

**SIMULACIÓN AVANZADA DE UN BRAZO ROBÓTICO CON 2 GRADOS DE LIBERTAD, CONTROLADO EN SIMSCAPE
ADVANCED SIMULATION OF A ROBOTIC ARM WITH 2 DEGREES OF FREEDOM, CONTROLLED IN SIMSCAPE**

Nury Mabell Suárez Figueroa ¹

ORCID: 0009-0006-0161-6327

Universidad Estatal Península de Santa Elena. Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones en Electrónica y Automatización. La Libertad - Santa Elena. Ecuador.

Correo: nury.suarezfigueroa@upse.edu.ec

Adonis Adrian Mora Figueroa²

ORCID: 0009-0009-6684-6205

Universidad Estatal Península de Santa Elena. Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones en Electrónica y Automatización. La Libertad - Santa Elena. Ecuador.

Correo: adonis.morafigueroa2@upse.edu.ec

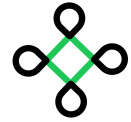
Douglas Jair Suquilanda Tomalá³

ORCID: 0009-0009-6483-4972

Universidad Estatal Península de Santa Elena. Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones en Electrónica y Automatización. La Libertad - Santa Elena. Ecuador.

Correo: douglas.suquilandatomala@upse.edu.ec





RESUMEN

En este proyecto se desarrolló, modeló e implementó un brazo robótico utilizando la plataforma de programación Matlab Simulink. El brazo robótico, fue diseñado con 2 grados de libertad y equipado con tres motores, esto permite un control preciso y coordinado de sus movimientos.

Para la simulación del comportamiento dinámico y cinemático del brazo, se emplearon bloques de Simscape lo que facilitó una representación tridimensional detallada del sistema.

El objetivo principal del proyecto fue demostrar una simulación del brazo robótico, que permite controlar con precisión los ángulos de movimiento a través de una simulación en 3D detallada en Simscape, se pudo visualizar el movimiento y la interacción de los componentes del brazo, validando su capacidad para ejecutar tareas con alta precisión y eficiencia.

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del uso de Simulink y Simscape en el diseño y simulación de sistemas robóticos, resaltando la importancia de estas herramientas para el desarrollo automatizado.

Palabras clave: Brazo robotico, Simscape, PID, Motor DC.

ABSTRACT

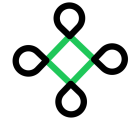
In this project, a robotic arm was developed, modeled and implemented using the Matlab Simulink programming platform. The robotic arm was designed with 2 degrees of freedom and equipped with three motors, this allows precise and coordinated control of its movements.

To simulate the dynamic and kinematic behavior of the arm, Simscape blocks were used, which facilitated a detailed three-dimensional representation of the system.

The results obtained demonstrate the effectiveness of using Simulink and Simscape in the design and simulation of robotic systems, highlighting the importance of these tools for automated development.

Keywords: robotic arm, Simscape, PID, DC Motor.





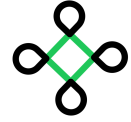
INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la integración de brazos robóticos provenientes de diversas potencias industriales como Estados Unidos, China y Japón está revolucionando el panorama de la industria nacional. Estos dispositivos tecnológicos representan un paso significativo hacia la modernización, como la medicina y el ensamblaje de componentes electrónicos.[1]

En este trabajo se diseñó y simuló un brazo robótico de 2 grados de libertad utilizando Matlab Simulink. El objetivo principal fue evaluar la precisión y velocidad de movimiento del brazo robótico. Este proyecto no solo proporciona una plataforma para futuras investigaciones en el campo de la robótica, sino que también demuestra las posibilidades de utilizar herramientas de simulación avanzadas para optimizar el diseño de sistemas robóticos complejos.[2]

El modelo desarrollado del brazo robótico permite el movimiento a lo largo de dos ejes principales, ofreciendo flexibilidad y precisión para la manipulación de objetos. Cada grado de libertad está controlado por un motor independiente, lo que permite un control preciso de la posición y dirección del brazo. La velocidad de movimiento del brazo se puede ajustar modulando las señales de control enviadas al motor, permitiéndole moverse rápidamente para tareas que requieren destreza, o de manera lenta y controlada para operaciones de alta precisión. Este diseño optimiza el rendimiento del brazo robótico en aplicaciones industriales y de investigación, donde la combinación de velocidad y precisión es fundamental.[3]





MODELO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE UN BRAZO ROBOTICO

Para un brazo robótico con 2 grados de libertad y tres motores, asumimos que el motor 1 que es muestra base, permite el movimiento en el eje X y los motores 2 y 3 permiten el movimiento en los ejes Y y Z .

