



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PORTABLE PARA  
DEMOSTRACIÓN DE PRÁCTICAS DE TEORÍA DE CONTROL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de ingeniero en mecatrónica

**AUTORES:** Cristhian Isaac Barahona Gil  
Roger Washington Morales Medina  
**TUTOR:** Franklin Illich Kuonquí Gaínza

Guayaquil - Ecuador  
2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Cristhian Isaac Barahona Gil** con documento de identificación N° **0954302469** y **Roger Washington Morales Medina** con documento de identificación N° **0920334190**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

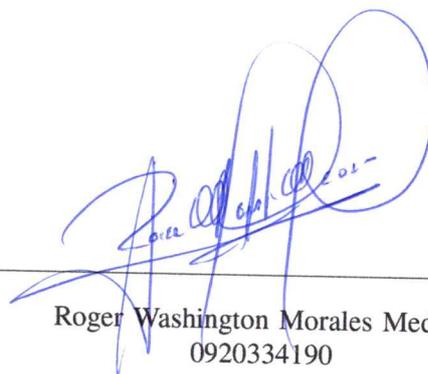
Guayaquil, 14 de septiembre del año 2024

Atentamente,



---

Cristhian Isaac Barahona Gil  
0954302469



---

Roger Washington Morales Medina  
0920334190

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Cristhian Isaac Barahona Gil** con documento de identificación N° **0954302469** y **Roger Washington Morales Medina** con documento de identificación N° **0920334190**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PORTABLE PARA DEMOSTRACIÓN DE PRÁCTICAS DE TEORÍA DE CONTROL**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

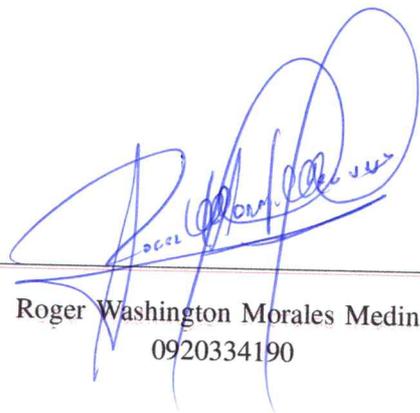
Guayaquil, 14 de septiembre del año 2024

Atentamente,



---

Cristhian Isaac Barahona Gil  
0954302469



---

Roger Washington Morales Medina  
0920334190

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Franklin Illich Kuonquí Gaínza**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PORTABLE PARA DEMOSTRACIÓN DE PRÁCTICAS DE TEORÍA DE CONTROL**, realizado por **Cristhian Isaac Barahona Gil** con documento de identificación N° **0954302469** y por **Roger Washington Morales Medina** con documento de identificación N° **0920334190**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 14 de septiembre del año 2024

Atentamente,



---

Ing. Franklin Illich Kuonquí Gaínza, Mg.  
0909627432

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi padre Jorge Ernesto Barahona por ser la persona que me impulso a desenvolverme la ingeniería, a mi madre Ana Alexandra Caicedo por ser el motor que me impulsa a seguir hacia adelante y a mi hermano Pedro Alexander Alava por ser el ejemplo a seguir en mi día a día.

**Cristhian Isaac Barahona Gil**

La presente tesis esta dedicada a mi Dios Jesús ya que sin el nada hubiera de esto hubiera sucedido, a mi amada esposa que fue uno de los pilares más importantes brindándome su apoyo y confianza, a mis amados hijos que son el motor que me impulsa cada día, A mi madre que en su momento no pude culminar la carrera pero ahora si pude, a mi suegra por su incondicional ayuda, a mi compañero de tesis que ha estado siempre presente durante toda la carrera brindándome su ayuda y su tiempo y a todas las personas que de alguna manera y otra han contribuido con su grano de arena para el logro de mis objetivos propuestos.

**Roger Washington Morales Medina**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a mi madre y a mi hermano por ser el motor que me impulsa cada día y al personal docente por su guía y paciencia durante mi formación académica.

**Cristhian Isaac Barahona Gil**

Con profunda estima extiendo mi mas sincera gratitud a mi tutor de tesis, al magister Kuonquí, el cual nos impulso hasta el ultimo minuto confianza para desarrollar la tesis.

Expreso mi agradecimiento a todos los docentes por sus consejos y asesoría para cumplir con la documentación requerida.

Mi gratitud se extiende a toda la UPS por la oportunidad que le brinda a las personas sin excepción para que logren sus metas que aveces se vuelve inalcanzable pero con esfuerzo todo es posible en la vida.

A cada uno de los presentes mis mas agradecimientos por su invaluable contribución en este viaje académico.

**Roger Washington Morales Medina**

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo la implementación de un módulo de control para la demostración de prácticas de ingeniería en control. Este sistema se basa en un modelo de control de un motor DC, el módulo se caracteriza por su ligereza y facilidad de uso en los entornos educativos. Para la implementación de este prototipo, se cuenta con un encoder para la lectura de la velocidad del motor DC, un puente H que permite el envío de pulsos al motor DC y el controlador en MATLAB-Simulink para la comunicación del sistema y su visualización.

A continuación, utilizando las herramientas de MATLAB-Simulink se realizó la identificación de la función de transferencia del sistema y se desarrolló un controlador PID para la modulación de la respuesta del sistema. Para el diseño del controlador PID, se obtuvo la función de transferencia de la planta y finalmente se realiza la programación en Simulink.

**Palabras claves:** Control automático, motor DC, función de transferencia, PID, MATLAB, Simulink.

## ABSTRACT

The goal of this project is the implementation of a control module for the demonstration of control engineering practices. This system is based on a DC motor control model, the module is characterized by its lightness and ease of use in educational environments. For this prototype implementation, there is an encoder for reading the DC motor speed, an H-bridge that allows to send pulses to the DC motor and MATLAB-Simulink controller for system communication and visualization.

Then, using MATLAB-Simulink tools, the identification of the system transfer function was performed and a PID controller was developed for modulating the system response. For the design of the PID controller, the transfer function of the plant was obtained and finally the programming was performed in Simulink.

