



Proyecto de grado en Ingeniería Electrónica
Diseño de Planta de Control de bajo costo para uso educativo

Santiago Martínez Castaño

Código: 201612223

s.martinezc@uniandes.edu.co

Asesor

José Fernando Jiménez

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Universidad de los Andes

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIRÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BOGOTA D.C 2022

Contenido

1.	Introducción	4
2.	Metodología	4
3.	Planta.....	6
3.1	Elección de la planta	6
3.2	Diseño de la planta de control	7
3.2.1	Diseño mecánico	7
3.2.2	Diseño electrónico	9
3.3	Construcción de la planta	9
4.	Caracterización de la planta	11
4.1	Péndulo invertido simple.....	11
4.2	Modelo dinámico de la planta	12
4.3	Espacio de estados y linealización	12
4.4	Análisis del sistema.....	13
5.	Simulación de la planta.....	14
5.1	Representación con modelo 3D.....	14
5.2	Representación con modelo matemático.....	15
6.	Diseño de controladores.....	17
6.1	Controlador PID	17
6.1.1	Planta física.....	19
6.2	Control por LQR	19
6.3	Control por retroalimentación de estado (<i>Pole Placement</i>)	21
6.4	Otros tipos de control	21
7.	Trabajo con estudiantes preuniversitarios.....	22
7.1	Encuesta inicial a los estudiantes	22
7.2	Capacitación a estudiantes	25
8.	Casos de uso de esta planta.....	27
9.	Discusión y conclusiones	27
10.	Trabajo futuro	28
	Referencias.....	29

Capítulo 1

1. Introducción

Actualmente la industria presenta un problema de talento humano. No se encuentran personal suficientemente capacitadas para desarrollar los retos de la industria moderna. Este problema puede deberse a la falta de profesionales dedicados al área STEM (por sus siglas en inglés para Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas).

Para suplir esta carencia se debería incentivar, en los estudiantes de educación media, el deseo de estudiar una carrera orientada a STEM. Este proyecto busca despertar en los estudiantes esta motivación mediante el desarrollo de una planta de control que les resulte atractiva, interesante y que despierte el deseo de conocer más a profundidad su funcionamiento.

Por otra parte, la carencia de un hilo conductor en el estudio de la teoría de control produce profesionales subcualificados, que luego requieren un tiempo adicional a su educación universitaria para completar su formación en el área con las prácticas y técnicas realmente usadas en la industria.

Como beneficio adicional al incremento de motivación en carreras STEM, la planta propuesta en este proyecto procura ser ese hilo conductor de los estudiantes en el área de control.

2. Metodología

En busca de los objetivos de este proyecto se usa la siguiente metodología:

- Elegir una planta de control

La planta debe ser lo suficientemente simple al entendimiento de un estudiante preuniversitario, pero adaptable a diferentes niveles de educación avanzada.

- Diseño de la planta
- Caracterización de la planta
- Simulaciones

En esta sección se pretende conocer el alcance de la planta y sus limitaciones, para luego iniciar el diseño de controladores.

- Diseño de controladores
- Implementación del control

Basados en las limitaciones de la planta se implementan métodos de control que cumplan con los requerimientos de esta.

- Encuesta inicial a los estudiantes
- Capacitación de los estudiantes
- Encuesta final a los estudiantes

Se hará una primera encuesta a los estudiantes antes de familiarizarse con la planta, luego se les explicará la construcción y se les enseñará a emplear diferentes métodos de control en esta planta. Después de haber utilizado la planta por algún tiempo se realizará otra encuesta para medir el posible impacto que haya generado en sus expectativas de elección de carrera profesional.

El documento se presenta siguiendo la secuencia de las actividades descritas en esta metodología.

Capítulo 2

3. Planta

3.1 Elección de la planta

La selección de la planta se basó en los siguientes requerimientos:

- Debe poderse construir con un bajo presupuesto ($< \$500\,000$ COP)
- Deben permitir implementar diferentes tipos de control
- Debe ser posible aumentar gradualmente la complejidad del aprendizaje
- Debe funcionar como una plataforma educativa tanto para estudiantes de colegio, como para universitarios

De este modo se preseleccionaron una variedad de plantas, tales como la planta Beam & Ball, un canal de riego a escala, control de posición de un objeto en un riel, entre otras. Pero se seleccionó un robot balancín de dos ruedas, dado que permite aplicar variedad de modelos de control, tales como: On/Off, PID, control difuso, regulador lineal cuadrático, entre otros; permitiendo aumentar la complejidad del estudio de la planta. Adicionalmente, puede ser usada como una plataforma de robótica para aprender Odometría, Mapping y planeación de ruta, permitiendo que sea usada también a lo largo de la carrera universitaria como una plataforma educativa por niveles, siendo un hilo conductor entre diversas asignaturas de estudio.

Esta planta se basa en el modelo de Péndulo Invertido, el cual tiene numerosas aplicaciones visibles en la cotidianidad como se ejemplifica en la Figura 1; a) los vehículos eléctricos como el *Segway* o el *Onewheel* son medios de transporte que emplean un controlador para el péndulo invertido; b) la forma en que girar el cuerpo al manejar una bicicleta se modela también de esta forma; c) Incluso el desplazamiento del cuerpo humano es un péndulo invertido que balancea la parte superior sobre los tobillos en cada paso [1].

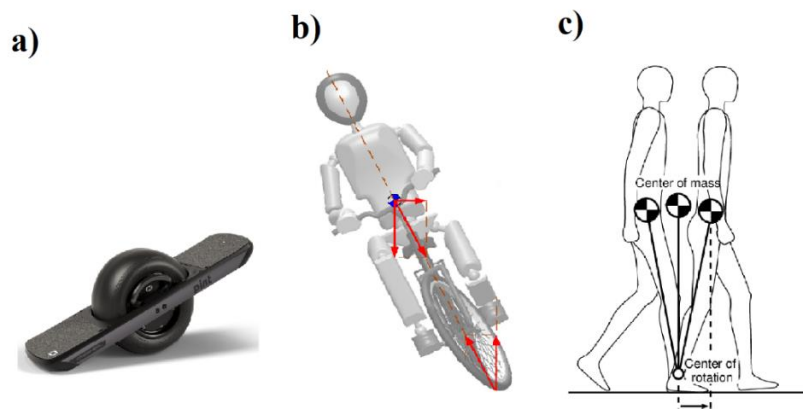


Figura 1. a) Vehículo Onewheel. Tomado de [2]. b) Giro en una bicicleta. Tomado de [3]. c) Movimiento humano modelado como un péndulo invertido. Tomado de [1]

La simplicidad del modelo de referencia del péndulo invertido permite que los estudiantes preuniversitarios se familiaricen rápidamente con él, y evidencien su aplicación en diferentes sistemas, esto facilita la comprensión de la planta y permite que entiendan mejor las acciones de control sobre esta. Sin embargo, aunque el modelo es simple, la naturaleza del sistema es de alto interés investigativo en el área de control; esta planta es controlada de manera *sub-actuada*, es decir, el número de entradas es menor que el número de grados de libertad que requieren ser controlados (ángulo de inclinación y desplazamiento).

Por lo tanto, esta planta cumple la doble función de ser simple en entendimiento, pero adaptable a diferentes niveles de educación avanzada.

3.2 Diseño de la planta de control

El diseño del robot balancín de dos ruedas se divide en 3 etapas: el diseño mecánico, el diseño electrónico y el diseño del sistema operativo base para su uso.

3.2.1 Diseño mecánico

La planta debe poderse construir con bajo presupuesto, por esto se ha diseñado la planta de manera que la mayoría de las piezas sean impresas en 3D, esto permite una producción de bajo costo a bajo volumen, puesto que, si la cantidad de unidades requeridas fuese alta sería más rentable crear un molde de inyección para las piezas. Además, dado que esta planta está pensada para el trabajo en equipo (colaborativo), se emplea una sola planta por un grupo de estudiantes.

