Dir(tt).name); % Lee la primera imagen
13 % Definición de áreas mínimas y máximas para filtrar objetos en las
14 imágenes
15 Minarea = 5000; % Área mínima
16 Maxarea = 6000; % Área máxima
17 % Procesamiento de una serie de grabaciones
18 % Aquí se procesan las imágenes del brazo robótico
19 seq = double(zeros(641,581,length(Dir)));
20 for tt=1:length(Dir)
21     Im = imread(Dir(tt).name); % Lee cada imagen
22     Im2 = imrotate(Im,-90); % Rota la imagen -90 grados
23     Im3 = 3*Im2(20:660,100:680,:); % Escala y recorta la imagen
24     seq(:, :, tt) = Im3; % Almacena la imagen procesada en un array 3D
25     % Muestra la imagen procesada
26     figure(1);imagesc(Im3);axis image; axis off; colormap gray;
27     title(['Tiempo ' num2str(tt/facq) ' seg']);pause(0.01)
28 end
29 Mmax = max(seq, [], 3); % Encuentra el valor máximo en el tercer eje del
30 array
31 % Generación de la matriz Mtaco
32 Mtaco=[];
33 for ii=1:length(Dir)
34     ImBW = double(Mmax) - double(seq(:, :, ii)) > 15; % Convierte a imagen
35 binaria
36     ImBW2 = imfill(ImBW,4,'holes'); % Rellena huecos en la imagen binaria
37     s = regionprops(ImBW2,'Area','Centroid','Orientation'); % Propiedades
38 de regiones
39     kk =[s.Area] > Minarea & [s.Area] < Maxarea; % Filtra por área
40     s = s(kk); % Aplica el filtro
41     % Muestra las regiones filtradas
42     figure(2);imagesc(ImBW2);axis image;axis off;colormap
43 gray;pause(0.01);
44     hold on
45     % Grafica y almacena datos de las regiones filtradas
46     for ss = 1:length(s)
47         A = s(ss).Centroid;
48
```

```

49
50 plot(A(1),A(2),'o','MarkerFaceColor','m','MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor',
51 'm');pause(0.01);
52     Mtaco = [Mtaco; ii s(ss).Area s(ss).Centroid s(ss).Orientation];
53     end
54     hold off
55 end
56 close(2)
57 % Procesamiento adicional para obtener Mtaco2, Theta, Omega y Alpha
58 Mtaco(:,3) = Mtaco(:,3)*ConvPix_mm; % Convierte la posición X a mm
59 Mtaco(:,4) = Mtaco(:,4)*ConvPix_mm; % Convierte la posición Y a mm
60
61 % Cálculo de Tiempo, Theta, Omega y Alpha
62 Tiempo = Mtaco2(:,1)/facq; % Convierte el índice de imagen a tiempo
63 Theta = deg2rad(rad2deg(unwrap(deg2rad(Mtaco2(:,5)*2))/2)); % Convierte la
64 orientación a radianes y la desenrolla
65
66 Omega = gradient(Theta)*facq; % Calcula la velocidad angular
    Alpha = gradient(Omega)*facq; % Calcula la aceleración angular

```

Anexo 4.3 Código Matlab para la automatización del procesamiento de imágenes en la primera fase de análisis cinemático con el brazo robótico (Etapal)

```
1 % Cambia al directorio que contiene las series de grabaciones del brazo
2 robótico
3 cd /volumes/patricio2/20231103/
4
5 % Busca directorios que comiencen con 'Serie2*' y los almacena en Dir1
6 Dir1 = dir('Serie2*');
7
8 % Itera sobre cada directorio encontrado en Dir1
9 for tt = 1:length(Dir1)
10     % Construye la ruta completa al directorio actual y cambia a él
11     DataDir1 = [Dir1(tt).folder '/' Dir1(tt).name];
12     eval(['cd ' DataDir1])
13
14     % Crea un directorio para resultados si no existe
15     ResultsPath = [DataDir1 '/ResultadosRobotIncompleto']
16     if ~exist(ResultsPath, 'dir')
17         mkdir(ResultsPath)
18     end
19
20     % Busca directorios que comiencen con '21498*' dentro del directorio
21 actual
22     DirDir = dir('21498*');
23
24     % Itera sobre cada directorio encontrado en DirDir
25     for ii = 1:length(DirDir)
26         % Construye la ruta completa al subdirectorio actual y cambia a él
27         DataDir2 = [DirDir(ii).folder '/' DirDir(ii).name]
28         eval(['cd ' DataDir2])
29
30         [Mtaco, Tiempo, Theta, Omega, Alpha] = Etapal(); %Para usarse con
31 Serie220231103
32         % Establece el título de la figura actual con el nombre del
33 directorio
34         title(DirDir(ii).name);
35
36         % Define la ruta para guardar los resultados y cambia a ella
37         DirResultados = [DirDir(ii).folder '/ResultadosRobotIncompleto'];
38         eval(['cd ' DirResultados])
39
40         % Guarda los datos de análisis en un archivo .mat
41         save([ResultsPath '/MtacoRobotIncompleto' DirDir(ii).name '.mat'],
42 'Mtaco', 'Tiempo', 'Theta', 'Omega', 'Alpha')
43
44         % Cierra todas las figuras abiertas
45         close all
46     end
47 end
```

Anexo 4.4 Código Matlab de análisis estadístico, cinemático del lanzamiento de la botella y procesamiento de datos de series temporales.