Motor 1:

- θ_1 : Ángulo del primer motor (variable articular).
- d_1 : Desplazamiento a lo largo del eje Z_0 .
- a_1 : Longitud del enlace en el eje X_1 .
- α_1 : Ángulo entre Z_0 y Z_1 .

Motor 2:

- θ_2 : Ángulo del segundo motor (variable articular).
- d_2 : Desplazamiento a lo largo del eje Z_1 .
- a_2 : Longitud del enlace en el eje X_2 .
- α_2 : Ángulo entre Z_1 y Z_2 .

Motor 3:

- θ_3 : Ángulo del tercer motor (variable articular).
- d_3 : Desplazamiento a lo largo del eje Z_2 .
- a_3 : Longitud del enlace en el eje X_3 .
- α_3 : Ángulo entre Z_2 y Z_3 .

Motor	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	d_1	a	0
2	θ_2	d_2	a	0
3	θ_3	d_3	a	0

Table 1: Parámetros para el brazo robótico



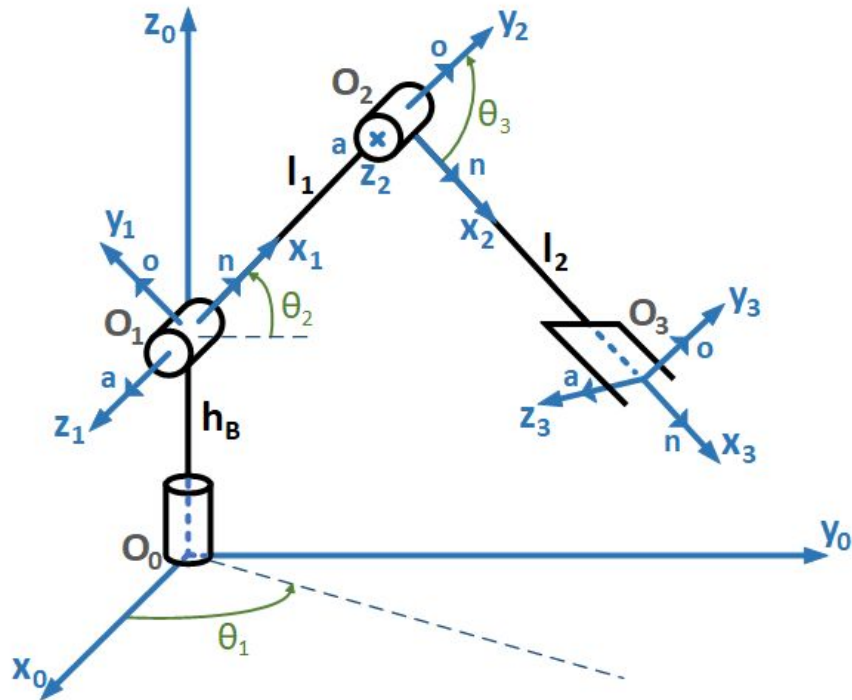
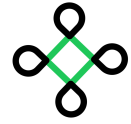


Figure 1: Direccion de los ejes

Para el brazo robótico, las matrices son:

Matriz de Transformación de la Base al Primer Eslabón T_0^1

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

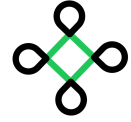
Matriz de Transformación del Primer Eslabón al Segundo Eslabón T_1^2

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matriz de Transformación del Segundo Eslabón al Tercer Eslabón T_2^3

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$





Matriz de Transformación Total

La matriz de transformación total desde la base hasta el efector final es el producto de estas matrices individuales:

$$T_0^3 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \quad (4)$$

Cálculo de la Matriz Total

Multiplicando las matrices 1, 2 y 3:

$$T_0^3 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \quad (5)$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Modelo Dinámico del Sistema

Para la dinámica, necesitamos modelar las ecuaciones de movimiento que incluyen las fuerzas y torques en las articulaciones. Usaremos el enfoque de Euler-Lagrange. [4]

Energía Cinética y Potencial

Para un enlace i , la energía cinética T_i y la energía potencial V_i son:

$$T_i = \frac{1}{2}m_i\dot{x}_i^2 + \frac{1}{2}I_i\dot{\theta}_i^2 \quad (7)$$

Donde m_i es la masa del enlace, I_i es el momento de inercia, \dot{x}_i es la velocidad lineal, $\dot{\theta}_i$ es la velocidad angular, g es la gravedad, y h_i es la altura del centro de masa.