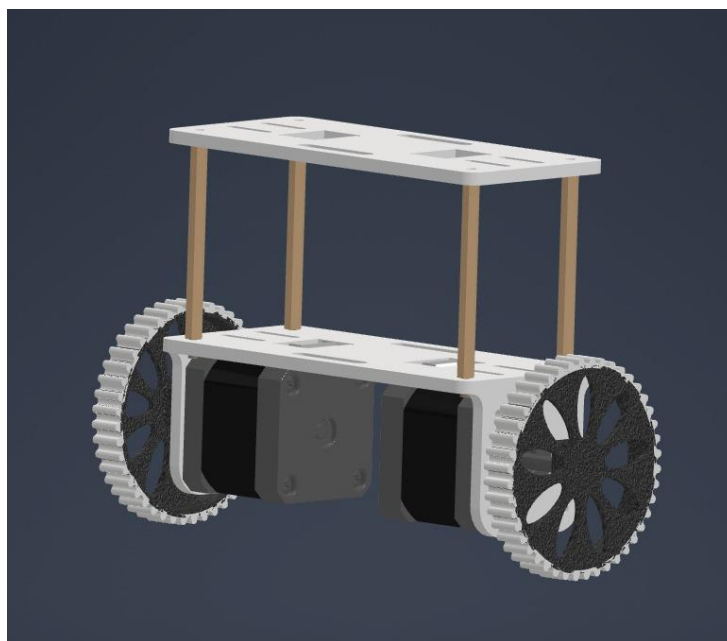


Figura 2. Render del diseño mecánico inicial

En la Figura 2 se observa el diseño inicial del robot balancín de dos ruedas. Es de anotar que tanto las bases blancas como la parte interna de las llantas fueron diseñadas para

imprimir en 3D con material PLA y se emplea TPU para la parte externa de la llanta, lo cual permite un mejor agarre con el suelo. Los espaciadores son una pieza estándar de latón, de bajo costo y alta disponibilidad.

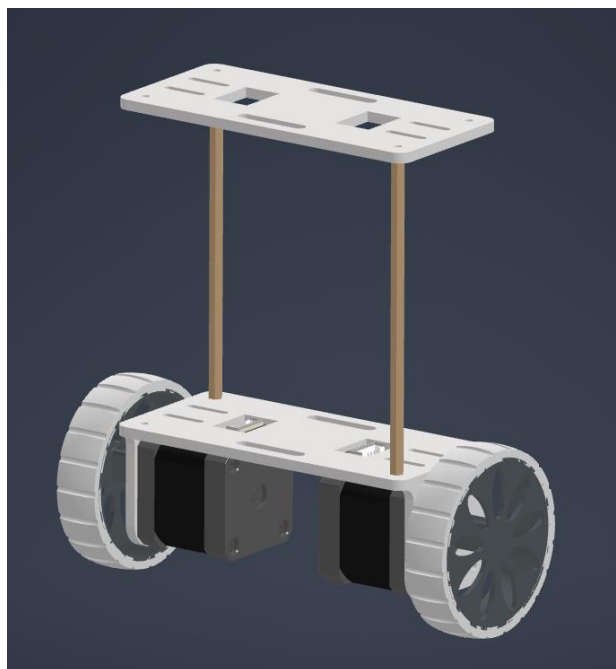


Figura 3. Render del diseño mecánico final

Después de empezar con el análisis de la planta, que se presenta más adelante en la sección 4.3, y el diseño de controladores de la sección 6, se evidenció que el sistema requería de una mayor inercia para facilitar su control, por esto se aumentó la distancia entre las dos bases blancas mostradas en la Figura 2. Como resultado el cuerpo final del sistema se presenta en la Figura 3.

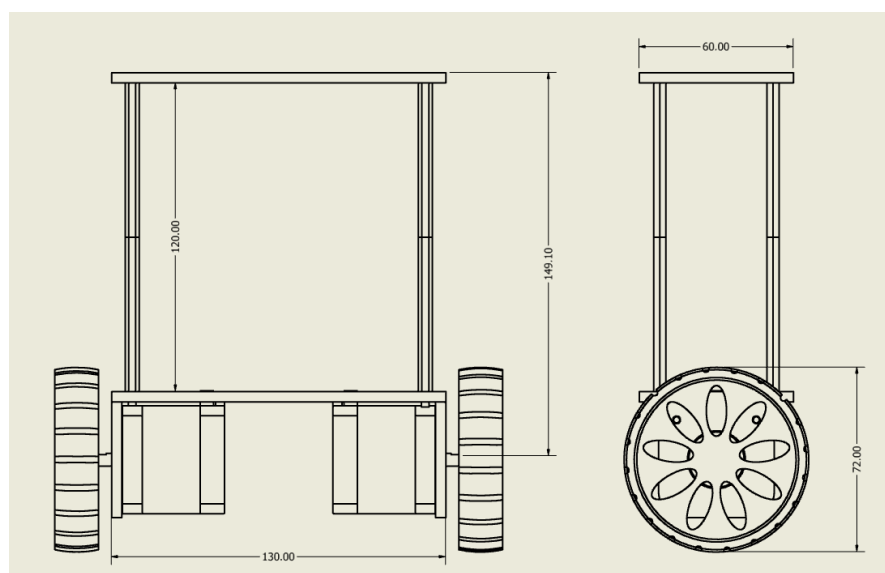


Figura 4. Dimensiones relevantes de la planta

En la Figura 4 se presentan las dimensiones más relevantes de la planta diseñada, estas se usarán posteriormente en el modelamiento del sistema y en la caracterización de esta.

3.2.2 Diseño electrónico

Para realizar control sobre la planta se requiere medir el ángulo de inclinación del péndulo invertido, además se requiere una unidad de procesamiento que calcule la acción de control y finalmente un actuador para ejercer un cambio en la planta.

Microcontrolador: Para este sistema se ha seleccionado el microcontrolador ESP32 de *Espressif*, debido a que este cuenta con una frecuencia de operación de 80MHz, dispone de 2 unidades de procesamiento en paralelo e incluye comunicación Wifi-incluida, necesario para que los estudiantes cambien los parámetros del controlador en tiempo de ejecución.

Sensor: Para determinar la inclinación de la planta se emplea una unidad de medida inercial (IMU). En concreto un sensor *MPU6050*, este es un sensor de 6 grados de libertad, incorpora medidas de aceleración y giroscopio en los 3 ejes, suficiente para determinar el ángulo en 2 ejes. Se comunica con el microcontrolador a través del protocolo *I²C* a una velocidad de hasta 400kHz. Adicionalmente se utiliza un filtro pasa bajas de 45Hz, lo que reduce el ruido de alta frecuencia producida por los motores.

Actuador: Para mover las llantas de la planta con suficiente tracción con el suelo se emplean motores a paso. En concreto, se emplean motores NEMA 17 de referencia *17HS4401*, el uso de motores a paso facilita la resolución del controlador al poder determinar en pasos de 1.8° por pulso la velocidad de giro de cada motor. Para simplificar la interfaz de control de estos motores se emplearon controladores de referencia *DRV8825*.

3.3 Construcción de la planta

A partir de este diseño se realiza la compra de materiales necesarios y se construye la planta de control. El valor de la construcción se detalla en la tabla mostrada a continuación:

Componente	Cantidad	Valor Total
Piezas 3D impresas	6	\$14 280
Separadores de latón	4	\$5 920
esp32-S DevKit V1	1	\$27 560
MPU6050	1	\$13 380
DRV8825	2	\$17 264
Motor 17HS4401	2	\$85 300
Batería LiPo 3S 1Ah	1	\$65 700
Componentes varios	-	\$15 000
TOTAL		\$244 404

La planta construida, incluyendo la placa de componentes electrónicos e insumos para su construcción, no supera el presupuesto propuesto. El resultado se muestra en la Figura 5.