**Keywords:** Automatic control, DC motor, transfer function, PID, MATLAB, Simulink.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>PROBLEMA</b>	2
<b>III.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	3
<b>IV.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	4
	IV-A. Objetivo general . . . . .	4
	IV-B. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>V.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	5
	V-A. MATLAB . . . . .	5
	V-B. SIMULINK . . . . .	6
	V-C. ArduinoMEGA 2560 Rev3 . . . . .	6
	V-D. Motor DC . . . . .	7
	V-E. Encoder . . . . .	7
	V-F. Fuente de poder . . . . .	7
	V-G. Sistemas de control . . . . .	8
	V-H. Sistemas de control - Lazo abierto . . . . .	8
	V-I. Sistemas de control - Lazo cerrado . . . . .	9
	V-J. Controlador PID . . . . .	9
	V-K. Señal PWM . . . . .	10
	V-L. Disco de Newton . . . . .	10
<b>VI.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	11
	VI-A. Diseño de la estructura . . . . .	11
	VI-B. Diseño del Disco de Newton . . . . .	11
	VI-C. Circuito electrónico . . . . .	11
	VI-D. Interacción Arduino - Matlab . . . . .	12
	VI-D1. Comunicación Arduino - Matlab . . . . .	12
	VI-D2. Lectura del encoder en Simulink . . . . .	12
	VI-D3. Envíos de pulsos PWM de Simulink a Arduino . . . . .	12
	VI-E. Identificación del sistema . . . . .	13
	VI-E1. Adquisición de datos . . . . .	13
	VI-E2. Identificación de la función de transferencia . . . . .	13
	VI-F. Diseño de controlador PID . . . . .	13
	VI-G. Implementación de control PID en programación Simulink . . . . .	13
<b>VII.</b>	<b>RESULTADOS</b>	14
	VII-A. Estructura del módulo . . . . .	14
	VII-B. Programación del sistema en lazo abierto . . . . .	14
	VII-C. Selección de la función de transferencia . . . . .	15
	VII-D. Programación del sistema con el control PID . . . . .	15
<b>VIII.</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	16
<b>IX.</b>	<b>PRESUPUESTO</b>	17
<b>X.</b>	<b>Conclusiones</b>	18

<b>XI. Recomendaciones</b>	19
<b>Anexo A: Diseño de la estructura y planos</b>	22
<b>Anexo B: Programación del sistema en Simulink</b>	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Entrenador de planta de control de National Instruments [6]. . . . .	5
2.	Intefaz de SIMULINK fuente: Autores. . . . .	6
3.	Tarjeta Arduino MEGA 2560 [11]. . . . .	6
4.	Motor DC [12]. . . . .	7
5.	Encoder de cuadratura o efecto hall [15]. . . . .	7
6.	Diagrama de bloques de un modelo de control por lazo cerrado [18]. . . . .	8
7.	Diagrama de bloques de un modelo de control por lazo abierto [20]. . . . .	8
8.	Diagrama de bloques de un modelo simple con PID [23]. . . . .	9
9.	Señal PWM [25]. . . . .	10
10.	Disco de Newton a baja velocidad, mediana velocidad y alta velocidad [26]. . . . .	10
11.	Circuito electrónico de la planta fuente: Autores. . . . .	11
12.	Detección de la tarjeta Arduino Mega 2560 en Matlab fuente: Autores. . . . .	12
13.	Lectura de encoder en RPM mediante Simulink fuente: Autores. . . . .	12
14.	Envío de valor a bloque PWM de Arduino mediante Simulink fuente: Autores. . . . .	13
15.	Modelos obtenidos del System Identification fuente: Autores. . . . .	13
16.	Módulo de control con los componentes implementados fuente: Autores. . . . .	14
17.	Respuesta en lazo abierto fuente: Autores. . . . .	14
18.	Funciones de transferencia desarrollados en System Identification fuente: Autores. . . . .	15
19.	Gráfica del sistema con control PID fuente: Autores. . . . .	15
20.	Estructura diseñada en el software Solidworks fuente: Autores. . . . .	22
21.	Disco de Newton fuente: Autores. . . . .	22
22.	Planos de la estructura fuente: Autores. . . . .	23
23.	Sistema en lazo abierto fuente: Autores. . . . .	24
24.	Sistema con implementación del control PID fuente: Autores. . . . .	24
25.	Interfaz de usuario para el sistema con control PID fuente: Autores. . . . .	24

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Cronograma . . . . .	16
II.	Presupuesto . . . . .	17

## I. INTRODUCCIÓN

La automatización industrial ha revolucionado los procesos de producción, permitiendo a las empresas optimizar su eficiencia y calidad en todo el mundo. Para los futuros ingenieros, dominar las técnicas y teorías de control automatizado es esencial, ya que estas tecnologías son parte fundamental en el desarrollo de sistemas industriales avanzados. Sin embargo, en el contexto educativo, existen limitaciones considerables en el acceso a herramientas prácticas que permitan aplicar estos conocimientos de manera efectiva.

Uno de los principales retos que enfrentan las instituciones académicas es la disponibilidad de equipos didácticos completos que integren tanto la adquisición de datos como el control y la visualización del comportamiento de sistemas dinámicos. Estos equipos, que suelen adquirirse por separado, presentan altos costos, lo que limita la cantidad de unidades disponibles para los estudiantes. Además, su mantenimiento resulta complicado debido a la falta de componentes fácilmente reemplazables, lo que puede generar interrupciones en las prácticas académicas.

En respuesta a estos desafíos, surge la necesidad de desarrollar una solución más accesible y eficiente para el aprendizaje de la teoría de control. Este proyecto se enfoca en la creación de un módulo didáctico portable que permita a los estudiantes interactuar con un sistema real de control de velocidad de motores DC. La portabilidad del módulo permitirá su uso en diversas ubicaciones dentro de la institución, facilitando su integración en diferentes entornos educativos sin necesidad de equipos costosos o complejos.

El proyecto no solo busca reducir los costos mediante el uso de componentes asequibles y disponibles en el mercado local, sino también asegurar que el módulo sea fácilmente mantenible y adaptable. De esta manera, los estudiantes podrán realizar ajustes y modificaciones en el sistema, expandiendo sus conocimientos en automatización y mantenimiento de equipos de control.

El desarrollo de este módulo representa una herramienta clave para la formación práctica en teoría de control, mejorando la calidad de las prácticas estudiantiles y preparándolos para enfrentar los desafíos del entorno industrial actual. A través de esta iniciativa, se espera que los estudiantes no solo comprendan los conceptos teóricos, sino que también adquieran experiencia directa en el diseño y control de sistemas dinámicos, contribuyendo así a una formación integral en la disciplina.

