**Dibujo con letras blancas

Descripción generada automáticamente con confianza media**

**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](#_Toc92795594)

[2. Metodología 4](#_Toc92795595)

[3. Planta 6](#_Toc92795596)

[3.1 Elección de la planta 6](#_Toc92795597)

[3.2 Diseño de la planta de control 7](#_Toc92795598)

[3.2.1 Diseño Mecánico 7](#_Toc92795599)

[4. Caracterización de la planta 9](#_Toc92795600)

[4.1 Péndulo invertido simple 9](#_Toc92795601)

[4.2 Modelo dinámico de la planta 10](#_Toc92795602)

[4.3 Espacio de estados y Linealización 10](#_Toc92795603)

**Capítulo 1**

1. Introducción

En la actualidad la industria se encuentra con un problema de talento humano, no se encuentran personas lo suficientemente capacitadas para desarrollar los retos de la industria moderna. Este problema puede ser producido por la falta de profesionales en el área STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), para suplir esta carencia se debe incentivar en los estudiantes el deseo de estudiar una carrera orientada en esta área. Por esta razón, este proyecto busca desarrollar una planta de control que motive a los estudiantes a ingresar en un programa universitario en el área de STEM.

Por otra parte, la carencia de un hilo conductor en el estudio de la teoría de control produce profesionales subcualificados, que requieren de años adicionales 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 pretende ser el hilo conductor de los estudiantes del área de control.

1. Metodología

Para satisfacer las intenciones de este proyecto se usa la siguiente metodología:

* Elegir una planta de control

Esta planta debe ser lo suficientemente simple al entendimiento de un estudiante no universitario, pero adaptable a diferentes niveles de educación avanzada.

* Diseño de la planta
* Caracterización de la planta
* Simulaciones

Con esto 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 estudiantes
* Capacitación de estudiantes
* Encuesta final a 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. Luego de haber utilizado la planta por un tiempo se les realizará una encuesta para medir el impacto de esta en sus decisiones de carrera profesional.

El presente documento se organiza siguiendo los pasos de esta metodología.

**Capítulo 2**

1. Planta

## 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 poderse implementar diferentes tipos de control sobre esta
* Debe ser posible aumentar la complejidad del aprendizaje gradualmente
* 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, ya que sobre este se pueden aplicar modelos de control como On/Off, PID, control difuso, regulador linear cuadrático y más, permitiendo aumentar la complejidad del estudio de la planta. Además, puede ser usado como una plataforma de robótica para aprender Odometría, Mapping y planeación de ruta, permitiendo que sea usada también en la universidad como una plataforma educativa por niveles a lo largo de la carrera, 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, por ejemplo, los casos mostrados en la Figura 1; los vehículos eléctricos como el *Segway* o el *Onewheel* son medios de transporte que emplean un controlador para el péndulo invertido, la forma de girar con el cuerpo al manejar una bicicleta se modela de esta forma, incluso el cuerpo humano es un péndulo invertido que balancea la parte superior sobre los tobillos en cada paso.

Diagram

Description automatically generated with medium confidence

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

La simplicidad del modelo de referencia del péndulo invertido permite que los estudiantes de colegio 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.

## 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.

### Diseño Mecánico

La planta debe ser posible de construir con un presupuesto menor a $500.000 COP, 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, si la cantidad de unidades requeridas es alta es más rentable crear un molde de inyección para las piezas que se imprimen. Sin embargo, esta planta está pensada para el trabajo colaborativo y por lo tanto se emplea una sola planta por un grupo de estudiantes.

A picture containing handcart, table

Description automatically generated

Figura 2. Render del diseño mecánico inicial

En la Figura 2 se puede observar el diseño inicial del robot balancín de dos ruedas. Note que tanto las bases blancas como la parte interna de las llantas son diseñadas para imprimir en 3D con material PLA y se emplea TPU para la parte externa de la llanta, lo que permite un mejor agarre con el suelo. Los espaciadores son una pieza estándar de latón, de bajo costo y altamente disponible.

**Capítulo 3**

1. 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 determina que muchos investigadores han propuestos 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].

## Péndulo invertido simple

El modelo simple de un péndulo invertido se puede observar en la Figura 3, en este se asume que una masa puntual está conectada a una base con masa a través de un cuerpo con masa despreciable de longitud .

A picture containing text, device

Description automatically generated

Figura 3. Modelo del péndulo invertido

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

## 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:

Con,

Donde y 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.

## 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

Linealizando alrededor del punto de operación da como resultado el espacio de estados lineal del sistema:

Donde,

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