

Informe Técnico de Ingeniería: Mecanismo 2R de Movimiento Controlado

Yovany Esneider Vargas Gutierrez
Ingeniería Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
yvargasgu@unal.edu.co

David Andrés Ricaurte de Lima
Ingeniería Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
dricaurte@unal.edu.co

Brian Enrique Muñoz García
Ingeniería Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
bmunozg@unal.edu.co

Abstract—This academic project involves the design, implementation, and validation of a 2R mechanism with 2 degrees of freedom (DOF) that can automatically follow a predefined "stylized clover" trajectory. The project emphasizes collaborative learning through Problem-Based Learning (PBL) and includes modeling, simulations, and physical experiments. The mechanism operates in a vertical plane with two motorized rotational joints, with trajectory tracking and real-time visualization.

Index Terms—2R Mechanism, Servomechanism, Problem-Based Learning (PBL), Degrees of Freedom (DOF), Controlled Trajectory, Collaborative Work, Mechatronics Engineering.

I. INTRODUCCIÓN

A. Descripción del Problema

El problema que se busca resolver en este proyecto es el desarrollo y validación de un mecanismo 2R con 2 grados de libertad (DOF) capaz de seguir una trayectoria predefinida en un plano vertical. Este mecanismo es esencial en aplicaciones donde se requiere un control preciso del movimiento, como en robots o sistemas automatizados. La dificultad radica en garantizar que el mecanismo siga la trayectoria con precisión, manteniendo una velocidad constante y permitiendo ajustes de escala y rotación, lo cual es fundamental para aplicaciones industriales y de investigación.

B. Objetivos

1) Objetivo General:

- Concebir, diseñar, implementar y validar un mecanismo 2R controlado que siga una trayectoria definida con precisión.

2) Objetivos Específicos:

- Realizar el modelado matemático y simulaciones del mecanismo 2R.
- Implementar físicamente el mecanismo y sus componentes motorizados.
- Desarrollar un sistema de control que permita la automatización del seguimiento de la trayectoria.
- Validar el funcionamiento del mecanismo mediante pruebas experimentales y comparación con la trayectoria deseada.

- Promover el aprendizaje colaborativo y la gestión eficiente del proyecto en equipo.

C. Alcance del Proyecto

Este proyecto abarca desde la concepción hasta la validación de un mecanismo 2R controlado, limitándose a operar en un plano vertical con dos articulaciones rotacionales. Las consideraciones especiales incluyen el desarrollo de un sistema de control que permita el ajuste de la escala de la trayectoria hasta un factor de 1.33 y la rotación de hasta 45 grados. Se debe garantizar una velocidad constante en el seguimiento de la trayectoria, que varía entre 1 y 10 cm/s. Las limitaciones incluyen la precisión del seguimiento de la trayectoria y la cantidad de ciclos que el mecanismo puede realizar, con un máximo de 10 ciclos en operación continua.

II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE INGENIERÍA

A. Conceptualización del Mecanismo 2R

El mecanismo 2R es un sistema mecánico compuesto por dos eslabones móviles conectados mediante articulaciones rotacionales, conocidas como juntas R (revolutas). Este tipo de mecanismo se caracteriza por su capacidad de moverse en un plano bidimensional, lo que lo convierte en un sistema con 2 grados de libertad (DOF). Cada grado de libertad corresponde a la rotación independiente de cada eslabón en torno a su respectiva articulación.

En un mecanismo 2R, la posición y orientación del extremo distal del segundo eslabón (o efector final) dependen de los ángulos de rotación en las dos juntas. Esto se representa matemáticamente mediante un conjunto de ecuaciones que describen la cinemática directa e inversa del sistema. La cinemática directa calcula la posición del efector final a partir de los ángulos de las juntas, mientras que la cinemática inversa determina los ángulos necesarios para que el efector final alcance una posición deseada.

B. Modelado Matemático

1) Definición del perfil de movimiento: A continuación se muestran las gráficas de perfil de movimiento para cuando

se configuran 4 pétalos, que indica un tamaño de 1.33 y una redondez de 1.75:



