

Informe Laboratorio 1 Inteligencia Artificial

1st Mateo Vázquez Escobar
Universidad Militar Nueva Granada
Ingeniería Mecatrónica
Bogotá, Colombia
est.mateo.vasquez@unimilitar.edu.co

Abstract— En este laboratorio se desarrolla el estudio y control de un péndulo invertido como sistema de referencia para la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial y control clásico. Inicialmente, se formula y analiza el modelo matemático del péndulo invertido, el cual se contrasta mediante la simulación en el software Webots. Posteriormente, se implementa un controlador PID, evaluando su desempeño en la estabilización del sistema y optimizando sus parámetros (K_p , K_i , K_d) para mejorar la respuesta. Finalmente, se diseña un controlador difuso, definiendo los conjuntos difusos y reglas de inferencia, y se optimizan dichos conjuntos dentro del entorno de simulación en Webots.

El laboratorio permite comparar los resultados obtenidos con diferentes técnicas de control y resaltar las ventajas del enfoque difuso frente al control PID, ofreciendo una visión integral de la aplicación de métodos de control clásico y de inteligencia artificial en sistemas dinámicos inestables.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de sistemas dinámicos inestables, como el péndulo invertido, constituye un caso de referencia fundamental en el ámbito del control automático y la inteligencia artificial. Este tipo de sistemas requieren técnicas avanzadas de regulación que permitan mantener su equilibrio frente a perturbaciones, lo que los convierte en un banco de pruebas ideal para evaluar y comparar diferentes metodologías de control. Entre las estrategias clásicas destaca el uso de controladores PID, los cuales ajustan sus parámetros de ganancia proporcional, integral y derivativa para obtener un desempeño estable. Sin embargo, la sintonización de estos parámetros resulta crítica y puede limitar su efectividad ante variaciones o incertidumbres en el modelo.

En contraste, los enfoques basados en inteligencia artificial, como el control difuso, ofrecen una alternativa capaz de incorporar razonamiento lingüístico y reglas heurísticas, imitando procesos de toma de decisiones más cercanos al comportamiento humano. Mediante la definición de conjuntos difusos y funciones de pertenencia, este tipo de controladores permiten manejar la no linealidad inherente al sistema de manera más flexible que las técnicas convencionales.

En el presente laboratorio se desarrollan simulaciones del péndulo invertido utilizando el entorno Webots, donde se implementan y comparan controladores PID y difuso. Asimismo, se incluyen procesos de optimización de parámetros y conjuntos difusos con el fin de evaluar el impacto de estas técnicas en la estabilidad y respuesta del sistema. De este modo, se busca comprender tanto los fundamentos matemáticos como la aplicación práctica de herramientas de control clásico e inteligencia artificial en sistemas dinámicos complejos.

II. DESARROLLO

1) Modelo del péndulo invertido

En la primera etapa se construyó el modelo matemático del péndulo invertido a partir de las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de un sistema no lineal compuesto por un carro y una barra articulada (péndulo invertido). Para ello se consideraron las fuerzas, momentos y parámetros físicos involucrados, lo que permitió obtener una representación del sistema en forma de ecuaciones de movimiento. Posteriormente, dicho modelo fue implementado en Python y en el entorno de simulación Webots con el fin de recrear el comportamiento del péndulo bajo condiciones iniciales de inestabilidad. Esta simulación permitió validar el modelo teórico y visualizar de manera práctica las características propias de un sistema dinámicamente inestable, que sin control tiende a caer rápidamente.

2) Controlador PID

En la segunda etapa se diseñó e implementó un controlador PID con el objetivo de estabilizar el péndulo invertido en posición vertical. Inicialmente se estableció la estructura del controlador, considerando las acciones proporcional, integral y derivativa, y posteriormente se realizó la sintonización de sus parámetros (K_p , K_i y K_d). Durante este proceso se llevaron a cabo pruebas sucesivas en el entorno Webots, evaluando la respuesta del sistema en términos de error, tiempo de estabilización y sobreoscilaciones. Asimismo, se aplicaron métodos de optimización para mejorar el ajuste de los parámetros, logrando un mejor equilibrio entre rapidez de respuesta y estabilidad. De esta manera, fue posible

evidenciar la eficacia del PID, aunque también se identificaron sus limitaciones frente a variaciones y no linealidades presentes en el sistema.