## II. PROBLEMA

El avance de la automatización ha tenido un impacto en el desarrollo de la industria en todo el mundo durante las últimas décadas, razón por la cual las grandes empresas han automatizado los procesos de desarrollo de productos para tener mayor control en sus procesos industriales [1]. Actualmente en la automatización se practican conceptos de Teoría de Control para el desarrollo de sistemas automatizados que se implementan en la industria.

Para el desarrollo y demostraciones en las prácticas de asignaturas como Teoría de Control, se requiere de un módulo de adquisición de datos, una planta de control y software para la visualización del comportamiento de la planta. Sin embargo, cada uno de estos 3 equipos vienen por separado con su propio costo de adquisición, dependiendo de los requerimientos de la institución el valor puede ser muy alto ya que se deben tener suficientes unidades disponibles para todos los estudiantes y debe cumplir con las funciones necesarias para realizar prácticas estudiantiles [2].

Estos equipos al ser adquiridos bajo una marca poseen garantía de fábrica que asegura su buen funcionamiento. Sin embargo, tienden a tener componentes de difícil reemplazo por su diseño electrónico siendo necesario el cambio del módulo. Además, las plantas de control pueden sufrir desperfectos en caso de golpes o cortocircuitos. En consecuencia, se requiere el cambio del componente; esto genera el paro del equipo afectando el desarrollo de las prácticas de los estudiantes [3].

Los módulos didácticos tienen diversos modelos y funciones a aplicar en la práctica, por lo cual suelen ser robustos y de dimensiones considerables, pero para la ejecución práctica en el aula se requieren módulos compactos con funciones y conexiones básicas. Además, los equipos existentes en el laboratorio no son suficientes para la cantidad de estudiantes [4].

### III. JUSTIFICACIÓN

En la labor diaria del estudiante resulta fundamental realizar prácticas para reforzar los conceptos de asignaturas del área de Control para el momento que el estudiante ingrese en la industria pueda resolver diversas situaciones y problemas que surgen en ésta. El desarrollo de un módulo didáctico no solo ayudará a los estudiantes en sus prácticas de control, también les permitirá ligeramente introducirse en el campo de la automatización.

El desarrollo de este módulo se enfocará en el uso de componentes de bajo costo y ampliamente disponibles en el mercado local, resultando en una sustitución sencilla de elementos obsoletos o deteriorados por nuevos componentes. Esto facilitará tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo del módulo, asegurando su correcto funcionamiento a lo largo del tiempo.

Para el desarrollo del módulo didáctico y la planta de control se consideran características como el peso, espacio y conectividad del mismo, para facilitar su movilización y permitirse realizar las demostraciones en diferentes espacios de la institución.

Por todo esto, se ha decidido desarrollar un modulo didáctico portable con control de velocidad de un motor DC aplicando microcontroladores con lenguaje de programación abierto para permitir modificaciones en el módulo y poder ampliar el alcance de este implementando más componentes para las prácticas de Teoría de control.

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Desarrollar un módulo didáctico portable de control de velocidad de un motor DC usando componentes de bajo costo con fines demostrativos en clases de Teoría de Control.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Desarrollar el módulo didáctico considerando el tamaño, peso, conectividad y almacenamiento de la información.
- Diseñar un controlador PID utilizando la función de transferencia identificada para el control de velocidad del motor DC.
- Integrar el sistema de control diseñado en el módulo didáctico para la verificación de su funcionalidad.

## V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A lo largo de la historia, el ser humano ha desarrollado diversos métodos para satisfacer sus necesidades, desde la creación de productos hasta la automatización de procesos. Este avance ha implicado la sustitución del trabajo humano por máquinas con el propósito de asegurar precisión y rapidez. Con el progreso de la electrónica, los componentes de estado sólido y estudios matemáticos se han implementado nuevas técnicas de control (LAZO CERRADO - ABIERTO) con estas herramientas ha sido posible realizar un control altamente eficiente de un producto o proceso sin la intervención humana, lo que ha aumentado la vida útil de los equipos y, por ende, su eficiencia [5].

Las técnicas de control son fundamentales en el desarrollo de procesos automatizados, siendo el área de Teoría de Control una de las bases de la carrera de Mecatrónica para la formación de los estudiantes y por ende, se busca un aprendizaje tanto teórico como práctico. El estudiante debe dominar estos conceptos de control para que pueda desenvolverse en el ámbito industrial resolviendo problemas, desarrollando e implementando procesos en la industria y para fomentar su crecimiento académico y personal se implementan módulos didácticos de control en sus prácticas estudiantiles.

Como se muestra en la Figura 1, un módulo didáctico de control es un dispositivo donde los estudiantes pueden aplicar los conocimientos adquiridos en la materia Teoría de Control a un caso real. Aunque, la experiencia con los módulos didácticos difiere de la experiencia laboral en la industria, esta práctica didáctica ayuda al estudiante a fortalecer las bases de estos conocimientos teóricos mediante la aplicación práctica.



Figura 1. Entrenador de planta de control de National Instruments [6].

### V-A. MATLAB

MATLAB es la abreviatura de MATrix LABoratory (Laboratorio Matricial). Es un programa muy útil en la carrera de ingeniería ya que realiza cálculos numéricos con vectores, matrices y números escalares tanto reales como complejos, al tener su propio lenguaje de programación incluso permite realizar operaciones con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas según lo requerido por el usuario [7].

MATLAB opera principalmente con matrices pero también tiene variadas funciones y aplicaciones adicionales más avanzadas donde puedes mostrar gráficas en 2D y 3D, cálculo de funciones de transferencia y más. Este software maneja matrices de variables en sus códigos por lo que la asignación de memoria de cada variable se realiza de forma dinámica y eficiente, es decir, no se requiere declarar las variables y menos declarar el tipo de variable [8].

## V-B. SIMULINK

Simulink es un entorno de programación basado en diagramas de bloques que permite diseñar sistemas multi-dominio. Es un software muy útil, ya que facilita el estudio de la respuesta del sistema sin necesidad de escribir código, lo que lo hace accesible y de fácil aprendizaje en modelados matemáticos como se muestra en la figura 2 [9].