La energía potencial V_i se calcula como el producto de la masa del enlace (m_i), la gravedad (g), y la altura del centro de masa (h_i):

$$V_i = m_i g h_i \quad (8)$$

Esto se deriva de la fórmula general para la energía potencial gravitatoria, que es:

$$V = m_g h \quad (9)$$

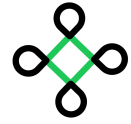
En esta fórmula: - m es la masa del objeto (en este caso, el enlace i), - g es la aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s^2 en la superficie de la Tierra), - h es la altura del objeto (en este caso, la altura del centro de masa del enlace i).

Por lo tanto, para cada enlace i , la energía potencial V_i es simplemente la masa del enlace multiplicada por la aceleración debida a la gravedad y la altura del centro de masa.

Ecuaciones de Euler-Lagrange

La ecuación de Euler-Lagrange para cada articulación es:[5]





$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (10)$$

Donde L es el lagrangiano $L = T - V$ y τ_i es el torque en la articulación i .

Modelado Matemático de los Servomotores

Para cada servomotor, las ecuaciones de un servomotor de DC son:

Ecuaciones Eléctricas del Motor i

$$V_i(t) = L_i \frac{dI_i(t)}{dt} + R_i I_i(t) + K_{ei} \omega_i(t) \quad (11)$$

Ecuaciones Mecánicas del Motor i

$$T_i(t) = K_{Ti} I_i(t) \quad (12)$$

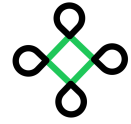
$$J_i \frac{d\omega_i(t)}{dt} + b_i \omega_i(t) = T_i(t) \quad (13)$$

Función de Transferencia del Motor i

Para el caso simplificado sin inductancia ($L_i \approx 0$):

$$\frac{\omega_i(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{K_{Ti}}{J_i}}{R_i s^2 + \left(\frac{b_i}{J_i} \right) s + \frac{K_{Ti} K_{ei}}{J_i}} \quad (14)$$





Formula general de la función de transferencia

$$\frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

Donde:

$$\begin{aligned} K &= 14120 \\ 2\zeta\omega_n &= 46.39 \\ \omega_n^2 &= 471.6 \end{aligned}$$

Resolviendo para ω_n y ζ :

$$\omega_n = \sqrt{471.6} \approx 21.72 \quad (16)$$

$$\zeta = \frac{46.39}{2 \cdot 21.72} \approx 1.067 \quad (17)$$

Entonces, la fórmula general en términos de ζ y ω_n es:

$$G(s) = \frac{14120}{s^2 + 2(1.067)(21.72)s + (21.72)^2} \quad (18)$$

Utilizamos tres funciones de transferencia para modelar los motores del sistema:

$$G_1(s) = \frac{14120}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (19)$$

$$G_2(s) = \frac{18827}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (20)$$

$$G_3(s) = \frac{28240}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (21)$$

Cada función de transferencia reacciona de manera diferente debido a que cada motor soporta una carga distinta, la cual incluye el peso del propio motor y del eslabón correspondiente.

Conversion de grados a radianes

utilizamos la relación de conversión entre grados y radianes:

$$1 \text{ grado} = \frac{180}{\pi} \text{ radianes} \quad (22)$$

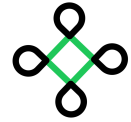
Las funciones de transferencia en radianes son:

$$G_1(s) = \frac{14120 \times \frac{\pi}{180}}{s^2 + 46.39s + 471.6} = \frac{246.579}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (23)$$

$$G_2(s) = \frac{18827 \times \frac{\pi}{180}}{s^2 + 46.39s + 471.6} = \frac{328.523}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (24)$$

$$G_3(s) = \frac{28240 \times \frac{\pi}{180}}{s^2 + 46.39s + 471.6} = \frac{492.665}{s^2 + 46.39s + 471.6} \quad (25)$$