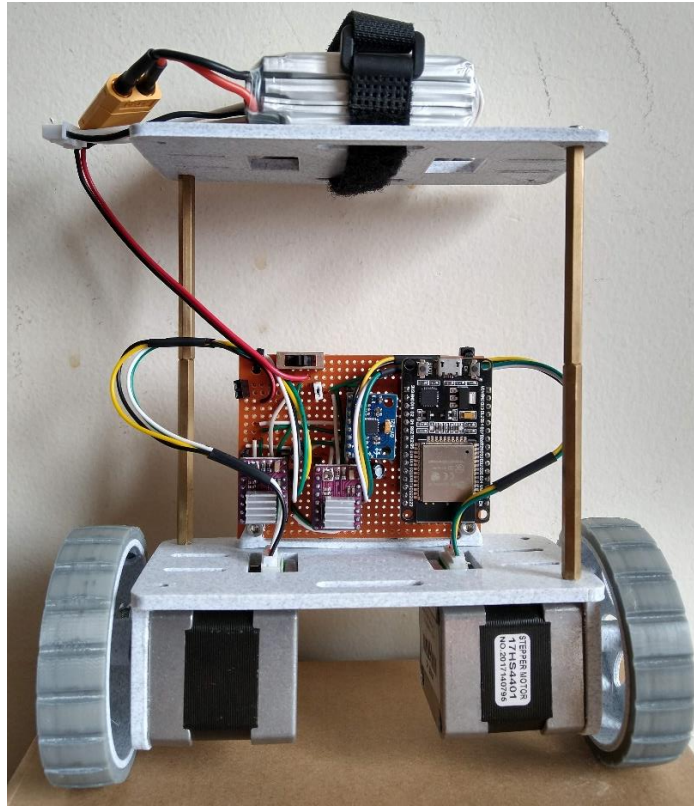


Figura 5. Construcción de la planta

Capítulo 3

4. Caracterización de la planta

El sistema péndulo invertido es un problema tradicional de dinámica y teoría de control, siendo sus principales enfoques el control de inclinación, estabilidad y seguimiento de trayectoria. En el presente informe se estudia el problema del equilibrio y estabilización de un péndulo físico ante perturbaciones externas.

Tras una revisión de la literatura disponible, se encuentra que muchos investigadores han propuesto numerosas técnicas de análisis y diseños de controladores para que un robot balancín de dos ruedas pueda permanecer estable en la posición vertical. Usando un modelo lineal de espacio de estados (*State-Space model*) se propone el control de movimiento del sistema [4]. En [5], un controlador de lógica difusa es diseñado y probado en un péndulo sobre riel. En [6], usando las ecuaciones de Newton se deriva la dinámica del sistema y se linealiza alrededor de un punto de operación para diseñar el controlador.

Este trabajo se centra en el acercamiento de la mecánica newtoniana, se plantean las ecuaciones de la dinámica del sistema basado en un modelo de péndulo invertido simple, estas se derivan y se obtiene un modelo de espacio de estados. El modelo lineal del espacio de estados se obtiene al asumir que el péndulo opera alrededor del punto de estabilización y que las señales involucradas son suficientemente pequeñas [7].

4.1 Péndulo invertido simple

El modelo simple de un péndulo invertido se puede observar en la Figura 6, en este se asume que una masa puntual m_p está conectada a una base con masa m_b a través de un cuerpo con masa despreciable de longitud L .

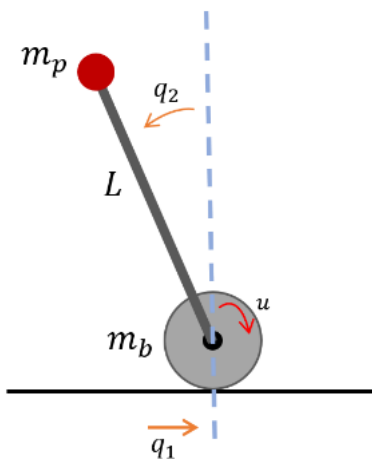


Figura 6. Modelo del péndulo invertido

Las variables de interés son q_1 que representa el desplazamiento del péndulo en el eje horizontal y q_2 que representa el ángulo de inclinación del péndulo con respecto al horizontal. Para este modelo se asume que la entrada u es una fuerza.

4.2 Modelo dinámico de la planta

Las ecuaciones de movimiento de la planta descrita se pueden derivar empleando métodos como el de Newton-Euler o Lagrange-Formalism, entre otros. Las matrices resultantes de interés serán iguales y en todo caso un sistema no-lineal de la siguiente forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{g}_q u$$

Con,

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} m_p + m_b & -L m_p \cos(q_2) \\ -L m_p \cos(q_2) & L^2 m_p \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{pmatrix} L m_p \dot{q}_2^2 \sin(q_2) \\ -L m_p g \sin(q_2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1 \dot{q}_1 \\ d_2 \dot{q}_2 \end{pmatrix} \quad y \quad \mathbf{g}_q = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Donde d_1 y d_2 son los factores de amortiguamiento de las uniones entre la base y el suelo y la unión de rotación entre la base y el cuerpo, respectivamente.

4.3 Espacio de estados y linealización

Se puede obtener una representación en espacio de estados usando la ecuación dinámica del sistema presentada anteriormente y definiendo el vector $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix}$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})u = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{g}_q \end{pmatrix} u$$

Linealizando alrededor del punto de operación $q_1^* = q_2^* = 0$ da como resultado el espacio de estados lineal del sistema:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u$$

Donde,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{g m_p}{m_b} & -\frac{d_1}{m_b} & -\frac{d_2}{L m_b} \\ 0 & \frac{g (m_b + m_p)}{L m_b} & -\frac{d_1}{L m_b} & -\frac{d_2 (m_b + m_p)}{L^2 m_b m_p} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_b} \\ \frac{1}{L m_b} \end{pmatrix}$$

De acuerdo con la sección 3.2.1 de este informe se tiene los siguientes valores para los parámetros del modelo:

$$m_b = 710g \quad m_p = 157g \quad L = 145mm \quad d_1 = d_2 = 0.01$$

4.4 Análisis del sistema

Utilizando las matrices **A** y **B** encontradas en la sección anterior se puede analizar el comportamiento del sistema de péndulo invertido y, haciendo uso del software MATLAB® se puede estudiar y simular el comportamiento de este sistema, además de probar diferentes métodos de control sobre el mismo [8].

Estabilidad: Para analizar la estabilidad del sistema se emplea la función *pole()*, esta determina los polos de un sistema dinámico en lazo abierto. Para visualizar los polos del sistema se emplea la función *rlocus()* que grafica en el plano complejo los polos y ceros. En concreto, para este sistema se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 7.

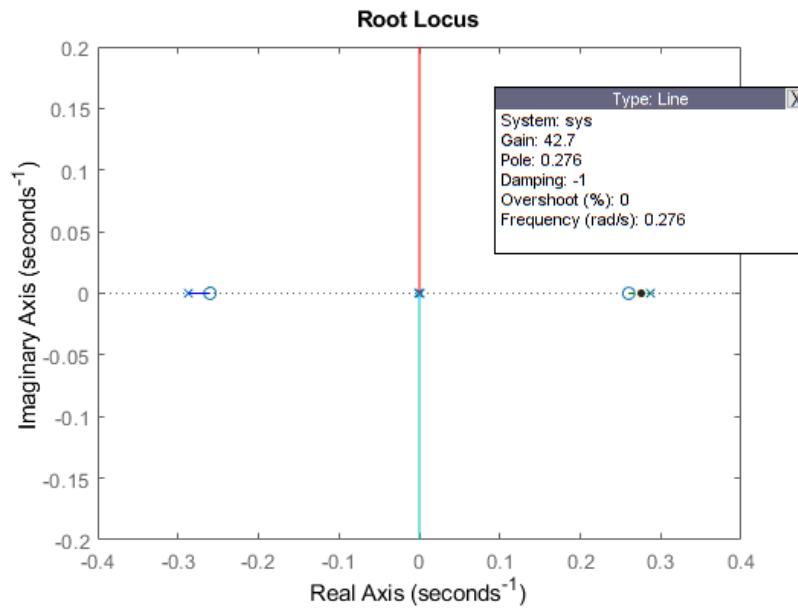


Figura 7. Polos y ceros del sistema modelado

Es de notar que, entre los polos representados con una x en el diagrama, se resalta uno encontrado en el semiplano derecho, es decir que su parte real es mayor a 0. Esto implica que el sistema no es estable en lazo abierto, pero además no existe un Controlador Proporcional suficiente para estabilizar el sistema.