3) Controlador Difuso

En la tercera etapa se desarrolló un controlador difuso como alternativa basada en técnicas de inteligencia artificial, con el objetivo de superar algunas limitaciones observadas en el esquema PID. Para su diseño se definieron cuidadosamente los conjuntos difusos de entrada y salida, donde las variables principales fueron el ángulo del péndulo (positivo o negativo) y la velocidad angular, a partir de las cuales se plantearon diferentes funciones de pertenencia que representaban el comportamiento del sistema en diversos rangos de operación. Con estas bases se construyó un conjunto de reglas lingüísticas, del tipo “si ángulo es positivo y velocidad es positiva, entonces mover el carro a la izquierda”, que permitieron traducir el conocimiento heurístico en acciones concretas de control. Posteriormente, el controlador fue implementado en el simulador Webots, manteniendo la misma interfaz de interacción manual con teclas y la opción de activar el modo automático. Una vez integrado, se sometió a un proceso iterativo de ajuste y optimización de las funciones de pertenencia y del sistema de inferencia, con el fin de lograr una respuesta más estable y precisa frente a las oscilaciones del péndulo. Los resultados obtenidos hicieron posible comparar directamente su desempeño con el PID, evidenciando que, aunque el controlador difuso implicó un diseño inicial más complejo y requirió mayor tiempo de calibración, ofreció una mayor adaptabilidad frente a condiciones de incertidumbre, perturbaciones y no linealidad, mostrando un comportamiento más robusto y flexible en escenarios donde el control clásico tiende a degradarse.

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

1) Modelo del péndulo invertido

Para la implementación del primer modelo del péndulo invertido, se realizaron las modificaciones con base a las siguientes ecuaciones:

Variables del Sistema:

- x = Posición horizontal de la base cuadrada (m)
- θ = Ángulo del brazo respecto a la vertical (rad)
- \dot{x} = Velocidad de la base (m/s)
- $\dot{\theta}$ = Velocidad angular del brazo (rad/s)
- F = Fuerza de control aplicada (N)

Parámetros Físicos:

- M = Masa de la base cuadrada = 2.0 kg
- m = Masa en el extremo del brazo = 0.3 kg
- L = Longitud del brazo rígido = 0.8 m
- g = Aceleración gravitacional = 9.81 m/s²
- b = Coeficiente de fricción = 0.05 N·s/m
- Δ = Denominador común = $M + m - m \cdot \cos^2(\theta)$

Ecuaciones no lineales del sistema:

Ecuación 1 - Movimiento horizontal de la base:

$$\ddot{x} = \frac{F - b \cdot \dot{x} + m \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin(\theta) - m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{M + m - m \cdot \cos^2(\theta)}$$

donde: $\Delta = M + m - m \cdot \cos^2(\theta)$

Ecuación 2 - Movimiento rotacional del brazo:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \cdot \sin(\theta) - \cos(\theta) \cdot (F - b \cdot \dot{x} + m \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin(\theta))}{L \cdot \Delta}$$

Simplificando:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \cdot \sin(\theta) - \cos(\theta) \cdot \ddot{x} \cdot \Delta}{L}$$

Función de transferencia obtenida:

Función de Transferencia Principal: $G(s) = \theta(s)/F(s)$

$$G(s) = \frac{-1}{s^2 \cdot \left(s^2 + \frac{b}{\Delta} \cdot s - \frac{mg(M+m)}{L \cdot \Delta} \right)}$$