Modelado cinemático del brazo robotico

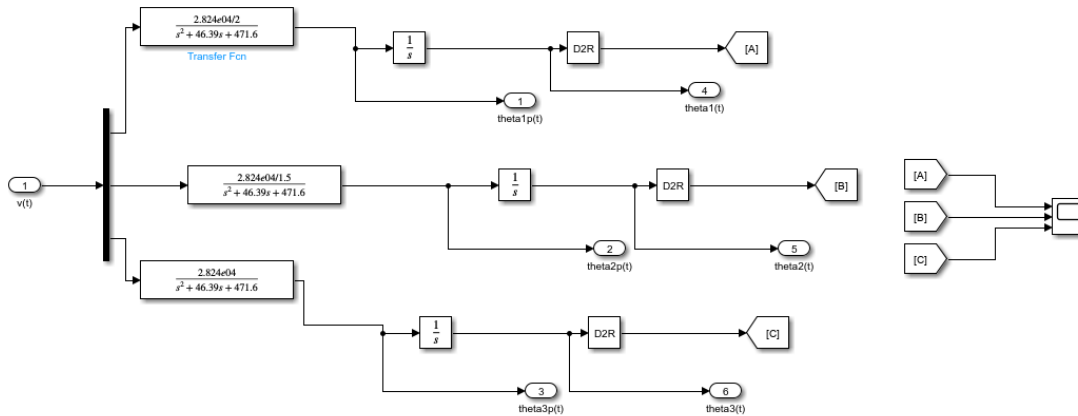


Figure 2: Esquema cinemático

Se utilizaron bloques de Simulink para realizar el análisis cinemático del brazo, permitiendo calcular las posiciones y orientaciones de las articulaciones basadas en los ángulos de entrada.

Respuesta del modelo cinemático

Motor 1 (línea azul): Este motor parece tener una respuesta más estable y menos oscilatoria comparada con los otros dos motores.

Motor 2 (línea naranja): Este motor muestra una respuesta con oscilaciones más amplias en comparación con el motor uno, pero menos amplias que el motor tres.

Motor 3 (línea amarilla): Este motor tiene la respuesta más oscilatoria y menos estable entre los tres motores, con oscilaciones más pronunciadas.

Amortiguamiento y Estabilidad

El **motor 1** tiene un mejor amortiguamiento y se estabiliza más rápidamente.

El **motor 2** presenta un amortiguamiento moderado y una mayor oscilación.

El **motor 3** muestra el menor amortiguamiento, resultando en una respuesta más oscilatoria.



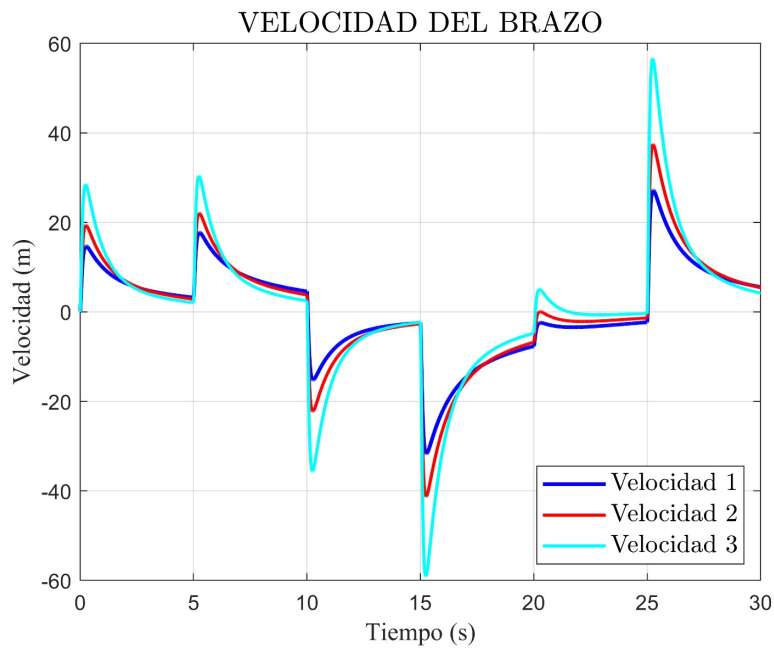
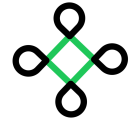


Figure 3: Respuesta del modelo cinemático

Respuesta de la velocidad

- **Posición 1 (línea azul):** Este motor muestra una respuesta más estable comparada con las otras posiciones. La curva azul tiene menos oscilaciones y se mantiene más cerca de la línea objetivo, lo que sugiere un control más preciso.
- **Posición 2 (línea roja):** Esta configuración presenta una respuesta moderadamente estable, aunque con más oscilaciones que la posición 1. La curva roja muestra una buena respuesta inicial, pero hay cierta desviación a lo largo del tiempo.
- **Posición 3 (línea cyan):** Esta configuración presenta la mayor cantidad de oscilaciones y desviaciones. La curva cyan se desvía más de la línea objetivo y tiene una respuesta menos estable en comparación con las otras dos posiciones.