Fig. 1: Perfil de posición para el motor 1. cuando dibuja 4 Pétalos

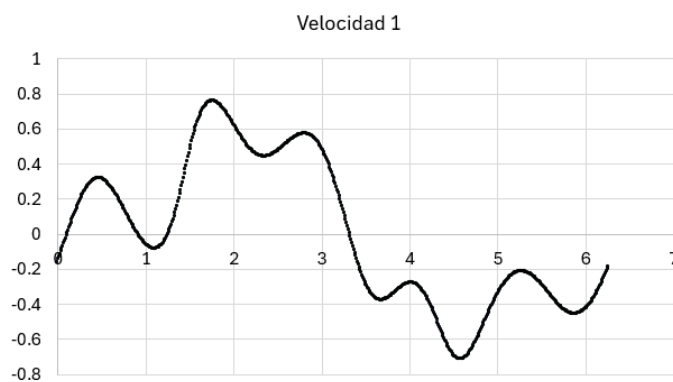


Fig. 2: Perfil de velocidad para el motor 1. cuando dibuja 4 Pétalos



Fig. 3: Perfil de aceleración para el motor 1. cuando dibuja 4 Pétalos

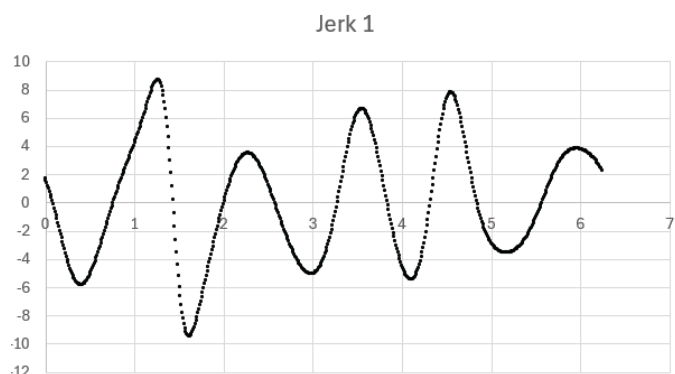


Fig. 4: Perfil de jerk para el motor 1. cuando dibuja 4 Pétalos

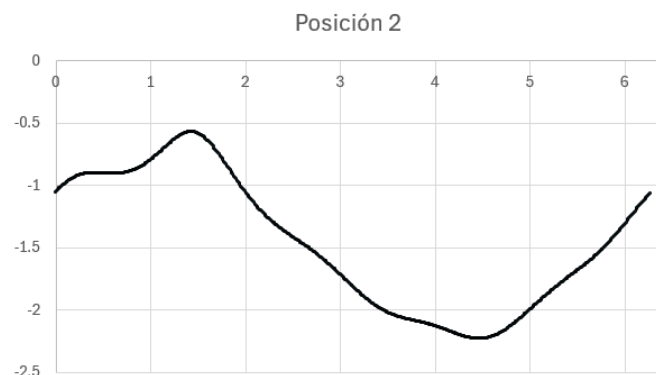


Fig. 5: Perfil de posición para el motor 2. cuando dibuja 4 Pétalos

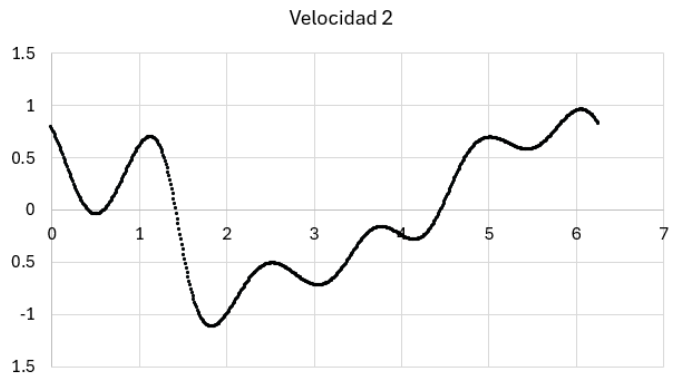


Fig. 6: Perfil de velocidad para el motor 2. cuando dibuja 4 Pétalos

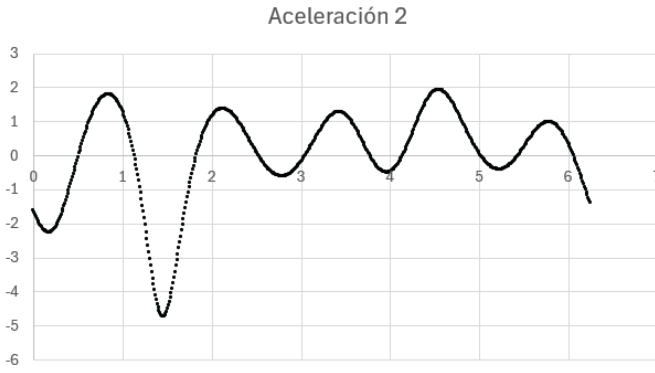


Fig. 7: Perfil de aceleración para el motor 2. cuando dibuja 4 Petalos

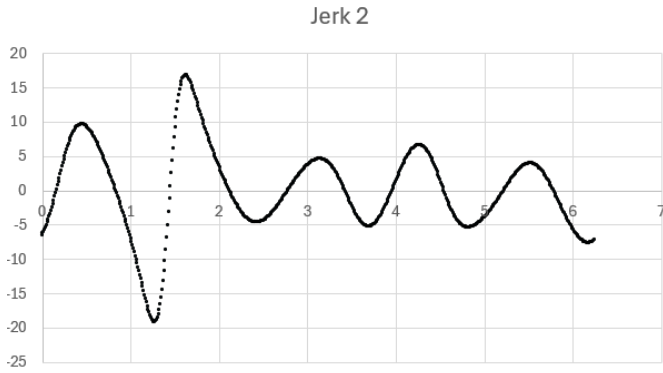


Fig. 8: Perfil de jerk para el motor 2. cuando dibuja 4 Petalos

2) *Cinemática directa*: A continuación se presenta el diagrama en el que se asignan los marcos de referencia según la convención DH:

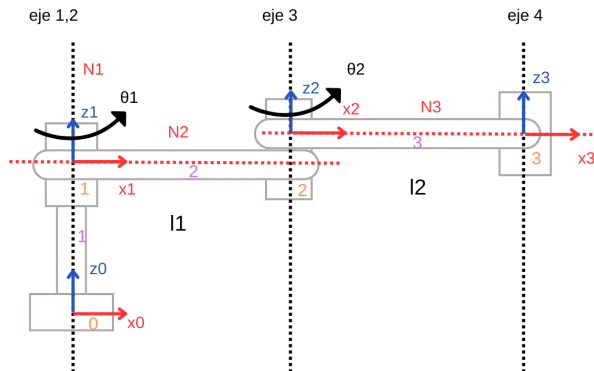


Fig. 9: Diagrama DH

A continuación se presenta la tabla de parámetros DH:

i	θ_i	d_i	a_i	α_i	$offset$
1	0	0	0	0	0
2	q_1	0	l_1	0	0
3	q_2	0	l_2	0	0

Fig. 10: Tabla de parámetros DH

Las rotaciones y traslaciones que se realizan para llegar a la matriz del origen a la punta son:

$$rot(z) * transl(z) * transl(x) * rot(x)$$

A continuación se presentan las matrices T_{01}, T_{12}, T_{23}

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 11: Matriz T_{01}

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cdot \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \cdot \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 12: Matriz T_{12}