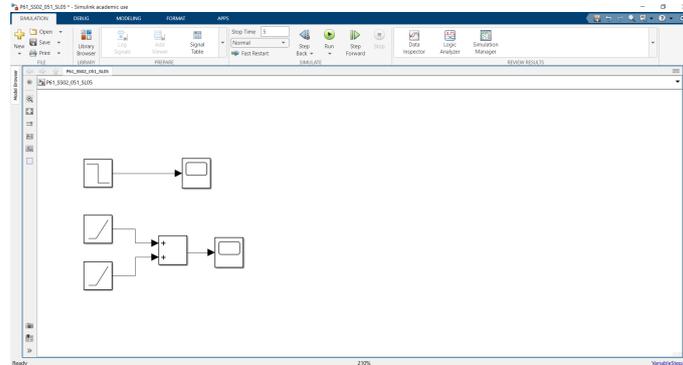


Figura 2. Intefaz de SIMULINK fuente: Autores.

Simulink es una herramienta de gran utilidad en la enseñanza y práctica de los conceptos de control al poseer una interfaz amigable con el usuario que le permite la simulación de diversos proyectos sin comprometer el hardware del producto final permitiendo al usuario realizar diversas simulaciones para estudiar el comportamiento del sistema.

## V-C. ArduinoMEGA 2560 Rev3

Un microcontrolador es un módulo lógico programable que contiene pines de entrada y salida para establecer una comunicación tanto analógica como digital. Existe una gran variedad de microcontroladores en el mercado, cada uno con sus propias características en hardware y software.

Como se muestra en la Figura 3, el Arduino MEGA 2560 es una placa de desarrollo con un microcontrolador ATmega2560 para el desarrollo de proyectos de todo tipo gracias a su programación basado en lenguaje C, estos microcontroladores tienen variadas funciones adicionales según el modelo requerido por el proyecto pero también puedes implementarle estos módulos por separado [10].



Figura 3. Tarjeta Arduino MEGA 2560 [11].

Una de las características del ArduinoMEGA es su espacio de almacenamiento ya que el código generado por Simulink y la comunicación serial entre el microcontrolador y Simulink resultan muy pesados para otras versiones de microcontroladores Arduino.

#### V-D. Motor DC

Los motores DC se caracterizan por su polarización ya que esta determina su sentido de giro. Estos motores son de los más comunes y económicos, como se puede observar en la Figura 4, se pueden encontrar en juguetes de pila o herramientas del hogar.



Figura 4. Motor DC [12].

Cuando la corriente eléctrica pasa por la bobina, esta actúa como un imán cuyos polos se atraen o se repelen con el imán ubicado en la parte inferior. Al completar media vuelta, el flujo de corriente se interrumpe, y la bobina deja de comportarse como un imán, pero sigue moviéndose por inercia hasta completar otra media vuelta. En ese momento, la corriente vuelve a fluir, reiniciando el ciclo y permitiendo que el motor gire de manera continua [13].

#### V-E. Encoder

Los encoder son sensores electrónicos que generan una señal digital como respuesta al movimiento. Algunos modelos censan la rotación y otros modelos censan el movimiento lineal. Existen diversos modelos de encoder disponibles en el mercado, desde modelos robustos aplicados a nivel industrial hasta modelos sencillos como el mostrado en la Figura 5.

Los encoder pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones, estos permiten el uso de transductores para el control de la velocidad en motores, sensores para medición, de velocidad y de posición [14].

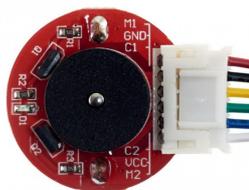


Figura 5. Encoder de cuadratura o efecto hall [15].

#### V-F. Fuente de poder

La fuente de poder energiza el equipo, este recibe voltaje alterno de 120 a 240 voltios AC y suministra potencia al equipo según lo requerido, generalmente como voltaje DC que es el más utilizado por equipos electrónicos, en este caso requerimos de 12 voltios DC para energizar el motor DC.

### V-G. Sistemas de control

Un sistema de control es un conjunto de componentes interconectados diseñado para realizar una tarea específica. Son comunes en el sector industrial, ya que permiten alcanzar objetivos predeterminados. En otras palabras, el control es la técnica de medir o detectar una condición o situación, compararla con el valor deseado, y actuar en consecuencia para reducir la diferencia entre ambos [16].

En base a la Figura 6 los elementos que comúnmente forman parte de un sistema de control son:

- Señal de mando: Es la señal fijada por el usuario en la planta.
- Comparador: Compara la señal de mando con la señal retroalimentada y genera la señal de error para corregir la señal de salida de la planta.
- Controlador: Variables que condicionan la señal para mejorar el control de la salida de la planta.
- Planta: La situación que se desea controlar.
- Retroalimentación: Dispositivo que mide la magnitud o señal de salida y la retro alimenta con el comparador para nuevamente generar la señal de error [17].

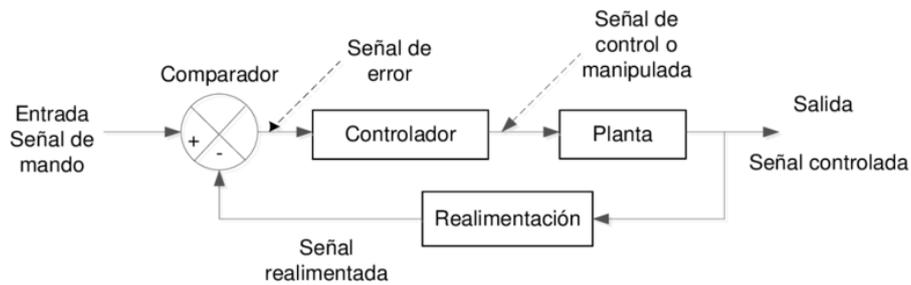


Figura 6. Diagrama de bloques de un modelo de control por lazo cerrado [18].

Existen dos clasificaciones de sistemas de control:

- Lazo de control abierto.
- Lazo de control cerrado.

### V-H. Sistemas de control - Lazo abierto

La principal característica de un sistema de control de lazo abierto es el hecho de no poseer una retroalimentación de la planta pues su salida es independiente del mismo [19], es decir, no genera una señal de error para controlar la respuesta del sistema en caso de haber perturbaciones externas, como se muestra en la Figura 7 este modelo controla la respuesta del sistema pero no puede controlar el sistema durante su ejecución.



Figura 7. Diagrama de bloques de un modelo de control por lazo abierto [20].