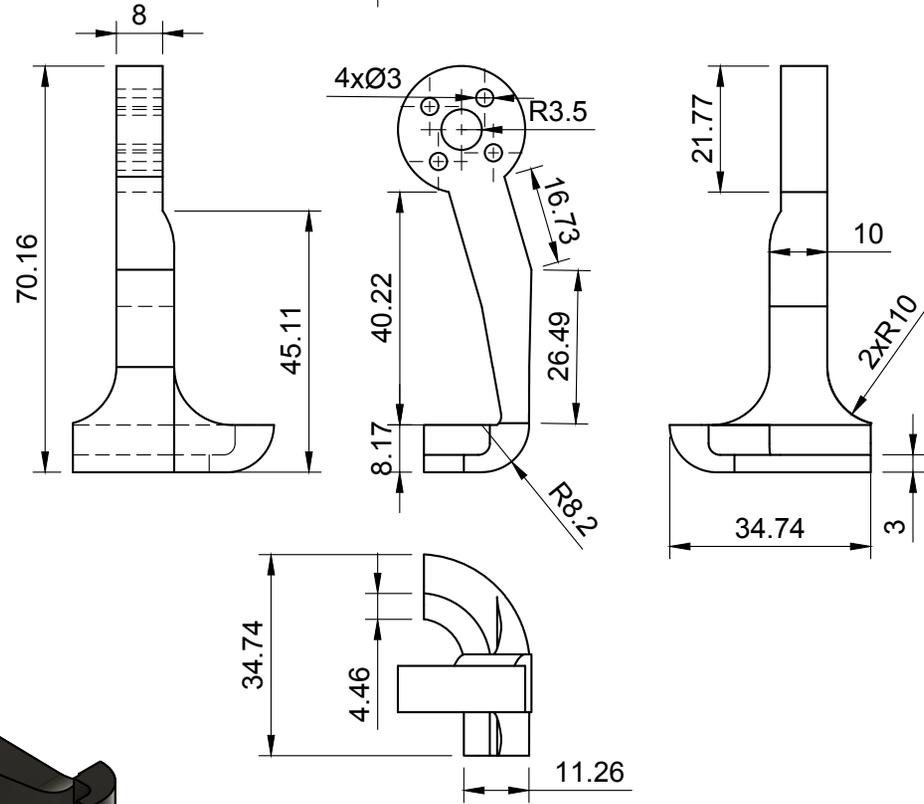
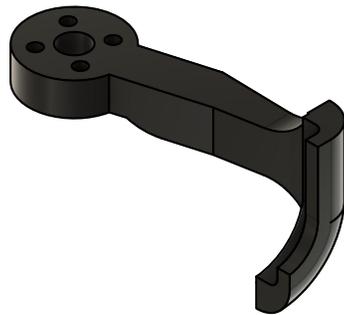
```
1 % Carga los archivos de datos que coinciden con el patrón
2 'DatosMtacos21498*.mat'
3 Dir = dir('DatosMtacos21498*.mat');
4 numFiles = length(Dir); % Número total de archivos encontrados
5 facq = 400; % Frecuencia de adquisición de datos
6 ConvPix_mm = 213/252.5095; % Factor de conversión de píxeles a milímetros
7 para serie 20220316
8 % Inicialización de matrices para almacenar datos seleccionados de Theta y
9 Omega
10 Theta_sel = zeros(numFiles, 2);
11 Omega_sel = zeros(numFiles,2);
12
13 % Parámetros de análisis
14 FracLlenado = 5; % Cantidad de fracciones de llenado
15 maxDataLength =160; % Longitud máxima de datos para acumulación
16 % Inicializar matrices para acumular datos de Theta y Tiempo
17 ThetaAcumulado = zeros(numFiles, maxDataLength);
18 TiempoAcumulado = zeros(numFiles, maxDataLength);
19 % Bucle para procesar cada archivo de datos
20 for i = 1:numFiles
21     % Carga el archivo de datos correspondiente
22     filePath = fullfile(Dir(i).folder, Dir(i).name);
23     data = load(filePath, 'Tiempo', 'Theta', 'Mtaco2');
24
25     % Calcula la distancia de cada valor de Theta a 0.2 y encuentra el