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cdot \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \cdot \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 13: Matriz T_{23}

Ahora, para hallar la matriz para un punto a que se alcanza con θ_1 y θ_2 :

$$T_{03} = T_{01} * T_{12} * T_{23}$$

$T_{03} =$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & -\sigma_3 - \sigma_2 & 0 & l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) - l_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \\ \sigma_3 + \sigma_2 & \sigma_1 & 0 & l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

where

$$\sigma_1 = \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) - \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)$$

$$\sigma_2 = \cos(\theta_2) \sin(\theta_1)$$

$$\sigma_3 = \cos(\theta_1) \sin(\theta_2)$$

Fig. 14: Matriz T_{03}

A continuación se desarrolla la cinemática inversa:

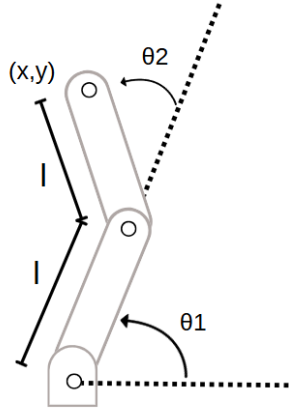


Fig. 15: Diagrama del mecanismo

Primero se definen los ángulos:

$$\theta_1 = \frac{\beta + \gamma}{2}$$

$$\beta = \theta_1 + \theta_3, \beta = 2 \arctan 2(y/x)$$

$$\gamma = \theta_1 - \theta_3, \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{2}\right) = \frac{x}{2l \cdot \cos(\beta/2)}$$

$$\sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{2}\right) = \sqrt{1 - \cos^2\left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{2}\right)}$$

$$\gamma = 2 \cdot \arctan 2\left(\sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{2}\right), \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{2}\right)\right)$$

$$\theta_2 = \theta_3 - \theta_1$$

$$\theta_2 = \beta - 2\theta_1$$

Estas ecuaciones surgen de la matriz T_{03} , bajo la condición de que $l_1 = l_2$, y haciendo uso de identidades trigonométricas como el producto de senos y cosenos. Además de las ecuaciones 1 y 2 que describen la trayectoria seguir.

$$x = S \cdot Si \cdot (\cos(t \cdot Le + R) + Ro) \cdot \cos(t) + O_x \quad (1)$$

$$y = S \cdot Si \cdot (\cos(t \cdot Le + R) + Ro) \cdot \sin(t) + O_y \quad (2)$$

$$S = Scale, \quad R = Rotation$$

$$Si = Size, \quad Ro = Roundness$$

$$Le = Leafets, \quad O_x, O_y = Offsets \ x \ \& \ y$$

C. Selección de motores

Para la selección de motores, se tomó el caso donde el motor ejerce el mayor torque, siendo este cuando los brazos están a nivel del suelo. Por ello, la sumatoria de torques constaría de dos componentes.

$$\tau_m = I \cdot \alpha + \tau_g$$

Motor 1

$$\tau_{m1} = 6,60983e^{-3} Kg \cdot m^2 \cdot 0,95 \frac{rad}{s^2} + 0,142m \cdot 0,142Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$\tau_{m1} = 0,2Nm$$

$$R.P.M_1 = 4,46r.p.m.$$

Se seleccionó un motor DC, de 12 V. Con 0,6 Nm y 150 r.p.m.

Motor 2

$$\tau_{m1} = 1,98231e^{-3} Kg \cdot m^2 \cdot 1,47 \frac{rad}{s^2} + 0,057m \cdot 0,018Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$\tau_{m1} = 0,01Nm$$

$$R.P.M_1 = 6,56r.p.m.$$

Se seleccionó un motor DC, de 12 V. Con 0,14 Nm y 130 r.p.m.

D. Caracterización de motores

Para la caracterización de motores se suministro el nivel de PWM necesario para mover el mecanismo, en 5 ocasiones. Tomando como valor para K_m y τ_m la media de las 5 medidas.

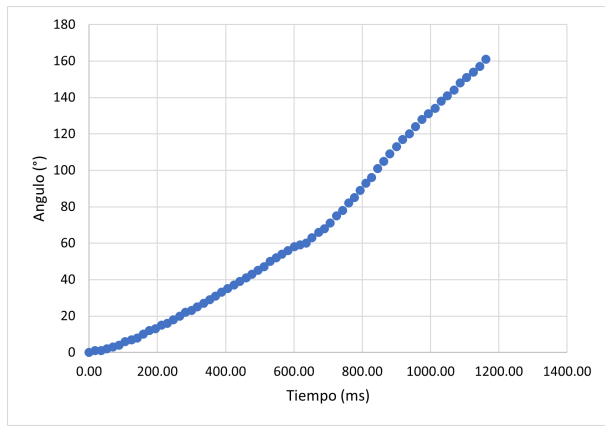


Fig. 16: Datos experimentales, motor 1.