5. Simulación de la planta

Para analizar el comportamiento de la planta, y los métodos de control que se pueden diseñar sobre esta, se emplearon dos aproximaciones al modelado. La primera consiste en realizar un modelo 3D detallado, con la distribución de masas correcta y restricciones físicas involucradas en el movimiento de la planta. La segunda aproximación consiste en simular el sistema de forma matemática empleando su modelo dinámico y las ecuaciones diferenciales que lo definen.

5.1 Representación con modelo 3D

A partir de los archivos de diseño CAD de la planta, presentados en la sección 3.2.1 de este documento, se reconstruye un modelo físico de ésta en un software de simulación con motor físico (*Physics Engine*) capaz de calcular las interacciones de cuerpos rígidos. En este proyecto se utilizó el software Simscape de Simulink®, el cuál emplea la manipulación simbólica y la reducción de índices para identificar la formulación matemática que mejor representa el sistema [9].

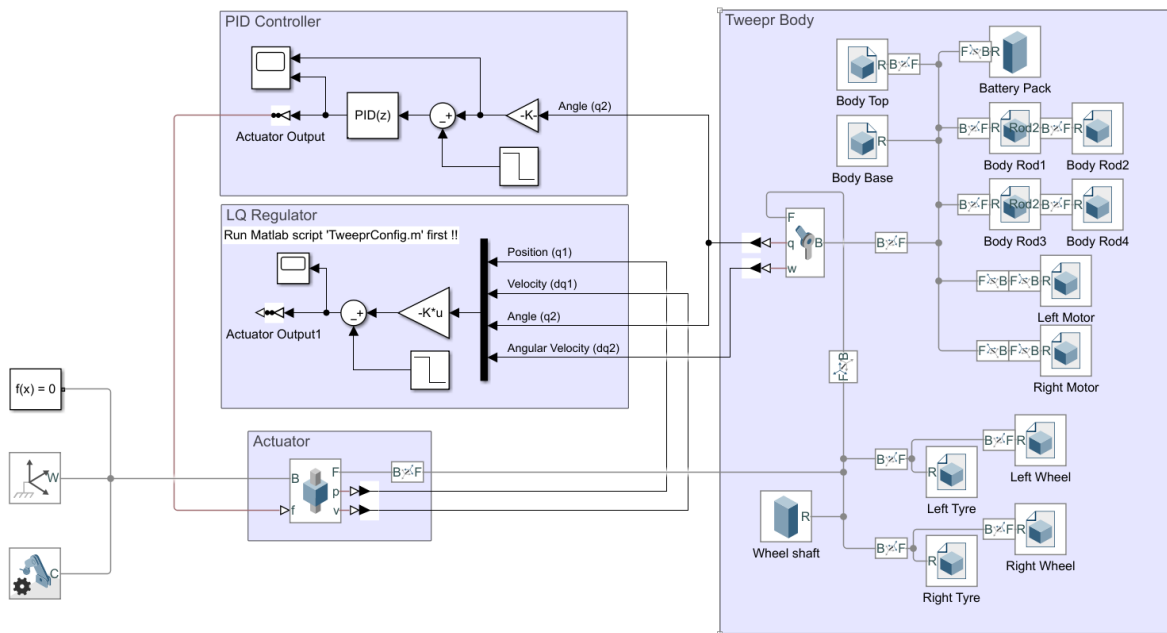


Figura 8. Modelo de la planta en Simscape

En la Figura 8 se observa el modelado a través de bloques. Las piezas físicas del sistema corresponden a los bloques que se encuentran en la sección más a la derecha de la imagen.

La aproximación en el cálculo de este modelo está altamente restringido a emplear la geometría y distribución de masa correcta en estos bloques. Obsérvese también que en este modelo ya se han incluido dos diferentes controladores para el sistema, estos serán tratados más adelante en la sección 6 de este documento.

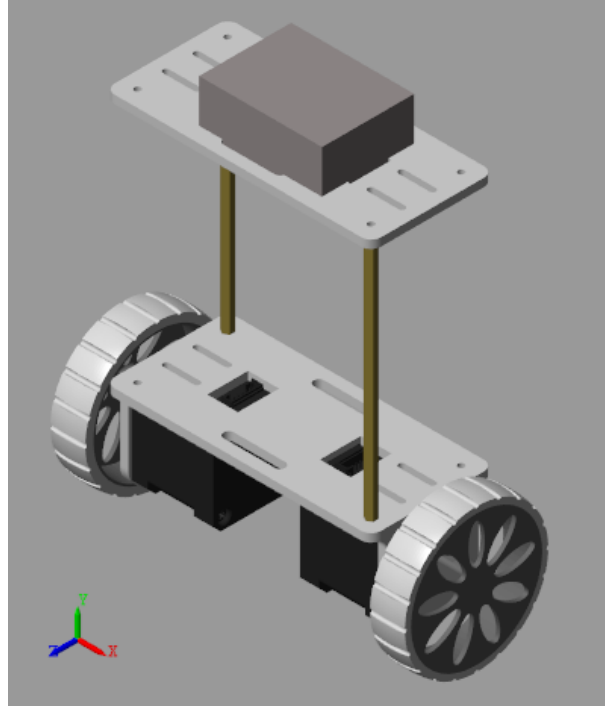


Figura 9. Representación de la planta en Simscape

La Figura 9 muestra la representación que da Simscape a los bloques del modelo mostrado en la Figura 8. Se puede apreciar que esta representación varía con la imagen de la planta física mostrada en la sección 3.3 (ver Figura 5), la placa electrónica de control no se ha incluido en el modelo de simulación ya que su masa es mucho menor que todos los demás elementos del sistema y, por lo tanto, se puede considerar despreciable para el cálculo del centro de gravedad. Además, la geometría de esta placa es compleja, y ya que su impacto en el modelo es mínimo, se ha decidido no modelarla, la masa de este elemento se ha distribuido entre los separadores de latón inferiores del cuerpo.

5.2 Representación con modelo matemático

A partir de las ecuaciones dinámicas de la planta, presentadas en la sección 4.2, se construye una representación del espacio de estados del sistema. Para este proyecto se utilizó los bloques básicos de Simulink®, empleando un integrador se realimenta los estados a través de las matrices **A** y **B** características de la planta.