### V-I. Sistemas de control - Lazo cerrado

Como se muestra en la figura 6, este sistema se caracteriza por su retroalimentación que le permite comparar el valor real con el deseado para obtener el error del sistema y así el controlador manipula la señal y la planta responde de acuerdo a la consigna mediante las salidas físicas, es decir, los actuadores. Todo sistema que requiera de un control automático aplica un lazo cerrado en el sistema, físicamente se implementa un sensor que mide la variable de salida y en el sistema se procesa la corrección del error. En otras palabras el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación negativa para reducir el error del sistema [21].

### V-J. Controlador PID

Un controlador PID es una herramienta de control que proporciona la capacidad de controlar el tiempo de respuesta y mejorar la precisión de la salida del sistema. Asimismo, funciona como un sistema de ajuste y predicción automático como se muestra en la ecuación 1.

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

Donde  $K_p$  representa la ganancia proporcional,  $K_i$  la ganancia integral y  $K_d$  la ganancia diferencial. Al ajustar estas ganancias el controlador PID se ejecuta de forma que la variable de salida en el sistema se muestra con mayor velocidad y estabilidad. Existen diversos tipos de controladores PID:

- Control P: Ciertos proyectos no requieren del Control PID en su totalidad, es posible trabajar solo con la ganancia Proporcional manteniendo la estabilidad del controlador.
- Control PI: Es un método popular ya que introduce la acción integral en la acción proporcional del la sistema, es la forma más simple de eliminar los problemas de oscilación y error en el estado estacionario.
- Control PD: En raras ocasiones se requiere aplicar el control PD, un controlador Proporcional junto con un controlador Derivativo. Esta parte derivativa es la que permite parar a tiempo la entrada en el sistema [22].

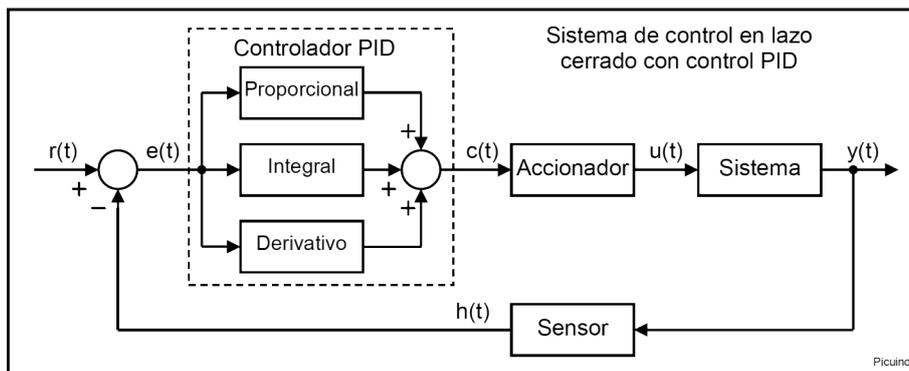


Figura 8. Diagrama de bloques de un modelo simple con PID [23].

Los controladores PID previamente mencionados son los más comunes en la industria, hay una amplia gama de controladores disponibles según el proyecto a desarrollar, desde controladores básicos como el modelo mostrado en la Figura 8 hasta controladores más avanzados y complejos.

### V-K. Señal PWM

PWM (Pulse Width Modulation, Modulación por ancho de pulso) transmite una señal digital en base a la velocidad angular actual del motor. Lo que busca es generar un nivel DC analógico proporcional al tiempo en alto de la señal durante un periodo constante como se muestra en la Figura 9 [24].

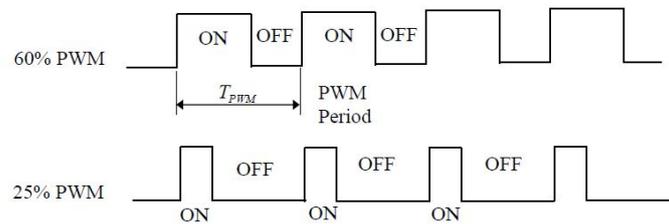


Figura 9. Señal PWM [25].

### V-L. Disco de Newton

El disco de Newton consiste en un disco con diversos colores del arcoíris pintados en su superficie que, al rotar este disco sobre su propio eje a una alta velocidad se genere un efecto óptico donde se mezclan estos colores dando como color final el color blanco; este disco se usará principalmente como un indicador de la velocidad del motor respecto al estado visual de los colores del disco según la velocidad que tenga el motor en su momento como se muestra en la figura 10 [26].



Figura 10. Disco de Newton a baja velocidad, mediana velocidad y alta velocidad [26].

## VI. METODOLOGÍA

### VI-A. Diseño de la estructura

Al ser un módulo portable se toma en cuenta el peso y la resistencia del mismo en caso de golpes y caídas, por ello se eligió el acrílico también conocido como PMMA o Polimetacrilato de metilo que es un material termoformable lo que facilita su moldeado según los requerimientos del usuario. Además, este material presenta una resistencia a los Rayos UV de un 99 % lo que evita su amarillamiento por el tiempo, esto es de suma importancia para nuestro dispositivo ya que de esa forma se mantiene la visibilidad del Disco de Newton.

Para el armado del módulo se usa pegamento acrílico por tener una alta transparencia y alta resistencia a esfuerzos brindándole al módulo un buen acabado y una fuerte fijación, para mas información respecto al diseño del módulo puede acercarse al Anexo A.

### VI-B. Diseño del Disco de Newton

Para visualizar la salida de este módulo, se utiliza un Disco de Newton como se observa en el Anexo A, el cual consiste en un disco dividido en sectores circulares pintados con los siete colores principales del arcoíris: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. Al aplicar velocidad de rotación en el disco, el espectro de los colores se mezcla al ojo humano dando un color blanco o gris claro, este efecto es principalmente perceptual al ojo humano ya que no se pueden visualizar los colores individualmente en altas rotaciones, para visualizar el disco de Newton desarrollado, puede acercarse al Anexo A.

### VI-C. Circuito electrónico

El esquemático de las conexiones eléctricas de la planta, estas conexiones permiten la comunicación entre el sensor, microcontrolador, puente H y Simulink. Como se observa en la figura 11, el encoder se conecta al pin digital 2 como entrada y el puente H se conecta al pin digital 7.