Obteniendo un $K_{m1} = 1,9 \frac{v \cdot rad}{s}$, y un $\tau_{m1} = 300ms$.

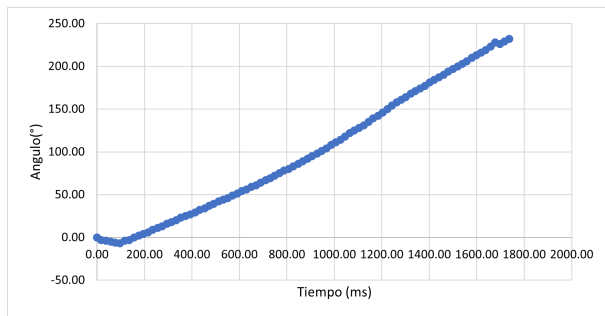


Fig. 17: Datos experimentales, motor 2.

Obteniendo un $K_{m2} = 11 \frac{v \cdot rad}{s}$, y un $\tau_{m2} = 375ms$.

E. Simulación

Simulaciones del sistema de control realizadas con simulink para el motor 1:

Nota: Las constantes P y D del controlador son 7 y 1,16 respectivamente.

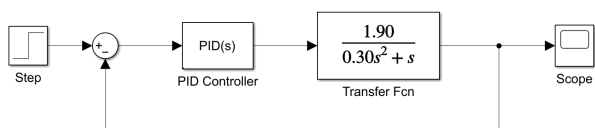


Fig. 18: Diagrama de bloques para el motor de la base

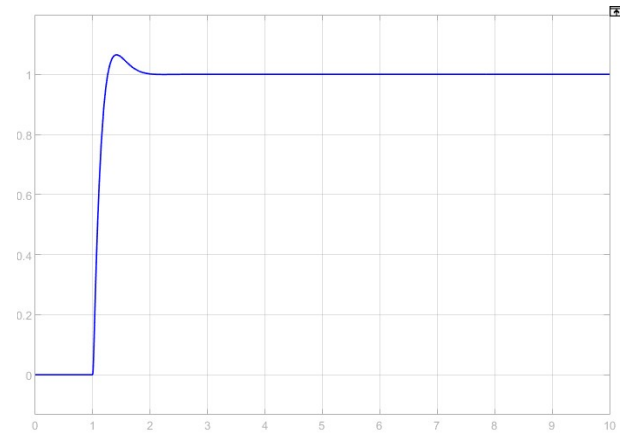


Fig. 19: Respuesta de control para el Motor de la base

Simulaciones del sistema de control realizadas con simulink para el motor 2: Nota: Las constantes P y D del controlador son 10 y 1,72 respectivamente.

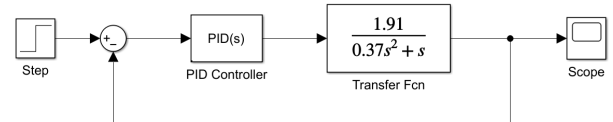


Fig. 20: Diagrama de bloques para el motor de la base

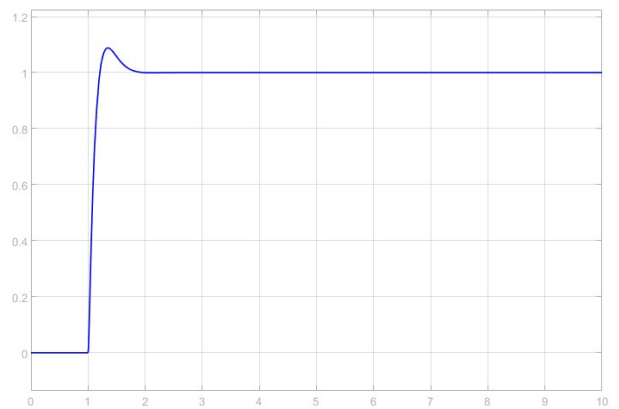


Fig. 21: Respuesta de control para el Motor de la base

F. Modelado CAD del sistema

Definidas las dimensiones de las articulaciones y sus rangos de movimiento, se diseño el mecanismo utilizando Autodesk Inventor para su modelado CAD.

Se diseñaron las piezas para ser fabricadas en policarbonato, respetando las distancias entre ejes definidas anteriormente, y asegurando el correcto montaje de los motores y los encoders.

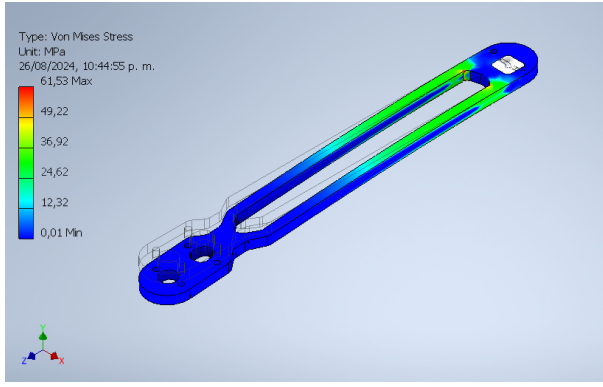


Fig. 22: Análisis de esfuerzo

Para la optimización del diseño de los brazos del mecanismo, se hizo un análisis de esfuerzos acompañado de un diseño generativo para encontrar una geometría que soportara las cargas requeridas, pero que ahorrara en material y redujera el peso, esto para disminuir el momento de inercia de las piezas, y por ende la carga reflejada en los motores.