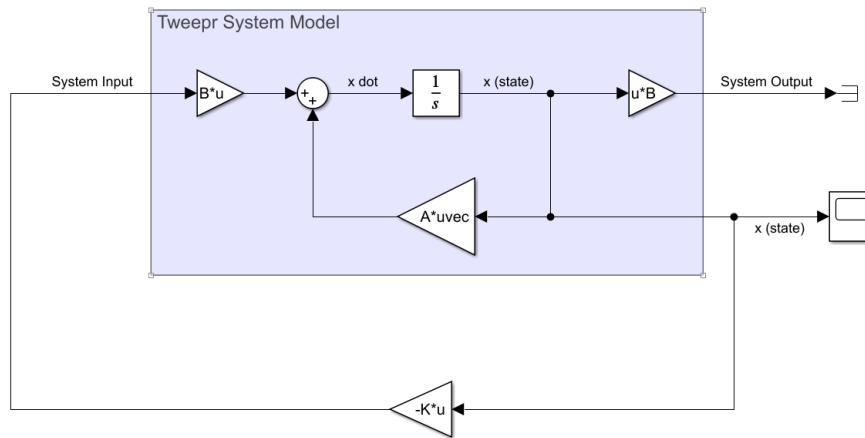


Figura 10. Modelo de la planta en Simulink

En la Figura 10 se puede observar el modelado a través de bloques que representan las ecuaciones dinámicas del sistema. En la sección superior de la imagen se encuentra demarcado los bloques que componen la planta. Como entrada se tiene la señal de acción u , que al multiplicarse por la matriz \mathbf{B} y sumarse a $\mathbf{A}x$ se obtiene \dot{x} , el cuál pasa por un integrador para realimentar los estados. Obsérvese también que en este modelo ya se ha incluido una retroalimentación al sistema, este tipo de control será tratado más adelante en la sección 6.3 de este documento.

Capítulo 4

6. Diseño de controladores

Como se indicó anteriormente, este tipo de plantas son de gran interés en el estudio de la teoría de control por su complejidad y alta no linealidad. A continuación, se presenta el diseño de dos controladores ampliamente empleados en este tipo de plantas, es importante aclarar que uno de estos controladores es erróneamente utilizado, como se mostrará.

6.1 Controlador PID

Un controlador PID puede estabilizar una variable del sistema, este controlador podría emplearse para controlar el ángulo del péndulo invertido q_2 , despreciando su desplazamiento q_1 . Sin embargo, esta planta es vista como un sistema MISO (*Single-Input-Multiple-Output*) dado que la única entrada del sistema es la velocidad de rotación de las llantas, y se desea controlar tanto el ángulo de inclinación como el desplazamiento horizontal (q_1 , q_2) [10]. Por este motivo un controlador PID no es suficiente, como se demostrará en este documento, el uso de controladores PID en cascada es posible, como han demostrado investigadores en el área, pero resulta ineficiente ante impulsos externos [7].

En el modelo de simulación presentados en la sección 5 se implementó un controlador PID en tiempo discreto como se observa en la Figura 11. El periodo de muestreo de señales para este controlador es de $4\mu s$, igual al periodo de muestreo en el microcontrolador que implementa la planta física.

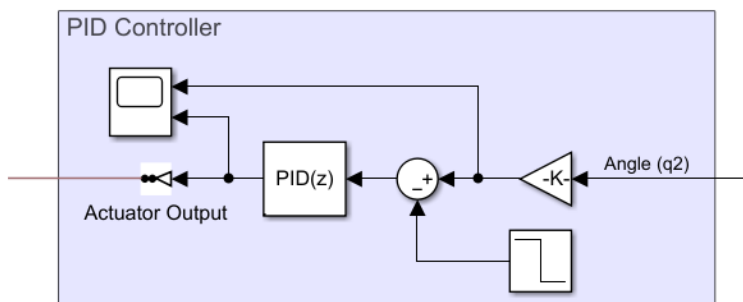


Figura 11. Controlador PID implementado en simulación

Para sintonizar este controlador se utilizó la herramienta incorporada en Simulink® para este fin, el *PID-Tuner* que permite ingresar la función de transferencia de un sistema o deducirla del modelo 3D.

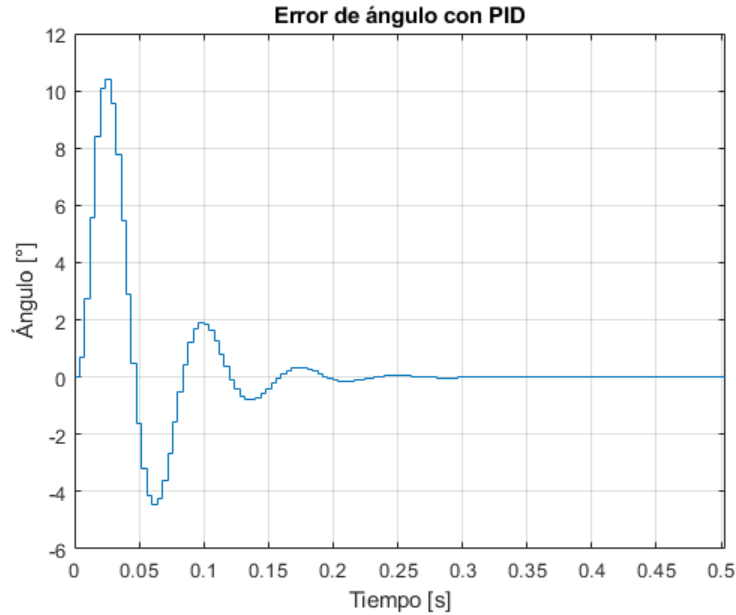


Figura 12. Ángulo de inclinación del sistema controlado con PID

Una vez se determinaron los valores de las constantes del controlador, se obtuvo la respuesta de la planta mostrada en la Figura 12. El controlador resulta efectivo para reducir el error del ángulo de inclinación a un valor cercano a 0° , con oscilaciones de baja amplitud y en un tiempo de establecimiento bajo.

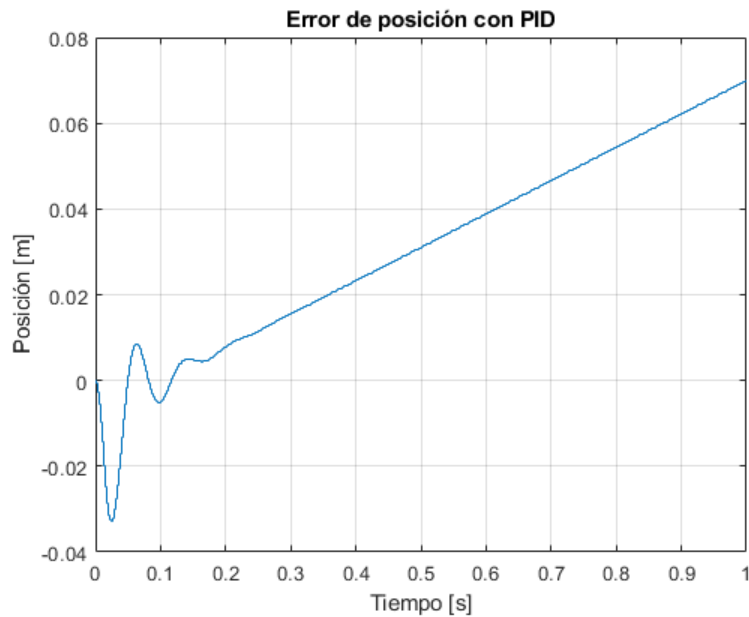


Figura 13. Posición horizontal del sistema controlado con PID

No obstante, como se observa en la Figura 13, la posición de la planta aumenta indefinidamente tras estabilizarse el ángulo de inclinación. Como se había explicado

anteriormente, un controlador PID no es capaz de controlar las dos variables de interés del sistema.

6.1.1 Planta física

Para el control de la planta física se implementó un PID discreto en el microcontrolador seleccionado, este controlador presenta las siguientes ecuaciones para cada acción de control:

$$P_{[n]} = K_P e_{[n]}$$

$$I_{[n]} = \frac{K_I T}{2} (e_{[n]} - e_{[n-1]}) + I_{[n-1]}$$

$$D_{[n]} = K_D \frac{(m_{[n]} - m_{[n-1]})}{T}$$

Donde n representa el tiempo discreto en que se toma la muestra, $e_{[n]}$ es la señal de error, $m_{[n]}$ es la señal medida y T es el periodo de muestreo discreto, para la planta diseñada este periodo es de $4\mu s$.