Con valores numéricos ($\Delta = 2.3 \text{ kg}$):

$$G(s) = \frac{-1.25}{s^2 \cdot (s^2 + 0.0217 \cdot s - 12.757)}$$

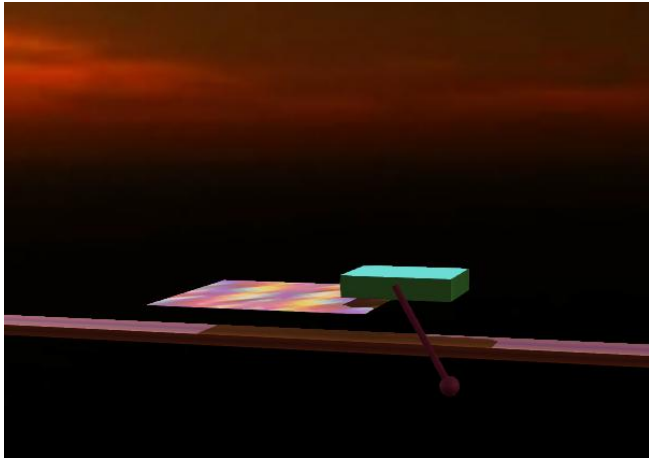
Basado en estas ecuaciones, se procedió a simular primero en un entorno desarrollado en Python, realizando la siguiente interfaz:



Teniendo como propósito principal, el modelado del sistema, el correcto funcionamiento y un primer avance en el cual el sistema pudiera moverse libremente por medio del teclado.

Posteriormente se procedió a realizar la implementación

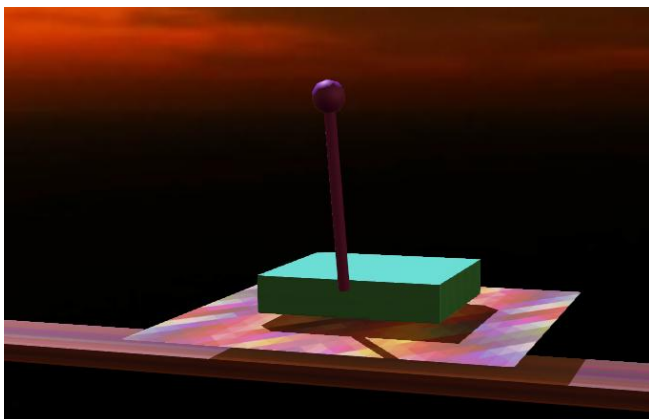
básica en un mundo en Webots como se muestra a continuación:



Para esta primera entrega el propósito era simplemente que el sistema se lograra implementar de manera exitosa en Webots además de lograr controlarla por medio del teclado (flechas).

2) Controlador PID

En esta etapa del laboratorio se implementó un controlador PID encargado de mantener la estabilidad del péndulo invertido dentro del entorno de simulación Webots. Para ello, primero se realizó la conexión con los dispositivos principales del modelo, incluyendo el motor que desplaza el carro y los sensores de posición y ángulo del péndulo. Se configuró el motor en modo de velocidad, ya que este enfoque resulta más confiable para generar un control continuo de la dinámica del sistema, evitando las restricciones que se presentan en el control por posición absoluta. Adicionalmente, se habilitó la interacción con el teclado, lo que permitió alternar entre un modo manual — donde el usuario puede aplicar desplazamientos básicos al carro— y un modo automático en el cual actúa el controlador PID, asegurando así flexibilidad en la prueba y validación de los resultados.



El controlador PID se diseñó considerando el ángulo del péndulo como la variable principal a estabilizar, junto con la posición del carro para mantener el sistema en un punto de referencia definido. El algoritmo calcula en cada instante el error angular y lo normaliza en el rango correspondiente para evitar discontinuidades. A partir de este error, se derivan los tres términos fundamentales del PID: la acción proporcional que busca corregir la desviación en tiempo real, la acción integral que acumula los errores en el tiempo para corregir desviaciones persistentes, y la acción derivativa que predice la evolución de la variable a partir de su velocidad de cambio. De manera complementaria, se incluyó un término adicional de control proporcional sobre la posición del carro, lo que permite que el sistema no solo estabilice el ángulo, sino que también tienda a mantener una ubicación determinada dentro de la pista de movimiento.