Diseñadas todas las piezas, se hizo el modelo del ensamble completo del mecanismo, de esta manera se pudo verificar la compatibilidad mecánica de las piezas así como obtener el cálculo de los momentos de inercia en los dos ejes de rotación.

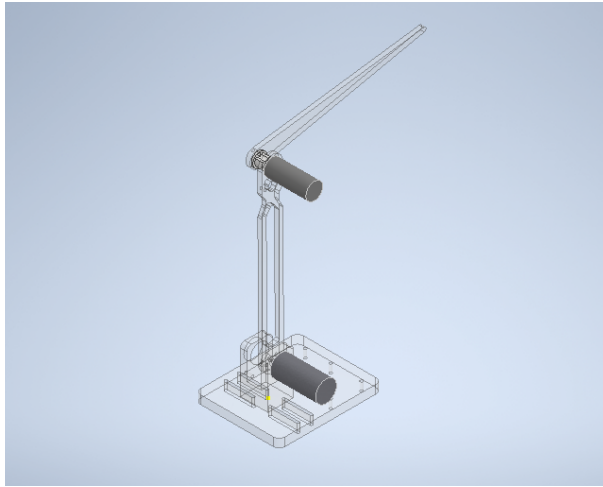


Fig. 23: Ensamble del mecanismo

G. Diseño del Sistema de Control

Descripción del sistema de control propuesto, incluyendo los algoritmos de control, diagrama de bloques y su implementación.

La expresión que describe la función de transferencia del controlador PID es:

$$PID = \frac{K_p s + K_i + K_s s^2}{s}$$

Por otra parte la función de transferencia de la planta es:

$$G(s) = \frac{K_{m'}}{s(\tau_m s + 1)}$$

Realizando la operación de bloques para hallar la función de transferencia del sistema sin retroalimentación queda:

$$G_1(s) = \frac{K_{m'}(K_d s^2 + K_p s + k_i)}{s^2(\tau_m s + 1)}$$

Realizando la operación de bloques para hallar la función de transferencia del sistema con retroalimentación queda:

$$T(s) = \frac{K_{m'}(K_d s^2 + K_p s + k_i)}{K_{m'}(K_d s^2 + K_p s + k_i) + s^2(\tau_m s + 1)}$$

Expandiendo el denominador:

$$T(s) = \frac{K_{m'}(K_d s^2 + K_p s + k_i)}{K_{m'}K_d s^2 + K_{m'}K_p s + K_{m'}k_i + s^3\tau_m + s^2}$$

$$T(s) = \frac{K_{m'}(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^3\tau_m + s^2(K_{m'}K_d + 1) + s(K_{m'}K_p) + K_{m'}K_i}$$

Reorganizando y tomando $K_i = 0$, debido a que el controlador no tendrá integrador, queda:

$$T(s) = \frac{\frac{K_{m'}}{\tau_m}(K_d s + K_p)}{s^2 + s\left(\frac{K_{m'}K_d + 1}{\tau_m}\right) + \frac{K_{m'}K_p}{\tau_m}}$$

$$2\zeta W_n = \left(\frac{K_{m'}K_d + 1}{\tau_m}\right)$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_{m'}\tau_m K_p}}(K_{m'}K_d + 1)$$

$$\zeta \approx 0.8$$

$$K_{p1} = 8$$

$$K_{d1} = 1.28$$

$$K_{p2} = 11$$

$$K_{d2} = 1.83$$

Donde $K_p > K_d$, permitiendo modificar el factor de amortiguación del sistema ζ .

III. IMPLEMENTACIÓN

A. Descripción de Componentes

- Encoders Magnético AS5600: Estos encoders son sensores de posición rotativos que utilizan un campo magnético para determinar la posición angular. Ofrecen una resolución de 12 bits, lo que permite una precisión de 0.087 grados. Son ideales para aplicaciones que requieren mediciones precisas de ángulos.

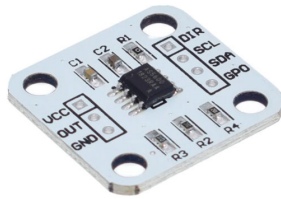


Fig. 24: Encoder Magnético AS5600

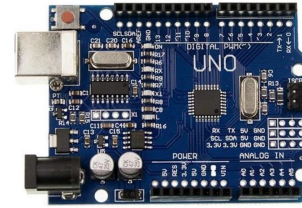


Fig. 27: Arduino UNO R3

- Motor de la base: Motorreductor 6 Kg*cm - 130 RPM (12V) 25GA, con engranajes metálicos



Fig. 25: Motor de la base

- Motor del segundo brazo: Referencia JF310. Motorreductor Dc 1.5 Kgr cm 12v 150 Rpm Eje Centrado



Fig. 26: Motor del segundo brazo

- Puente H L298N: es un motor driver con un doble puente H que nos permite manejar dos motores de corriente continua o un motor paso a paso bipolar de entre 5V y 35V y de hasta 2 amperios, controlando la velocidad y el sentido de giro de nuestros motores.

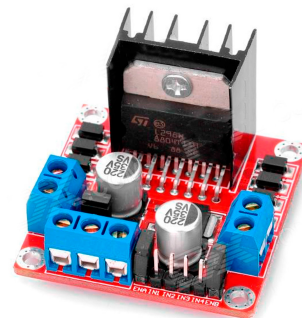


Fig. 28: Puente H L298N

- Arduino UNO: Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328P. Es muy popular en proyectos de electrónica y robótica debido a su facilidad de uso y amplia comunidad de soporte. Cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida, 6 entradas analógicas y una conexión USB para programación y comunicación
- Brazos cortados en acrílico: Los brazos de acrílico se utilizan como elementos estructurales en el mecanismo. El acrílico es un material ligero, resistente y fácil de cortar con láser, lo que permite crear piezas personalizadas con precisión.