6.2 Control por LQR

Para controlar un sistema lineal de múltiples salidas, o estados de interés, se puede emplear un Regulador Lineal Cuadrático [6]. En nuestro caso, utilizamos la linealización del sistema presentada en la sección 4.3, donde se representa el sistema con las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} . La representación del sistema se muestra en la Figura 10.

Para este tipo de control, se introduce una matriz de costo \mathbf{Q} , la cual representa el peso de cada estado, un estado con mayor peso llegará más rápido a su valor deseado. La acción de control que se introduce al sistema (u) se determina de la siguiente forma:

$$u = -Kx$$

Donde K es la matriz de ganancia óptima, definida como:

$$K = R^{-1} \mathbf{B}^T P$$

Similar a la matriz \mathbf{Q} , el vector R representa el peso de las señales de control. P se soluciona a través de la ecuación de Riccati:

$$\mathbf{Q} + \mathbf{A}^T P + P \mathbf{A} - P \mathbf{B} \mathbf{B}^T P = 0$$

Siempre que el espacio de estado sea observable y controlable, el vector P tiene una solución única tal que los polos del sistema en lazo cerrado están en el lado izquierdo del semiplano complejo, haciendo al sistema estable [6].

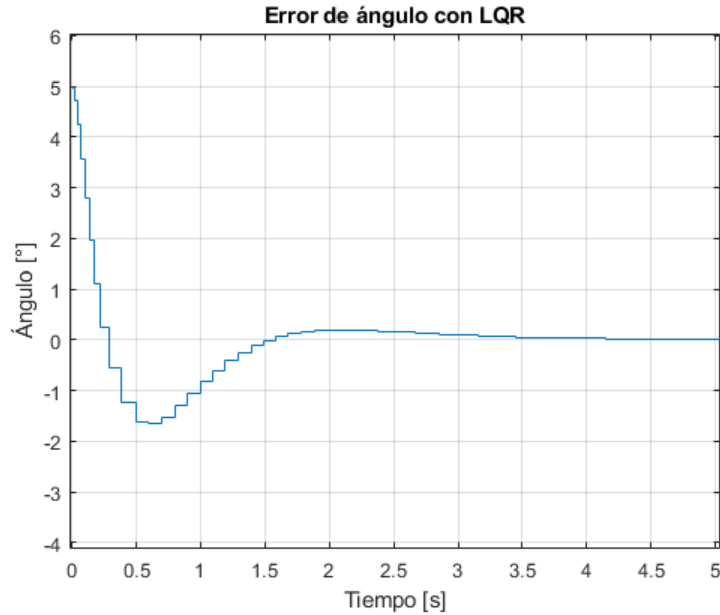


Figura 14. Ángulo de inclinación del sistema controlado con LQR

Una forma de variar la acción del controlador es modificar los pesos de los estados y los actuadores dados por las matrices Q y R , pero para estas simulaciones se tomaron todos los pesos como 1. En la Figura 14 se observa la respuesta del sistema para el estado del ángulo de inclinación, con este controlador se logra llevar el valor del ángulo a un valor cercano a 0° , con un *overshoot* pequeño, pero con un tiempo de establecimiento grande el cual puede ser reducido modificando el valor de Q .

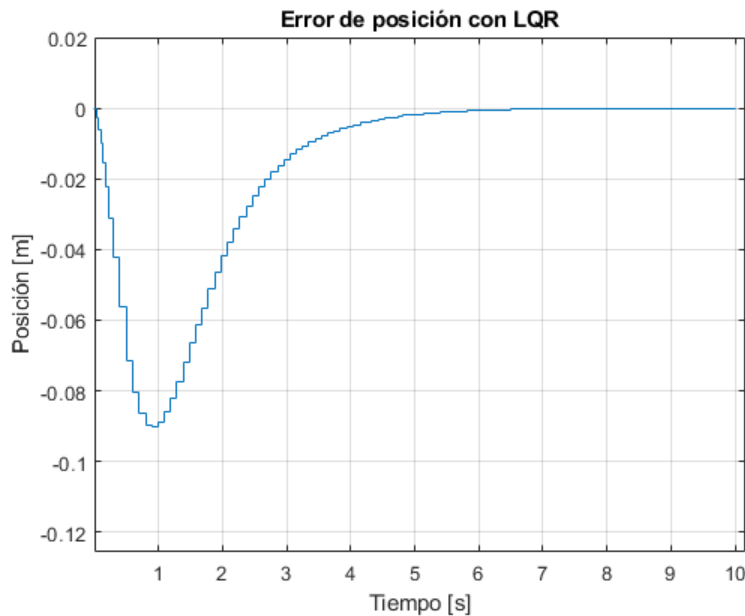


Figura 15. Posición horizontal del sistema controlado con LQR

Al contrario de lo ocurrido con el controlador PID mostrado en la sección anterior, este controlador logra reducir el error de desplazamiento a 0, como se observa en la Figura 15. Con este controlador podría incluso lograrse el seguimiento de trayectoria de un robot balancín de dos ruedas si el valor de referencia de posición (q_1) se cambia a lo largo del tiempo, manteniendo siempre el péndulo balanceado en la posición vertical (q_2).

6.3 Control por retroalimentación de estado (*Pole Placement*)

Como se determinó en la sección 4.4, al menos uno de los polos del sistema se encuentra en el semiplano derecho del plano complejo, haciendo al sistema inestable en lazo abierto. La idea principal de este método de control es hallar una acción de control (u) tal que todos los polos del sistema en lazo cerrado se encuentren en el semiplano izquierdo, de la forma:

$$u = -Kx$$

Donde K representa la matriz de retroalimentación, que fuerza los valores propios del sistema en lazo cerrado a las ubicaciones de los polos especificadas por la ecuación característica deseada [11].

Empleando el mismo modelo mostrado en la Figura 10 se puede simular la respuesta del sistema para una nueva matriz K , la cual fuerce los polos a un valor deseado. Utilizando Matlab[®] se puede determinar la solución a este problema a través de la función *acker()*, la cual soluciona la fórmula de Ackermann para un vector de polos deseados.

6.4 Otros tipos de control

Como se ha mencionado anteriormente, el péndulo invertido es una planta de alto interés en la teoría de control. Este ha sido utilizado ampliamente como banco de pruebas de modelos de control, permitiendo realizar comparaciones sobre un mismo hardware [10]. Por sus múltiples estados se pueden realizar controles independientes sobre estos, lo que permite combinar algoritmos de control para hacer más eficiente el control de cada estado y así optimizar su uso como plataforma de robótica [12].

Capítulo 5

7. Trabajo con estudiantes preuniversitarios

Para cumplir el objetivo de este proyecto que busca incentivar en los estudiantes preuniversitarios el deseo de estudiar una carrera orientada a STEM, primero se analizaron las respuestas que dieron a una encuesta inicial (antes de familiarizarse con la planta), luego se les explicó la construcción y se les enseñó cómo funciona el método de control en esta planta y, después de que hubieran utilizado la planta por algún tiempo, se les realizó otra encuesta para medir el posible impacto que haya generado en sus expectativas de elección de carrera profesional.

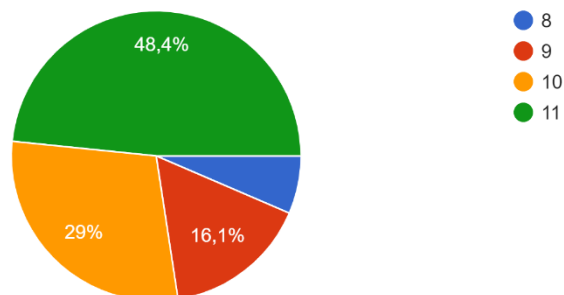
Es de aclarar que el alcance del proyecto tan sólo pretende sondear la opinión de algunos estudiantes preuniversitarios. La selección de los estudiantes preuniversitarios que participaron del estudio no pretende ser una muestra representativa.