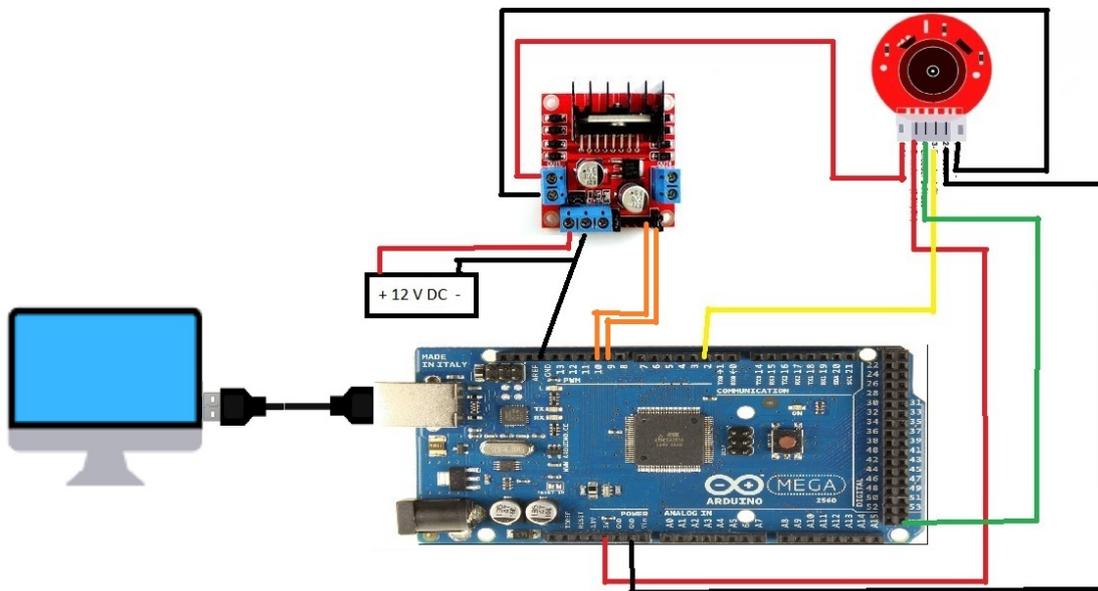


Figura 11. Circuito electrónico de la planta fuente: Autores.

#### VI-D. Interacción Arduino - Matlab

Una parte fundamental del proyecto es la programación del Arduino para que pueda interactuar con Simulink, dado que de esto depende la captura de datos para la posterior identificación del sistema y el funcionamiento del controlador.

*VI-D1. Comunicación Arduino - Matlab:* Matlab tiene varios paquetes para la comunicación entre hardware externo con el software Simulink que han sido creados por el staff de Simulink o desarrolladores independientes.

Para este módulo, se utiliza el Paquete de Soporte de Simulink desarrollado por el staff de Simulink, el cual tiene compatibilidad con versiones de Matlab desde R2016b hasta la versión mas reciente R2024b y se continua actualizando hasta la actualidad además de contener bloques de entrada y salida de datos digitales y analógicos entre Arduino y Simulink.

Una vez instalado el paquete Arduino, se procede a conectar la tarjeta Arduino Mega 2560 al PC y cuando el software Matlab lo detecta se muestra en el Command Window el mensaje Arduino Mega 2560 detected como pueden observar en la figura 12.

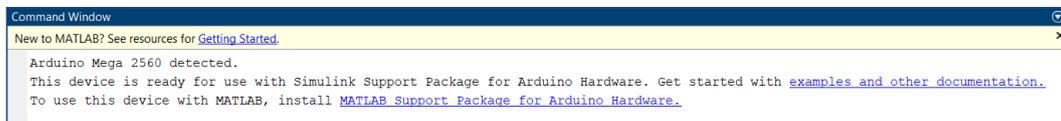


Figura 12. Detección de la tarjeta Arduino Mega 2560 en Matlab fuente: Autores.

*VI-D2. Lectura del encoder en Simulink:* El encoder inicialmente muestra una señal digital de 1 y 0, se va a convertir esta señal en RPM para tener una mejor visualización de la señal, para ello se usa una fase del encoder al que mediante un bloque de Simulink se identifican las señales de subida y se convierte a valores enteros de 8 bits con un rango de 0 a 255, para contar la señales de subida se aplica un bloque Delay que retrasa la señal y se convierte a segundos, para dividirse por el numero de pulsos por revolución del encoder y se convierte a minutos como se muestra en la figura 13 el diagrama en Simulink de la lectura del encoder en RPM.

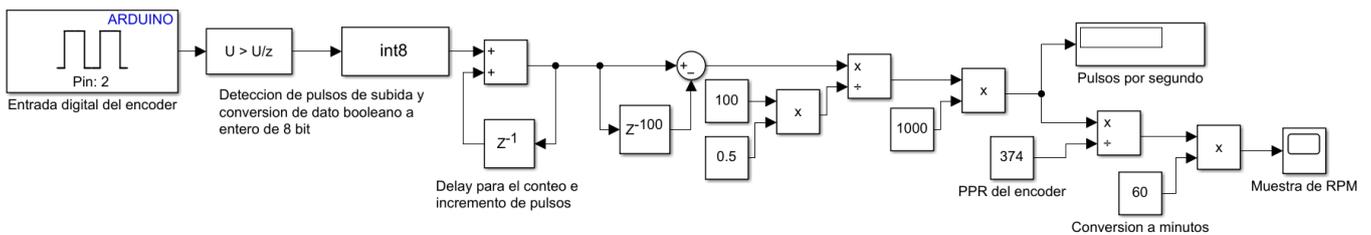


Figura 13. Lectura de encoder en RPM mediante Simulink fuente: Autores.

*VI-D3. Envíos de pulsos PWM de Simulink a Arduino:* Se usan datos enteros de 8 bits ya que almacenan hasta 255 valores y se programa un tren de pulsos que se ingresa a un bloque PWM del Arduino MEGA con una frecuencia de 980.4 Hz como se observa en la figura 14.

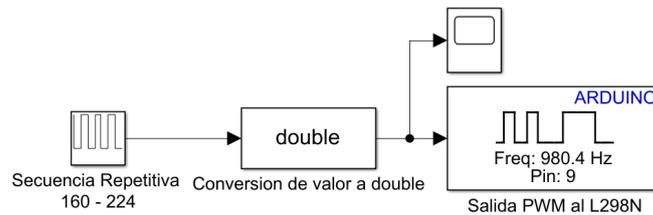


Figura 14. Envío de valor a bloque PWM de Arduino mediante Simulink fuente: Autores.