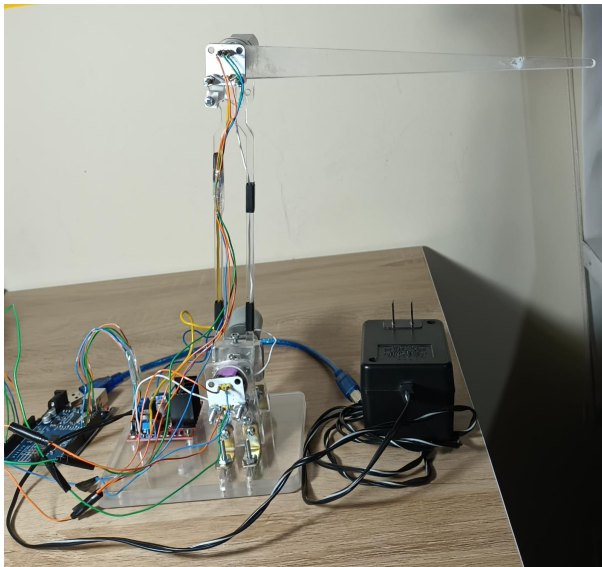


Fig. 29: Brazos cortados en acrílico

- Acoples impresos en 3D: Los acoples son piezas que conectan diferentes partes del mecanismo. La impresión 3D permite fabricar acoples personalizados y complejos que se ajustan perfectamente a las necesidades del proyecto.



Fig. 30: Acoples impresos en 3D

- Tornillos M3: Son tornillos de métrica 3 mm, comúnmente utilizados en proyectos de electrónica y robótica para ensamblar componentes. Son pequeños, pero proporcionan una sujeción segura y estable.
- Cable de protoboard: Son flexibles y fáciles de usar, permitiendo conectar componentes electrónicos usando soldadura.
- Rodamiento de 8mm: Los rodamientos se utilizan para reducir la fricción entre partes móviles del mecanismo. Un rodamiento de 8 mm es adecuado para ejes de ese diámetro, permitiendo un movimiento suave y preciso.

B. Integración del Sistema de Control

El sistema de control se integro mediante un microchip programable de alta frecuencia (Arduino), allí se implemento

toda la programación necesaria.

Partiendo por una función la cual retorna los ángulos de referencia por paso de trayectoria.

```
double* getAngles (int step, double scale, double rotation, int leafs) {
    static double angles[2];
    int index = leafs - 3;
    double t = step * 2 * PI / steps;
    double sinusoidalFunction = scale * sizes[index] * (cos(t * leafs + rotation) + roundness[index]);
    double x = sinusoidalFunction * cos(t) + offsetX;
    double y = sinusoidalFunction * sin(t) + offsetY;
    double beta = 2*atan2(y,x);
    double cos_gamma_2 = x/(2*10*cos(beta/2));
    double sin_gamma_2 = sqrt(1 - cos_gamma_2*cos_gamma_2);
    double gamma = 2*atan2(sin_gamma_2, cos_gamma_2);
    angles[0] = (beta + gamma)/2;
    angles[1] = beta - 2*angles[0];
    return angles;
}
```

Fig. 31: Función getAngles, para obtener θ_1 y θ_2 .

Seguidamente se implemento el control PD, con la nomenclatura clásica, realizando primero la operación pertinente, para adicionar la ganancia en de cada factor.

```
void PID(double setPoint1, double setPoint2) {
    input1 = offsetAngle1 - map(as5600.getCumulativePosition(), 0, 4095, 0, 360); // 12 Bits
    input2 = offsetAngle2 + map(analogRead(ENCODER2), 0, 1023, 0, 360); // 10 Bits, analog output
    double error1 = setPoint1 - input1;
    double error2 = setPoint2 - input2;
    output1 = P1 * error1 + D1 * (error1 - lastError1);
    output2 = P2 * error2 + D2 * (error2 - lastError2);
}
```

Fig. 32: Función de control PID.

Adicionalmente para evitar la perdida de control, con errores muy grandes, se implemento una función de control PID suavizado, de manera que si el error es muy grande, el punto de operación sea reasignado.

```
void PID_SOFT(double setPoint1, double setPoint2) {
    input1 = offsetAngle1 - map(as5600.getCumulativePosition(), 0, 4095, 0, 360); // 12 Bits
    input2 = offsetAngle2 + map(analogRead(ENCODER2), 0, 1023, 0, 360); // 10 Bits, analog output
    double error1 = setPoint1 - input1;
    double error2 = setPoint2 - input2;
    if (abs(error1) > 5) {
        if (setPoint1 > input1) {
            setPoint1 = input1 + 5;
        } else {
            setPoint1 = input1 - 5;
        }
    }
    if (abs(error2) > 5) {
        if (setPoint2 > input2) {
            setPoint2 = input2 + 5;
        } else {
            setPoint2 = input2 - 5;
        }
    }
    PID(setPoint1, setPoint2);
}
```

Fig. 33: Función de control PID suavizado.

Para el manejo del mecanismo, se hizo uso de funciones de interfaz, además del uso de Matlab para la activación y modificación de la trayectoria.