7.1 Encuesta inicial a los estudiantes

La encuesta inicial tiene como objetivo identificar la percepción que tienen los estudiantes preuniversitarios ante las carreras en el área de STEM. Se busca identificar los conocimientos previos relacionados con el proyecto y la orientación profesional que los estudiantes han recibido hasta el momento. Además, se les explica a los estudiantes que el proyecto tendrá una etapa en la cual se trabajará con algunos estudiantes a los cuales se les entregará un kit educacional con temas relacionados a la ingeniería, si el estudiante muestra interés en participar de esta etapa, lo indicará en la última sección del formulario.

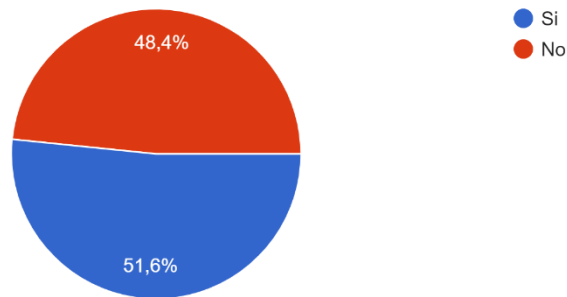
El resumen de los resultados de la encuesta diligenciada por 31 estudiantes preuniversitarios es el siguiente:

¿Qué grado escolar cursa en este momento?
31 respuestas



¿Ha recibido asesoría u orientación para seleccionar una carrera universitaria?

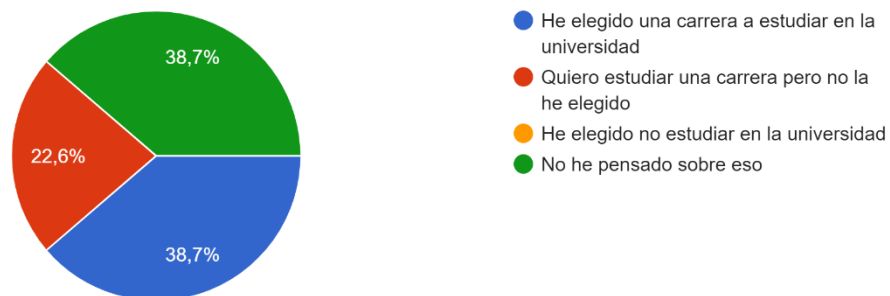
31 respuestas



De las personas encuestadas, todas las que cursan el grado 11^{mo} y una que cursa el grado 10^{mo}, recibieron asesoría u orientación para seleccionar una carrera universitaria, el resto de los participantes indicaron no haber recibido esta asesoría. Esto evidencia la falta de acompañamiento de las instituciones educativas durante las etapas tempranas de la formación y el tardío enfoque en esta labor (cuando los estudiantes ya se encuentran en el último grado).

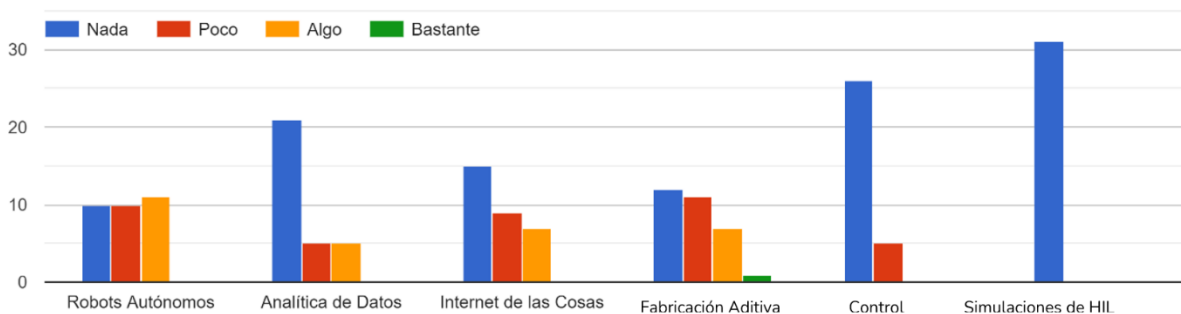
¿Ha pensado qué hacer después de graduarse del colegio?

31 respuestas



Ninguna persona encuestada ha elegido no estudiar una carrera universitaria, sin embargo, no todos han elegido cual carrera quieren estudiar. Solo 12 personas han elegido una carrera, todas corresponden a estudiantes de grados 10^{mo} y 11^{mo}.

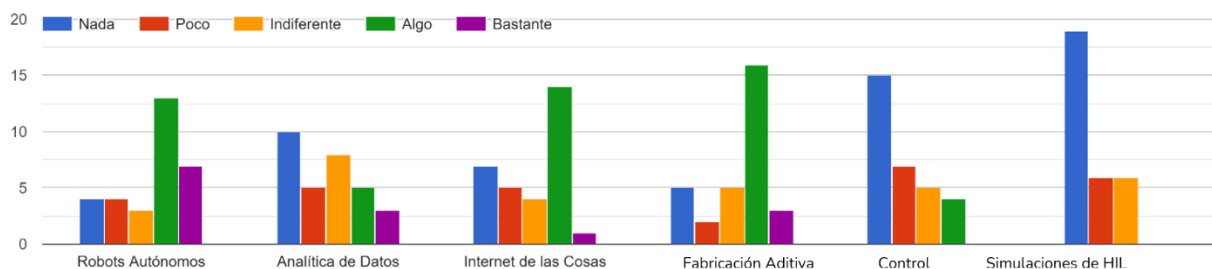
Indique qué tanto conoce de los siguientes temas:



En general, hay poco conocimiento sobre los temas de incumbencia para este proyecto. Como era de esperarse, las simulaciones de Hardware-In-the-Loop son un tema completamente desconocido para los 31 estudiantes que respondieron la encuesta.

Después de esta pregunta, se les indicó a los estudiantes que buscaran una breve descripción de cada uno de estos temas, posteriormente se les preguntó por su interés en conocer más al respecto basado en la descripción que hayan encontrado.

Indique qué tanto interés tienes en aprender sobre estos temas:



A pesar del bajo nivel de conocimiento sobre estos temas, en relación con los Robots Autónomos, IoT y Fabricación Aditiva, más de la mitad de los estudiantes indicaron su interés en profundizar.

Asumiendo que todos aquellos que indicaron conocer de un tema son los mismos que tienen un interés en el mismo, es de resaltar que en ningún caso la revisión corta de los temas los desmotivó a profundizar en ellos.

De los 31 estudiantes encuestados, 9 indicaron que querían participar de la actividad de capacitación y utilizar la planta de control.

7.2 Capacitación a estudiantes

A los estudiantes que eligieron participar de la siguiente etapa se les explicó la planta construida y qué se desea controlar sobre esta. Para familiarizar a los estudiantes con el modelo de la planta se les pidió balancear en su mano un martillo, de manera que ellos intuitivamente apliquen control sobre el ángulo de este sistema de péndulo invertido.



Figura 16. Familiarización de estudiantes con un péndulo invertido

En la Figura 16 se observa a una estudiante balanceando un martillo sobre la palma de su mano. Esto les permite a los estudiantes intuitivamente entender el comportamiento del modelo de péndulo invertido, sin requerir una descripción avanzada de las ecuaciones del sistema dinámico.

Note que se les pidió hacerlo con la masa del martillo en la parte inferior y superior, como se mencionó en la sección 3.2.1 tener una masa mayor en la parte superior permite que, ante una menor variación de la acción de control sobre la planta, esta produzca el mismo comportamiento que al tener la masa concentrada cerca al punto de acción. Esto se debe al aumento de la inercia, que se beneficia de iniciar el control en el punto de equilibrio.