Entre las tres configuraciones evaluadas, la posición 1 (línea azul) proporciona la respuesta más estable y precisa del brazo robótico, mientras que la posición 3 (línea cyan) es la menos estable, con mayores oscilaciones y desviaciones. Por lo tanto, para aplicaciones que requieran alta precisión y estabilidad, la configuración representada por la posición 1 sería la más adecuada.



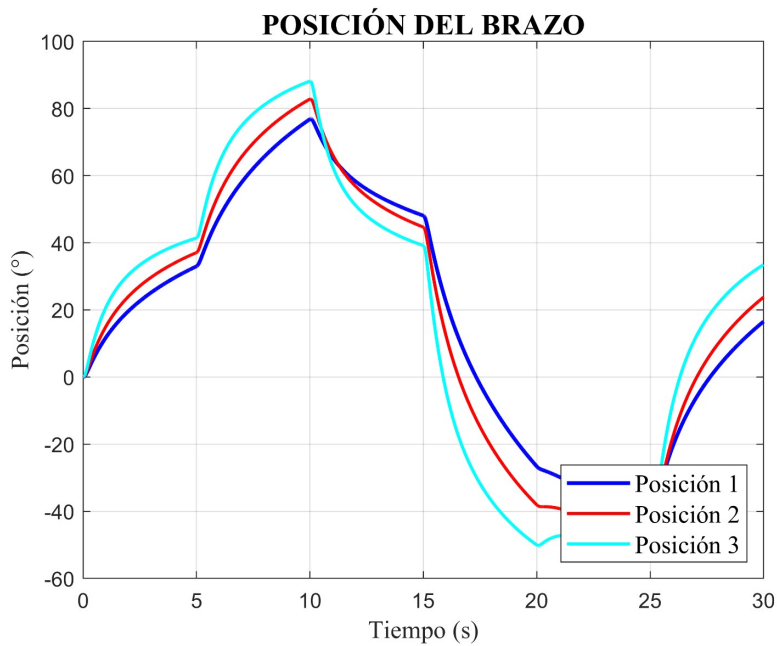
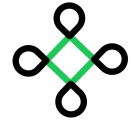


Figure 4: posicion del brazo

Modelado dinámico del brazo robotico

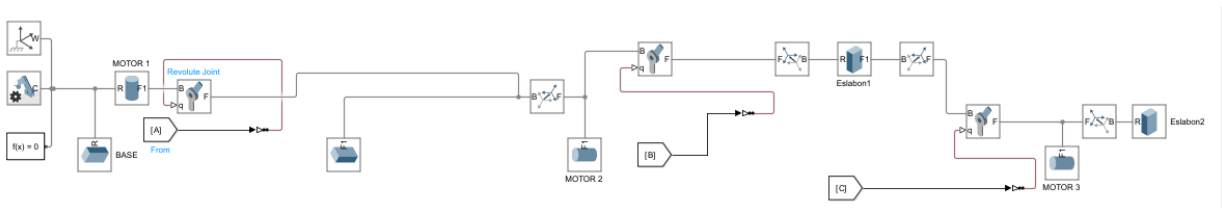
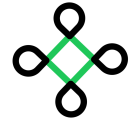


Figure 5: Esquema dinámico

Para simular el comportamiento dinámico del brazo robótico, se emplearon bloques de Simscape que facilitan la simulación de las propiedades físicas del sistema, tales como la masa, la inercia y las fuerzas que actúan sobre él.

- **Fuente de señal:** Genera la señal de entrada que se utiliza para controlar los motores del brazo robótico.
- **Motores (Motor 1, Motor 2, Motor 3):** Actúan como actuadores para mover las articulaciones del brazo robótico. Cada motor está conectado a una articulación específica y recibe la señal de control para generar el movimiento deseado.
- **Base:** Representa la base fija del brazo robótico, sobre la cual se montan las articulaciones y los eslabones.





- **Eslabones (Eslabon1, Eslabon2):** Conectan las articulaciones del brazo robótico. Cada eslabón transmite el movimiento desde un motor a la siguiente articulación.
- **Transformaciones rígidas (Rigid Transform):** Aseguran la correcta orientación y posición de los eslabones y las articulaciones en el espacio tridimensional.
- **Bloques de retroalimentación (A, B, C):** Reciben la información de posición y velocidad de cada articulación para retroalimentar al sistema de control y ajustar las señales de los motores en tiempo real.