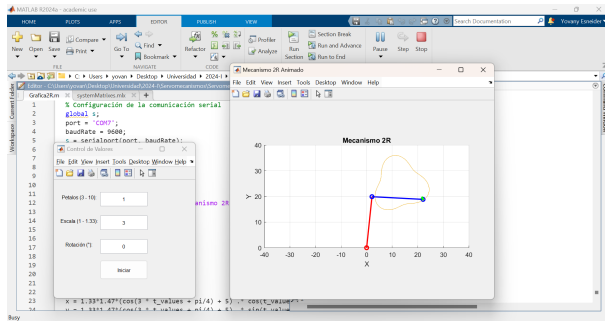


Fig. 34: HMI en Matlab.

El script en MATLAB se utiliza para graficar y animar el mecanismo en función de los ángulos proporcionados por el Arduino a través de comunicación serial. El mecanismo se dibuja en una ventana principal que muestra los eslabones y acumula los puntos extremos de su movimiento. Simultáneamente, se abre una ventana secundaria de control con cajas de texto para ingresar valores personalizados para la parametrización de la trayectoria (Escala, Rotación y número de pétalos) y un botón para enviar estos valores al Arduino en formato JSON. El script se mantiene en ejecución continua, actualizando la gráfica cada vez que recibe nuevos datos del Arduino, hasta que se cierre manualmente.

Para una mejor comprensión de todo el procedimiento llevado a cabo, puede visitar el repositorio, donde se encuentra toda la documentación completa. [Repositorio GitHub](#).

IV. FUNCIONAMIENTO

A. Pruebas de Validación

Para la validación se hizo uso del software Matlab, donde se compara en tiempo real la trayectoria teórica y la trayectoria real del mecanismo. Se llevaron a cabo 3 pruebas.

- Prueba de la trayectoria a escala 1.0 y rotación 0°.
- Prueba de la trayectoria a escala 1.33 y rotación 0°.
- Prueba de la trayectoria a escala 1.33 y rotación 45°.

Vídeos de demostración.

B. Resultados Obtenidos

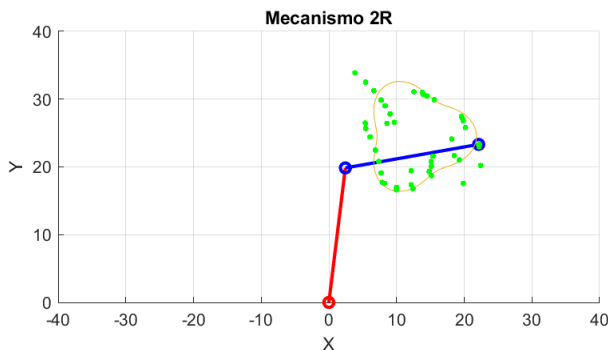


Fig. 35: Trayectoria a escala 1 y rotación 0.

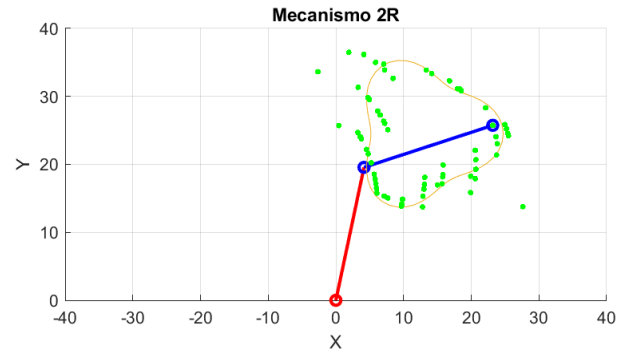


Fig. 36: Trayectoria a escala 1.33 y rotación 0.

La precisión se vio afectada debido a las condiciones del mecanismo, donde al estar ensamblado por partes individuales, un movimiento brusco del control podría desestabilizar, además de que el motor de la base cuenta con un juego incorregible de 7°, lo que escala a error en la precisión de hasta 15°.

A partir de los datos recolectados, la velocidad se halla con la distancia recorrida sobre el tiempo empleado. Siendo la velocidad teórica de 2.71 cm/s y la experimental de 3.87 cm/s, debido a las correcciones bruscas del error por parte del controlador.

C. Discusión de Resultados

Teniendo en cuenta todas las variables y dificultades del mecanismo, los resultados fueron los esperados. Donde las trayectorias obtenidas se aproximan a las reales, y los parámetros como la escala y la rotación tienen un comportamiento ideal.

V. REFLEXIONES SOBRE EL PROCESO

A. Gestión de Proyecto

El manejo del tiempo fue aceptable, aunque se presentaron retrasos por inconvenientes de la naturaleza del mecanismo, se logró cumplir a tiempo con la entrega.

Respecto a los recursos, se reutilizaron materiales como el acrílico y el primer motor, todo lo demás fue adquirido, donde cada integrante aportó una parte igualitaria en dinero.

Respecto a las reuniones de grupo, solo se hicieron 2 reuniones, para discutir el método de ejecución, seguidamente solo hubo comunicación mediante electrónica y personal.

B. Trabajo Colaborativo

Hubo buena sincronización por parte del grupo, donde las tareas se repartieron en 3 principales ejes, diseño, simulación y ensamble.

La parte de diseño, fue llevada a cabo en conjunto, aquí entraron todos los cálculos necesarios, cinemáticas, cálculos de control, longitudes y ganancias. Además de debatir el material a utilizar y la manera de acoplar los motores al mecanismo. Para la parte de simulación, se encargó Brian Muñoz y David Ricaurte, donde se utilizó el software de Matlab, se llevó a cabo la simulación de los sistemas y una pequeña interfaz de control para el mecanismo. La cual permite comparar los

valores teóricos con los reales en tiempo real.