## VI-E. Identificación del sistema

**VI-E1. Adquisición de datos:** Establecida la comunicación entre MATLAB y el Arduino MEGA, se envían pulsos PWM al L298N para que este habilite al motor y controle su velocidad. A su vez se muestran los datos del encoder para realizar la adquisición de datos en base a la señal de entrada y salida en el sistema para identificar la función de transferencia, los datos se pueden visualizar en una gráfica en la sección de Resultados en la figura 17.

**VI-E2. Identificación de la función de transferencia:** Para la identificación de la función de transferencia, usan los datos convenientes de la gráfica y se cargan en el System identification para identificar la función de transferencia que mejor describa el sistema.

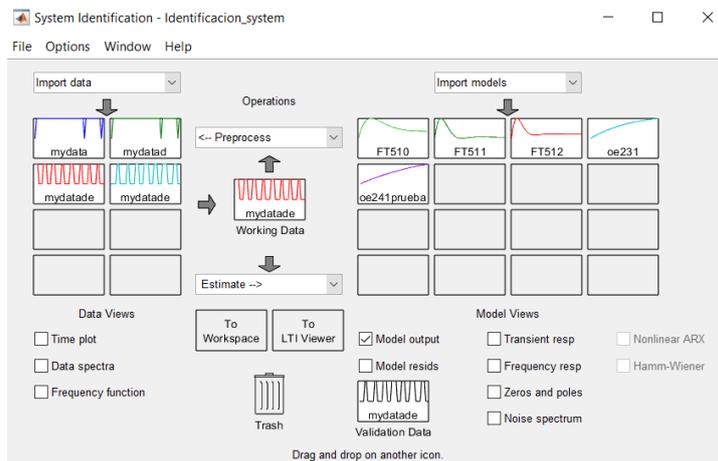


Figura 15. Modelos obtenidos del System Identification fuente: Autores.

Como se observa en la figura 15, se muestran los datos obtenidos y procesados para estimar modelos que describan el sistema.

## VI-F. Diseño de controlador PID

Utilizando la función PID Tuner para identificar los valores PID que permiten un desempeño adecuado del modelo en características como el sobrenivel y el tiempo de estabilización.

## VI-G. Implementación de control PID en programación Simulink

Para integrar el control PID en el programa Simulink se utiliza el bloque PID en el cual se ingresan los valores obtenidos por el PID Tuner y se agrega la retroalimentación a nuestro sistema para comparar la señal de entrada con la señal de salida y obtener el margen de error a corregir por el controlador.

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Estructura del módulo

El módulo se desarrolla tomando en cuenta su ligereza y la transparencia del material, permitiendo la visualización del Disco de Newton y de los componentes internos como se puede observar en la figura 16.

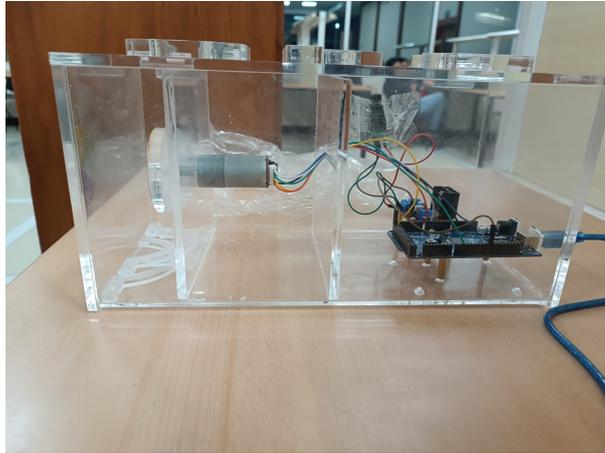


Figura 16. Módulo de control con los componentes implementados fuente: Autores.

### VII-B. Programación del sistema en lazo abierto

Con la visualización de datos del encoder y el envío de pulsos PWM al motor DC, se realiza la programación en lazo abierto y ejecutamos la simulación, con un scope se visualiza la gráfica y con un bloque se recolectan los datos PWM y RPM en el workspace, la programación en Simulink del sistema en lazo abierto lo pueden encontrar en el Anexo B.

Luego de la simulación, se puede estudiar la gráfica de respuesta del sistema donde se visualiza el tren de pulsos que ingresa en el bloque PWM y los valores RPM del encoder como se muestra en la figura 17 donde la señal de color azul es la señal de entrada y de color amarillo es la señal de salida.

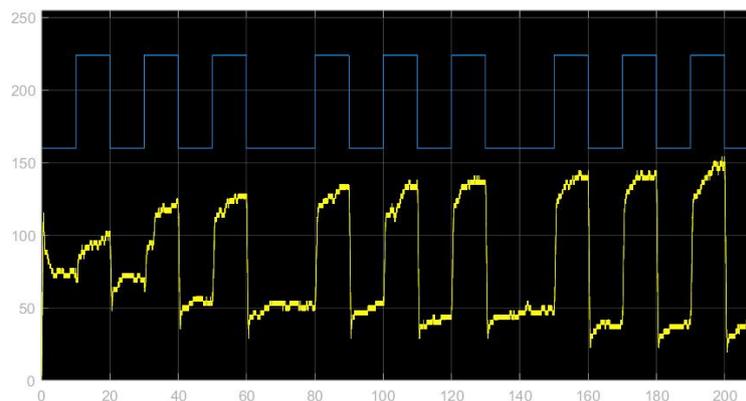


Figura 17. Respuesta en lazo abierto fuente: Autores.

### VII-C. Selección de la función de transferencia

Se realiza una comparativa entre los modelos diseñados en el System Identification, se desarrollan 5 modelos diferentes al modificar sus polos y sus ceros, para observar el porcentaje de identificación del sistema, al comparar todos los modelos simulados en el System Identification se selecciona el modelo oe231 por tener un 79.89 % de identificación, tal como se muestra en la figura 18.