Simulación del brazo robótico en 3D

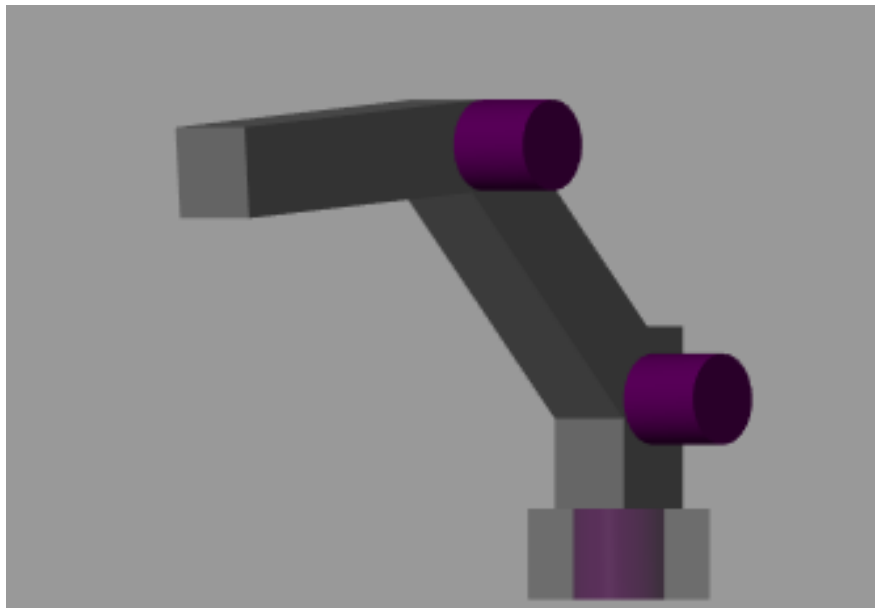
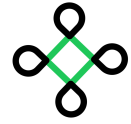


Figure 6: Brazo robótico en 3D

El brazo robótico fue diseñado con dos grados de libertad y tres motores, permitiendo un control preciso de sus movimientos. El diseño se implementó utilizando bloques de Simulink y Simscape para crear una representación tridimensional detallada del sistema.

Para visualizar el movimiento del brazo robótico, se utilizó la herramienta de visualización 3D de Simscape, que permite observar la interacción y el comportamiento dinámico del sistema en un entorno tridimensional.





Ubicación de motores del brazo robótico en 3D

Motor 1

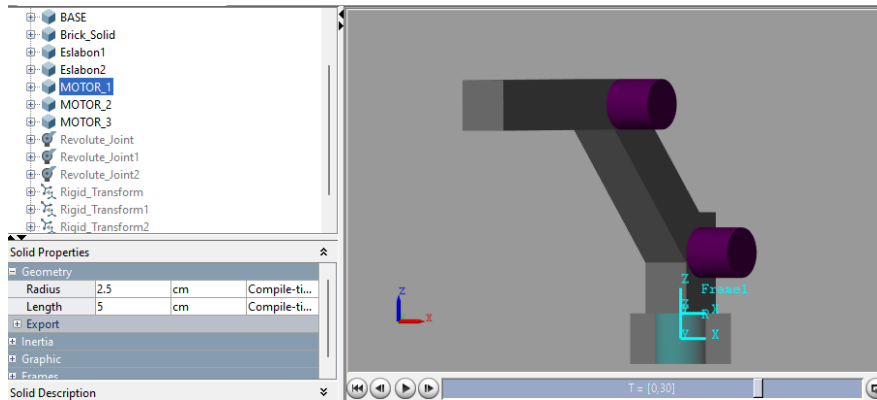


Figure 7: Ubicación del motor 1

Esta ubicado en la base del primer eslabón del brazo robótico, con un radio de 2.5 cm y una longitud de 5 cm, es esencial para controlar el movimiento angular del primer eslabón, permitiendo su rotación respecto a la base fija y facilitando así el primer grado de libertad del sistema.