Figura 17. Estudiante familiarizándose y utilizando la planta

En la Figura 17 se observa a una estudiante familiarizándose y utilizando la planta de control física. Primero se le explicó cómo afectan cada acción P , I y D al control del sistema, luego se le muestra estos efectos con una prueba sin contacto con el suelo, finalmente se le permite modificar los valores de estas constantes libremente para intentar hallar un buen controlador.

Para guiar el proceso de sintonización se le explica una versión simple del método de Ziegler–Nichols, donde primero se busca una oscilación sostenida con la constante P , luego se reducen las oscilaciones con la constante D y finalmente se ajusta el error en el tiempo con la constante I .

Realizando este proceso de sintonización manual del controlador la estudiante logra que la planta mantenga el ángulo de inclinación del péndulo invertido cercano a 0° . Sin embargo, para lograr esto el sistema se desplaza de manera horizontal indefinidamente, evidenciando que el controlador PID solo puede controlar una de las variables de interés, como ya se demostró con las simulaciones presentadas en la sección 6.1.

Capítulo 6

8. Casos de uso de esta planta

Dando alcance al objetivo de proponer una plataforma educativa que sea usada también a lo largo de la carrera universitaria como una plataforma educativa por niveles, siendo un hilo conductor entre diversas asignaturas de estudio. Se propone los siguientes casos de uso de esta plataforma.

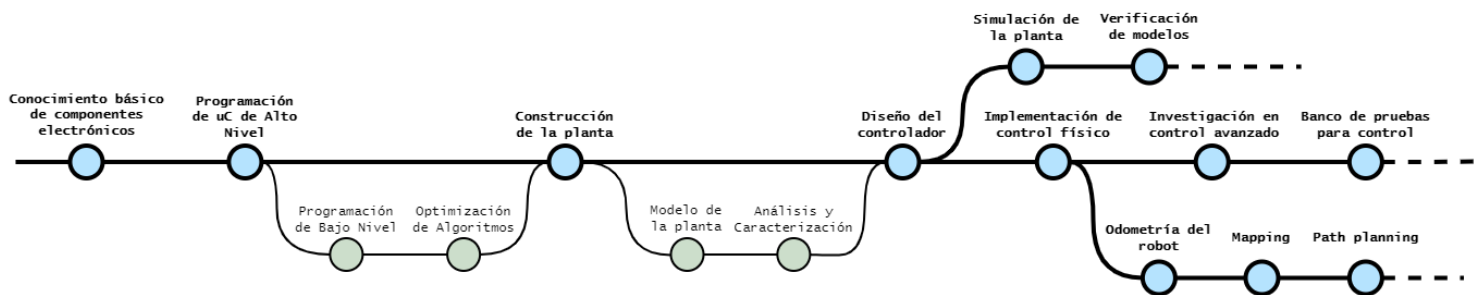


Figura 18. Casos de uso de la plataforma educativa

En la Figura 18 se presenta la ruta de aprendizaje propuesta para la planta educativa diseñada, esta parte desde el conocimiento básico en componentes electrónicos como los motores y sus controladores; se puede profundizar en la programación de microcontroladores para optimizar los algoritmos de sensado y acción; y permite implementar controladores como se observó en este informe.

Al final de la ruta se proponen 3 amplios campos de profundización. El primero es indagar en el estudio de modelos de simulación, ya sea con modelos 3D o representación matemática, y la validez de estos al compararse con su equivalente físico. La segunda es investigación en teoría de control avanzada, creando un banco de pruebas como planta estándar para la prueba y comparación de modelos de control. La tercera ruta es emplear esta plataforma de dos ruedas, capaz de controlar su ángulo de inclinación, como un robot diferencial para estudiar su odometría y control de posición, además se puede incorporar hardware adicional que equipe al robot con sensores para *Mapping*, planeación de ruta y evasión de obstáculos.

9. Discusión y conclusiones

Los resultados de las simulaciones muestran que la planta se puede controlar con respecto a su ángulo de inclinación, pero no todos los controladores pueden reducir el error de la posición horizontal. Sin embargo, los modelos de simulación no son suficientemente precisos para tomar directamente los parámetros encontrados en la sintonización asistida e implementarlos en el control de la planta física. La causa de las diferencias entre los

modelos simulados y la planta física se debe, probablemente, a algunas de las suposiciones hechas, explicadas a continuación:

- La planta solo se desplaza en un eje
- La acción de control de los dos motores es idéntica
- La linealización es para valores muy cercanos a la posición vertical
- Las constantes de amortiguamiento y fricción se desconocen
- El ruido en la lectura del ángulo es despreciable

En este informe, se presenta un sondeo en estudiantes preuniversitarios que demuestra un interés alto en aprender sobre temas relacionados al proyecto, pero siendo una muestra no representativa no se puede asumir como tendencia de la población. Impedimentos en la reunión con todos los estudiantes que deseaban participar del estudio impidió hacer la encuesta final a los estudiantes.

10. Trabajo futuro

Como se mencionó, las suposiciones hechas sobre la planta física en los modelos de simulación evitan una equivalencia mayor entre los dos. Una caracterización de más detalle de la planta y la incorporación en el modelo de más grados de libertad para el desplazamiento es necesario.

A pesar de haber mostrado satisfactorio el diseño de controladores lineales, sería recomendable la investigación e implementación de controladores no lineales para un sistema de péndulo invertido que implementa ruedas, ya que mejoraría la robustez del sistema.

A partir del sondeo realizado a estudiantes preuniversitarios, se recomienda verificar las hipótesis hechas con un estudio de mayor relevancia estadística, buscando una muestra representativa y realizando las tres etapas del trabajo con estudiantes. Este trabajo no logró mostrar el impacto del uso de esta planta en las aspiraciones profesionales de los estudiantes.

Referencias

- [1] T. Kagawa y Y. Uno, «Gait pattern generation for a power-assist device of paraplegic gait,» *IEEE Xplore*, pp. 633-638, 2009.
- [2] Onewheel, «Onewheel GT,» [En línea]. Available: <https://onewheel.com/products/onewheel-gt>.
- [3] C.-K. Chen, T.-D. Chu y X.-D. Zhang, «Modeling and Control of an Active Stabilizing Assistant System for a Bicycle,» *Sensors MDPI*, vol. 19, n° 2, 2019.
- [4] M. ul Hasan, K. Hasam y e. al, «Design and Experimental Evaluation of a State Feedback Controller for Two Wheeled Balancing Robot,» *17th IEEE International Multi Topic Conference*.
- [5] T. Hanafy y M. Metwally, «Simplifications the Rule Base for Stabilization of Inverted Pendulum System,» *Telecommunication, Computing, Electronics, and Control (TELKOMNIKA)*, vol. 12, n° 7, pp. 5225-5234, 2014.
- [6] J. Fang, «The LQR Controller Design of Two-wheeled Self-balancing Robot Based on the Particle Swarm Optimization Algorithm,» *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-6, 2014.
- [7] K. Prakash y K. Thomas, «Study of Controller for a Two Wheeled Self-balancing Robot,» de *International Conference on Next Generation Intelligent Systems*, Kottayam, 2016.
- [8] Mathworks, «MATLAB y Simulink para sistemas de control,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/solutions/control-systems.html>.
- [9] Mathworks, «Simscape,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simscape.html>.
- [10] M. Majczak y P. Wawrzyński, «Comparison of Two Efficient Control Strategies for Two-wheeled Balancing Robot,» de *20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, Miedzydroje, 2015.
- [11] E. Sontag, *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*, Springer, 1998.
- [12] H. Zad, A. Ulasyar, A. Zohaib y S. Hussain, «Optimal Controller Design for Self-balancing Two-wheeled Robot System,» de *International Conference on Frontiers of Information Technology*, Islamabad, 2016.