26 mínimo
27     Dist = abs(data.Theta - 0.2);
28     [Valor, Indices] = min(Dist); % Encuentra el valor y el índice mínimos
29     t0 = data.Tiempo(Indices); % Tiempo correspondiente al valor mínimo
30     % Filtra los datos para obtener los nuevos índices basados en
31 condiciones específicas
32     NuevosIndices = data.Tiempo >= t0 & data.Theta(1) <= 0.35;
33     TiempoNuevo = data.Tiempo(NuevosIndices);
34     ThetaNuevo = rad2deg(data.Theta(NuevosIndices));
35
36     % Calcula la velocidad angular (Omega) a partir de ThetaNuevo
37     OmegaNuevo = gradient(ThetaNuevo)*facq;
38     % Calcula promedio y desviación estándar del cuarto elemento de Mtaco2
39     PromedioMtaco2 = mean(data.Mtaco2(:,4));
40     DesvEstMtaco2 = std(PromedioMtaco2);
41     indiceMtaco2 = data.Mtaco2(1,4);
42     % Selecciona y almacena el primer valor de Theta y Omega después de t0
43     indiceTheta = 1;
44     if indiceTheta <= numel(TiempoNuevo)
45         Theta_sel(i, 1) = TiempoNuevo(indiceTheta) - t0;
46         Theta_sel(i, 2) = ThetaNuevo(indiceTheta);
47     end
48
```

```

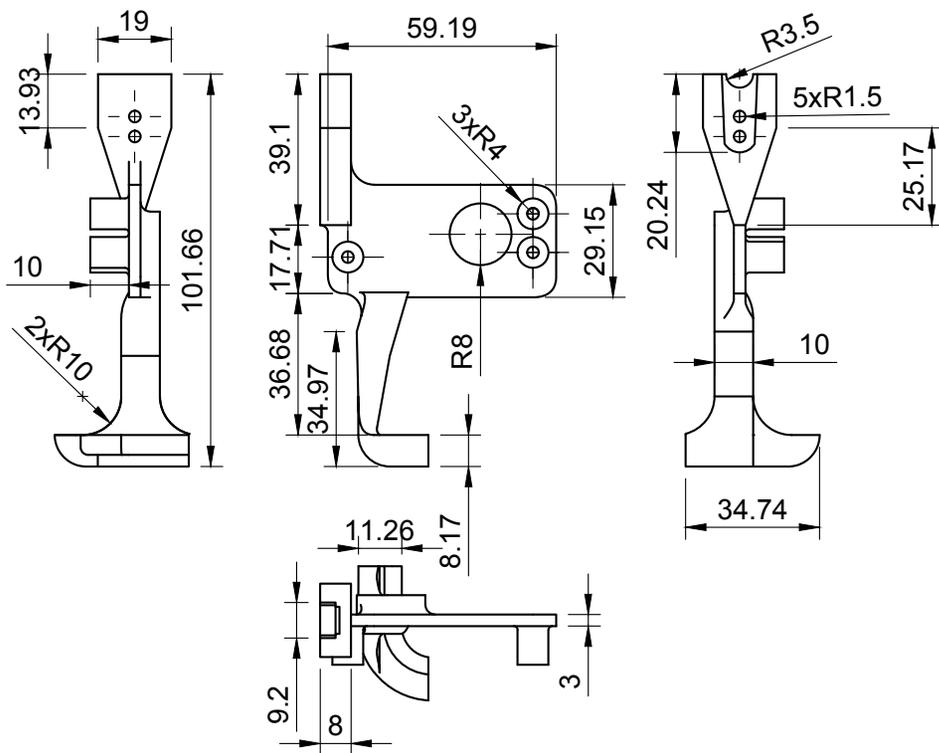
49     indiceOmega = 1;
50     if indiceOmega <= numel(TiempoNuevo)