Motor 2

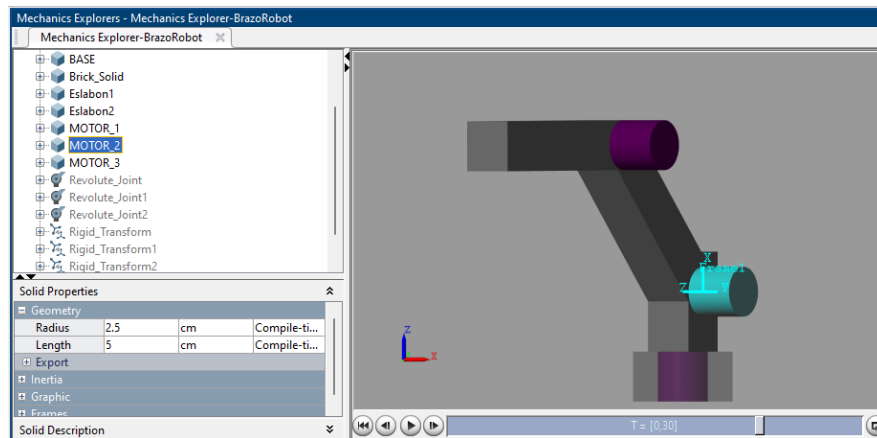
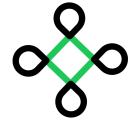


Figure 8: Ubicación del motor 2

Está situado entre el Eslabón 1 y el Eslabón 2, con un radio de 2.5 cm y una longitud de 5 cm, permitiendo el movimiento articulado de estos componentes.

Su función es esencial para el control y la movilidad del brazo, trabajando en conjunto con otros motores para lograr movimientos precisos y coordinados.





Motor 3

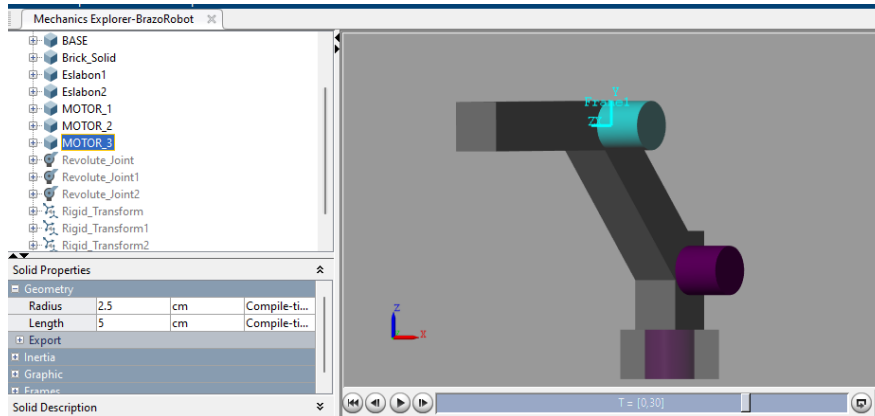
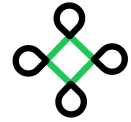


Figure 9: Ubicación del motor 3

El motor 3: Esta ubicado en la parte superior, se distingue por su menor peso y su capacidad para poder desplazarse de una manera mas rápida que el motor 1 y 2





Respuesta del brazo robotico con controlador PID

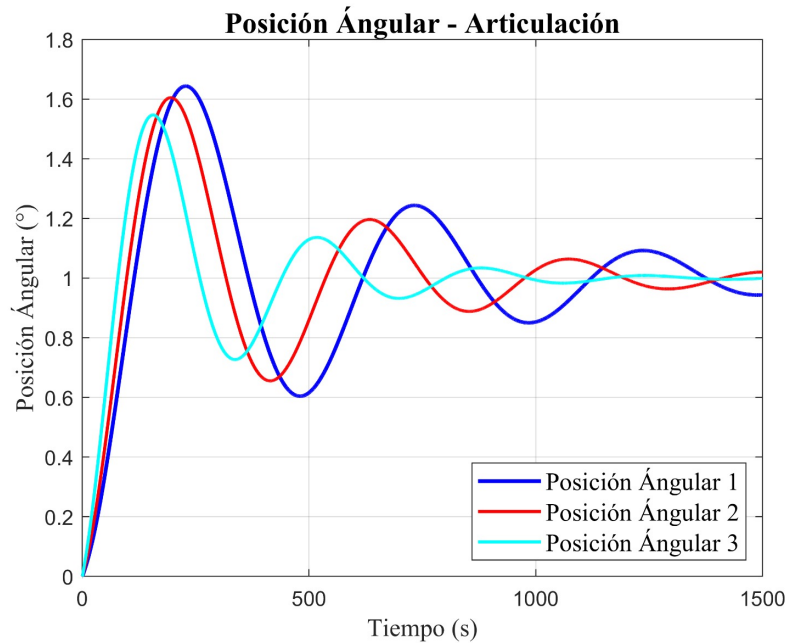


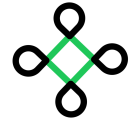
Figure 10: Controlador PID

Respuesta articulación 1 (línea azul): Esta línea alcanza un valor máximo de aproximadamente 1.7 antes de oscilar y eventualmente estabilizarse.