Para garantizar la estabilidad del sistema, los parámetros del controlador fueron sintonizados cuidadosamente, asignando valores iniciales de $K_p = 12.0$, $K_i = 0.5$ y $K_d = 6.0$ para la regulación angular, junto con un valor de $K_{p_pos} = 3.0$ para la corrección de posición. Asimismo, se establecieron limitaciones en la señal de control y en la integral acumulada, con el fin de evitar saturaciones que podrían desestabilizar la respuesta. Los resultados obtenidos en la simulación mostraron que, bajo estas condiciones, el controlador PID es capaz de estabilizar el péndulo invertido y mantenerlo en posición vertical durante largos intervalos de tiempo, aunque su desempeño puede variar dependiendo de la precisión de la sintonización y de la magnitud de las perturbaciones aplicadas. Esta experiencia permitió comprobar tanto la efectividad como las limitaciones del PID en sistemas inherentemente inestables como el péndulo invertido.

3) Controlador Difuso

Para la última entrega se procedió a realizar un controlador difuso con la siguiente metodología:

Primero se definieron los siguientes parámetros:

- an (angle negativo)
- amn (angle muy negativo)
- van (vel. angular negativa)
- Xn (X negativo)
- Xmn (X muy negativo)
- ap (angle positivo)
- amp (angulo muy positivo)
- vap (vel. angular positiva)
- X positivo (Xp)

- X muy positivo (Xmp)

Una vez definidos estos parámetros, se procedió a realizar una tabla de regla de decisión, quedando de la siguiente forma:

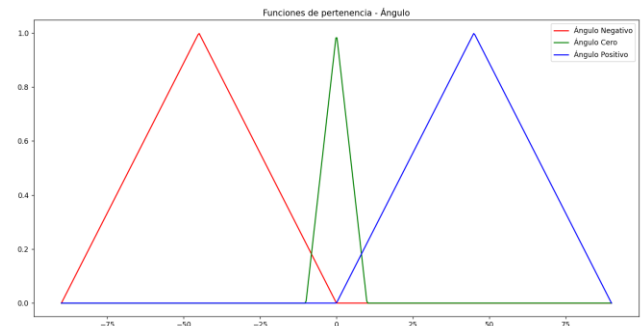
Ángulo	Velocidad angular	Posición del carro
ap	vap	Xp
ap	van	X0
an	vap	X0
an	van	Xn
amp	vap	Xmp
amp	van	Xp
amn	vap	Xn
amn	van	Xmn

Además se realizó una encuesta en clase para considerar los parámetros que cada persona consideraba ángulos positivos, muy positivos y otros datos:

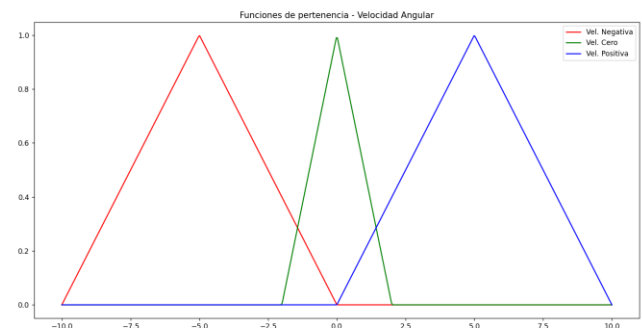
V - AP	AMN - AMP	XMP/XP - XMN/XN
15	35	1,5
20	50	2
20	45	2,5
10	40	2
15	50	2
10	45	2
15	45	1,75
9	60	3
5	40	2
5	40	1,5
15	70	1,5

también se realizaron funciones de pertenencia difusas para las variables de del sistema:

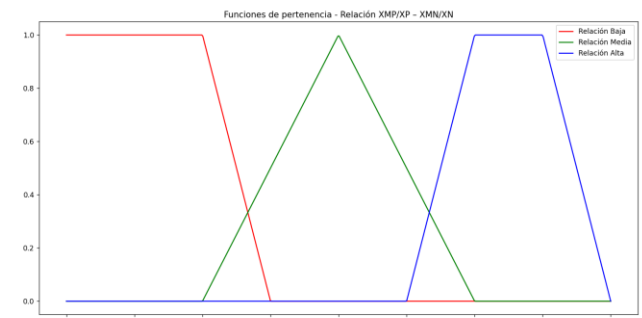
Para el Ángulo



Para la velocidad angular



Para la relación entre variaciones de posición



En esta etapa del laboratorio se implementó un controlador difuso diseñado para mantener la estabilidad del péndulo invertido en el entorno de simulación. Para ello, se establecieron las variables de entrada correspondientes al ángulo del péndulo, la velocidad angular y la posición del carro, además de definir la fuerza aplicada como variable de salida. Cada una de estas variables fue representada mediante funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, construidas a partir de rangos obtenidos tanto de la revisión teórica como de los datos recolectados en la encuesta aplicada previamente. Con este enfoque se buscó modelar el conocimiento humano de forma lingüística, lo que permite

que el controlador tome decisiones basadas en reglas del tipo “si-entonces” para corregir el movimiento del sistema.

El controlador se estructuró a partir de una base de reglas difusas que relaciona los conjuntos lingüísticos de entrada con la acción de control necesaria. Estas reglas fueron formuladas de acuerdo con la lógica física del problema: por ejemplo, si el ángulo tiende hacia la derecha y la velocidad acompaña ese movimiento, el sistema debe aplicar una fuerza en la misma dirección para contrarrestar la caída del péndulo. La inferencia se realizó empleando el método de Mamdani, combinando las reglas activas mediante operadores lógicos difusos, mientras que la defuzzificación se efectuó con el método del centroide, obteniendo así un valor crisp de fuerza a aplicar sobre el carro en cada instante.

Finalmente, se ajustaron los parámetros de las funciones de pertenencia con base en los resultados de la encuesta y en pruebas sucesivas de simulación, con el objetivo de lograr un equilibrio adecuado entre sensibilidad y estabilidad. De esta manera, el controlador difuso consiguió mantener el péndulo en posición vertical, respondiendo de forma adecuada a perturbaciones moderadas y compensando tanto la desviación angular como el desplazamiento del carro. Aunque el desempeño del sistema depende en gran medida del diseño preciso de las funciones de pertenencia y de la calidad de la base de reglas, los resultados obtenidos demostraron que el enfoque difuso constituye una alternativa efectiva frente a controladores convencionales, especialmente en sistemas no lineales e inherentemente inestables como el péndulo invertido.

IV. CONCLUSIONES

a) El controlador PID es una técnica clásica y efectiva para la estabilización del péndulo invertido, pero su desempeño depende fuertemente de la correcta sintonización de los parámetros K_p , K_i y K_d . Aunque ofrece buena respuesta en condiciones nominales, su capacidad de adaptación ante incertidumbre o no linealidad es limitada.

b) El control difuso proporciona una alternativa más flexible al no requerir un modelo matemático exacto del sistema. Gracias a la definición de reglas lingüísticas y funciones de pertenencia, permite un control robusto frente a variaciones y perturbaciones, aunque su diseño inicial puede ser más complejo que el de un PID.

c) Las simulaciones en Webots muestran que la optimización de parámetros, tanto en el PID como en los conjuntos difusos, mejora significativamente la estabilidad y la respuesta dinámica del sistema. Esto evidencia la importancia de los métodos de ajuste en la práctica del control automático.

d) La comparación entre controladores clásicos e inteligentes resalta que no existe un único enfoque universalmente mejor. Mientras el PID es sencillo y eficiente para condiciones bien definidas, el controlador difuso destaca en entornos inciertos o con comportamiento no lineal. En conjunto, ambos ofrecen una visión complementaria del diseño de estrategias de control.