51         Omega_sel(i, 1) = TiempoNuevo(indiceOmega) - t0;
52         Omega_sel(i, 2) = OmegaNuevo(indiceOmega);
53     end
54
55     % Calcula el promedio y la desviación estándar de Theta_sel y
56 Omega_sel
57     promedioTheta_sel = mean(Theta_sel,1);
58     DesvEstTheta = std(Theta_sel,1);
59     promedioOmega_sel = mean(Omega_sel,1);
60     DesvEstOmega = std(Omega_sel,1);
61     % Calcula el promedio de Theta y Tiempo acumulados, y luego la
62 velocidad angular promedio
63     ThetaPromedio = nanmean(ThetaAcumulado, 1);
64     TiempoPromedio = nanmean(TiempoAcumulado, 1);
65     OmegaPromedio = gradient(ThetaPromedio)*facq;
66 end
67
68 % Limpia todas las variables del espacio de trabajo
69 clear all

```

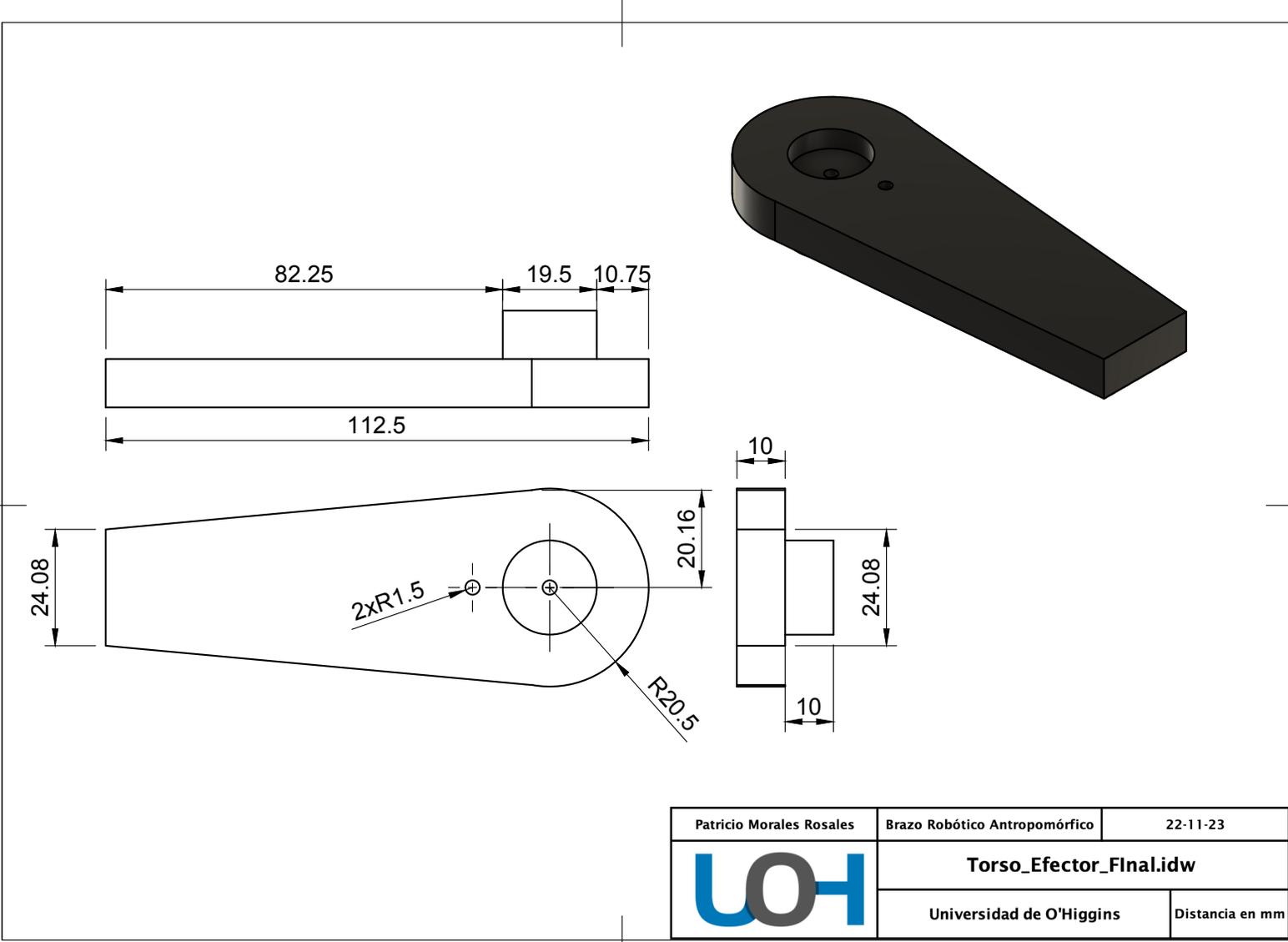
Anexo 5: Planos Brazo Robótico Antropomórfico



Patricio Morales Rosales	Brazo Robótico Antropomórfico	22-11-23
	Pinza_Móvil_Efector_Final.idw	
	Universidad de O'Higgins	Distancia en mm



Patricio Morales Rosales	Brazo Robótico Antropomórfico	22-11-23
	Pinza_Fija_&_Base_Efector_Final.idw	
	Universidad de O'Higgins	Distancia en mm



Patricio Morales Rosales	Brazo Robótico Antropomórfico	22-11-23
	Torso_Efector_Final.idw	
	Universidad de O'Higgins	Distancia en mm