Para la parte de ensamble, se encargo Yovany Vargas, allí hubieron múltiples dificultades, ya que los acoples al ser de plástico presentan una fragilidad alta, teniendo que ensamblar el mecanismo en múltiples ocasiones, y siendo esta la principal causa de los retrasos en los resultados.

Análisis grupal de la colaboración dentro del equipo, roles y responsabilidades, y la interacción con el docente facilitador. Para el trabajo en sincrónico se utilizo GitHub como intermedio diario entre los integrantes.

C. Proceso de Aprendizaje

1) *David Andrés:* En el desarrollo del proyecto, el enfoque de aprendizaje basado en problemas me permitió relacionar directamente los conceptos teóricos con la práctica.

A través de la construcción del prototipo, reforcé competencias técnicas, como el manejo de herramientas de modelado CAD y de software de simulación como MATLAB, Simultáneamente, aprendí a trabajar de manera colaborativa, gestionando las tareas, el tiempo y los recursos de manera efectiva.

Considero que este enfoque fomentó mi capacidad de autoaprendizaje y adaptación frente a problemas inesperados, como la necesidad de ajustar el diseño del mecanismo debido a incompatibilidades con otras partes del sistema.

Pero también creo que el proyecto podría mejorar con una planificación más detallada de las actividades, roles y recursos disponibles.

2) *Brian:* Hay correspondencia con las actividades del curso en cuanto al desarrollo teórico y proceso para hallar la función de transferencia.

Se determina que el encoder funciona de manera más efectiva cuando su posición es de parte del motor y no de la estructura o mecanismo. Se recomienda compra el motor con encoder y con caja reductora integrados.

Los motores seleccionados no deben tener mucho torque debido a que el mínimo en funcionamiento del PWM necesario es muy alto para que el motor mueva el mecanismo. Y esto hace que se dificulte el controlar diferencias pequeñas de ángulos.

D. Recomendaciones para Futuros Proyectos

1) *David Andrés:* Mi principal recomendación es a la hora de diseñar el sistema tratar de considerar todas las subsistemas que componen su funcionamiento, así a la hora de concebir el diseño de alguno de estos subsistemas, por ejemplo la parte electrónica del sistema, de forma que no afecte el funcionamiento de los otros subsistemas, influyendo en un mal funcionamiento del sistema completo. Siguiendo este enfoque es necesario, sobretodo si se divide el desarrollo de estos subsistemas, que entre los miembros del equipo haya una comunicación clara de los requerimientos y limitaciones de funcionamiento que tiene cada uno.

2) *Brian:* Implementar un cronograma detallado con revisiones periódicas: Para mejorar la planificación del tiempo, se sugiere establecer un cronograma específico con hitos claros

para cada fase del proyecto. Este cronograma debe incluir momentos de revisión intermedia para evaluar el avance y realizar ajustes cuando sea necesario. Además, se recomienda el uso de herramientas de gestión de proyectos que permitan visualizar el progreso y detectar posibles retrasos con anticipación. De esta manera, se optimiza la gestión de los recursos y se asegura el cumplimiento de los plazos establecidos.

Documentar detalladamente cada paso del proceso: Es esencial llevar un registro exhaustivo de cada fase del proyecto, documentando tanto los éxitos como los problemas y las soluciones implementadas. Este registro permitirá retroceder fácilmente en caso de ser necesario, facilitando ajustes sin perder el contexto del trabajo ya realizado. Además, la documentación detallada fomenta el aprendizaje continuo y mejora la transferencia de conocimiento dentro del equipo.

E. Yovany

No utilizar acoples de plástico, acrílico o cualquier derivado de plástico. Estos materiales no tienen la suficiente resistencia para los torques que tienen los motores, rompiéndose ante cualquier envaneciéndote.

No utilizar sensores AS5600, aunque su manipulación es sencilla, mantener los sensores alineados y sincronizados es una tarea sin fin, aunque cueste más es mejor optar por motoredutores con encoder incorporado. Ya que estos son precisos y no necesitan de sincronización previa.

No realizar el ensamble por piezas no enterizas, si se precisa de algún soporte, este debe ser rígido en conjunto con las piezas.

Procurar una resolución en los encoder de 12 bits, con esta se puede tener una medida de hasta 2 revoluciones sin presentar ningún inconveniente, permitiendo una mayor libertad en el mecanismo.

VI. CONCLUSIONES

- Con el análisis de control, se encontró que el control PD es el ideal para este tipo de sistemas, donde el factor derivativo influye directamente en la amortiguación de la respuesta.
- Si bien el análisis lagrangiano es correcto para la cinemática en este tipo de mecanismo, el análisis Denavit-Hartenberg presenta una ventaja frente a este, siendo capaz de parametrizar.
- Aunque la intuición dicte que a mayor torque y velocidad pueda otorgar un motor, será más fácil controlar una inercia alta. Sin embargo, no es correcta esta afirmación, se debe partir de los cálculos de torque y velocidad para la selección adecuada de los motores.

Síntesis de los hallazgos y logros del proyecto, y sugerencias para trabajos futuros.

REFERENCIAS

- [1] G. Victor, *Notas de clase*. Servomecanismos Universidad Nacional de Colombia. 2024.
- [2] MathWorks, *Documentation Center*. MathWorks. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/index.html>. 2024.