Respuesta articulación 2 (línea naranja): Esta línea también muestra un pico inicial alto, alrededor de 1.6, seguido de oscilaciones antes de estabilizarse.

Respuesta articulación 3 (línea amarillo): esta línea tiene un pico inicial alrededor de 1.5 y oscila antes de estabilizarse.





RESULTADOS DE MIS SISTEMA

Articulacion	1	2	3
I/o%	IN(1) to y	IN(1) to y	IN(1) to y
Peak deviation	1.1	1.08	1.1
Overshoot(%)	10.4	8.27	10.2
At time (seconds)	22.1	19	0.12
Rise time(seconds)	7.58	6.08	4.35
Settling time(seconds)	59.4	52.4	0.913
Transient time(seconds)	59.4	52.4	0.913
Final value	1	1	1

Table 2: Tabla de parametros de las articulaciones

La articulación 1 presenta el comportamiento más uniforme, pero es la más lenta en alcanzar la estabilidad y en su respuesta general.

La articulación 2, aunque ligeramente más lenta, destaca por tener el menor overshoot.

La articulación 3 muestra el mejor rendimiento en términos de tiempos de subida, establecimiento y transitorio, alcanzando su valor final rápidamente y con mínima desviación.

PRUEBAS DE LAS POSICIONES ANGULARES DE LAS ARTICULACIONES

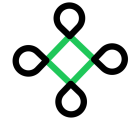
Articulación	1	2	3
I/o (%)	IN (1) to y	IN (1) to y	IN (1) to y
Desviación máxima	1.64	1.6	1.54
Sobreimpulso (%)	69.7	60.4	54.4
Tiempo inicial (s)	23.9	19.7	15.6
Tiempo de subida (s)	8.61	7.4	5.99
Tiempo de asentamiento (s)	0.913	0.913	0.913
Tiempo transitorio (s)	58	44	935
Valor final	1	1	1

Table 3: Pruebas de las articulaciones del motor (Tabla 2)

la Tabla 1 muestra una mejora continua en la precisión y la rapidez de respuesta de las articulaciones del motor a medida que se avanza de la articulación 1 a la 3.

La Tabla 2, aunque presenta tiempos de respuesta más largos, también muestra una mejora en la precisión y una reducción del sobreimpulso.





CONCLUSIONES

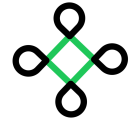
Este proyecto demuestra el desarrollo, modelado e implementación del brazo robótico utilizando Matlab Simulink, el diseño de 2 grados de libertad y la integración de tres motores han permitido un control preciso y coordinado de los movimientos del brazo.

El uso de bloques de Simscape para la simulación del comportamiento dinámico y cinemático del sistema ha proporcionado una representación tridimensional detallada y realista.

La validación a través de simulaciones 3D no solo confirmó la eficacia del sistema, sino que también resaltó la robustez y la capacidad del entorno de simulación para manejar proyectos robóticos complejos.

Este trabajo establece una base sólida para investigaciones futuras y el desarrollo práctico en robótica, proporcionando un punto de partida confiable para la mejora continua y la innovación, el éxito del proyecto destaca la importancia y el potencial de las herramientas de simulación avanzadas en educación e investigación, contribuyendo significativamente a una comprensión más profunda de los sistemas de control y sus aplicaciones en la industria moderna.





References

- [1] Borja M Sistema de Control de Brazo Robótico para experimentar la cinemática inversa y planificación de trayectoria en entornos académicos INTERCON 2014
- [2] Universidad Politécnica de Valencia. (2020). Design and simulation of a 2-degree-of-freedom robotic arm using MATLAB Simulink. *Robotics and Artificial Intelligence*, 7(1), 23-31.
- [3] Instituto Tecnológico Nacional de México (ITNM) Celaya. (2019). Design and simulation of a 2-degree-of-freedom robotic arm using MATLAB Simulink. *Pistas Educativas*, 5(2), 45-53.
- [4] Ecuaciones de Lagrange (CRM) Universidad Sevilla, España (2023).
- [5] *Robótica, Visión y Control en MATLAB®*, (Springer Tracts in Advanced Robotics Book 118) (2011).