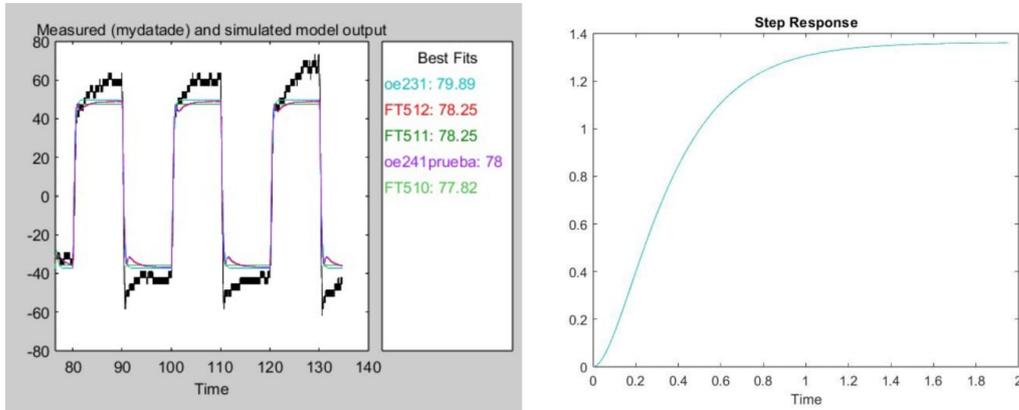


Figura 18. Funciones de transferencia desarrollados en System Identification fuente: Autores.

### VII-D. Programación del sistema con el control PID

Con el control PID ya diseñado se retroalimenta el sistema y se simula para observar la respuesta del sistema con el control PID ya implementado, además de añadirse una interfaz para el usuario donde se facilite la edición del Setpoint, los valores PID y se muestre la gráfica del sistema, para observar la programación y la interfaz del sistema pueden acercarse al Anexo B.

Al tener el sistema identificado junto con el controlador PID ya implementado y su retroalimentación para la comparación de las señales, se ejecuta la simulación y se comprueba el control y la respuesta del sistema con varios Setpoint, finalmente se observa la gráfica mediante la herramienta Data Inspector.



Figura 19. Gráfica del sistema con control PID fuente: Autores.

Para darle una mejor presentación a nuestro sistema, se implementa una interfaz para el usuario pueda editar el Setpoint, los valores PID y visualizar la gráfica del sistema, esta interfaz la pueden visualizar en el Anexo B.

## VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de actividades:

Tabla I  
CRONOGRAMA

<b>CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>															
<b>TÍTULO: DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PORTABLE PARA DEMOSTRACIÓN DE PRÁCTICAS DE TEORÍA DE CONTROL</b>															
ACTIVIDAD	ACTIVIDAD ESPECÍFICA	RESPONSABLE	VIGENCIA 2024												TOTAL
			MES 1		MES 2		MES 3		MES 4		MES 5		MES 6		
			P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	
PROYECTO E INVESTIGACION	Investigar los principios fundamentales de los módulos de control.	Roger Morales - Cristhian Barahona	1	1	1	1								3	2
	Problema de investigación.	Roger Morales - Cristhian Barahona			1	1								2	1
	Justificación, Objetivo general y objetivos específicos.	Roger Morales - Cristhian Barahona			1	1	1							1	2
	Marco teórico de la investigación.	Roger Morales - Cristhian Barahona			1	1	1							2	1
	Desarrollo del sistema en lazo abierto.	Roger Morales - Cristhian Barahona					1	1	1					2	1
DESARROLLO DEL MÓDULO	Desarrollo del sistema en lazo cerrado.	Roger Morales - Cristhian Barahona					1	1					1	1	
	Diseño de interfaz en SIMULINK y conexión a Arduino.	Roger Morales - Cristhian Barahona							1	1			1	2	
	Calibración del sistema y de valores PID.	Roger Morales - Cristhian Barahona							1	1			2	1	
PRUEBAS EXPERIMENTALES	Desarrollo de pruebas experimentales del módulo en sistema abierto.	Roger Morales - Cristhian Barahona							1	1	1		2	2	
	Desarrollo de pruebas experimentales del módulo en sistema cerrado.	Roger Morales - Cristhian Barahona									1	1	1	2	2

1 0 2 0 4 2 2 4 6 4 3 1 18 15  
0% 0% 50% 200% 67% 33%

## IX. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el presupuesto:

Tabla II  
PRESUPUESTO

Cant.	Descripción	Precio
-	Componentes electrónicos y mecánicos	\$ 10,00
1	Arduino MEGA	\$ 25,00
1	L298N	\$ 3,50
1	Fuente 12V 2A	\$ 8,00
1	Motor 25GA-370	\$ 20,00
1	Caja acrilico	\$ 90,00
		\$ 156,50

## X. CONCLUSIONES

En términos de diseño el módulo de control cumple con la portabilidad, facilidad de uso, tamaño, implementación y conectividad de los componentes. Lo que permite su uso en una amplia variedad de entornos y permite la personalizar la programación a los estudiantes. A su vez se toma en cuenta el bajo costo del modulo y

La función de transferencia seleccionada tiene un 79 % de estimación lo que permite el desarrollo del controlador PID y por ende le permite aplicarse en prácticas de Teoría de Control.

El Arduino MEGA al realizar la adquisición de datos, abre la posibilidad de mejoras y ampliaciones en el dispositivo por la cantidad de puertos que dispone además de los bloques de comunicación Arduino en la librería de Simulink.

## XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda no ingresar valores muy altos en el módulo ya que con ello se satura la comunicación entre el Arduino - MATLAB además de presentarse un error en el compilador de Simulink por pérdida de comunicación ya que el Arduino dejará de responder y enviar datos al Simulink.

Es importante revisar las conexiones entre los dispositivos para asegurarse de no tener inconvenientes en la comunicación entre el encoder y el Arduino MEGA ya que si se desconecta no podrá visualizar los datos en el Simulink.

Se recomienda el chequeo y limpieza del anillo de ferrita del encoder para evitar pulsos no deseados durante la adquisición de datos en el módulo.

Se pueden implementar componentes adicionales en el módulo como un Shield para el Arduino MEGA y también implementarle otro modelo de motor y encoder para que el estudiante pueda realizar las prácticas con otros componentes.

## REFERENCIAS

- [1] A. Noriega, L. Monroy y D. Páez, «Control de velocidad en módulo didáctico para control de motor DC.,» 2022.
- [2] J. Shepard, «Cómo construir un sistema compacto de adquisición de datos,» 2022.
- [3] N. Instruments, «Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal,» 2020.
- [4] A. R. Lopez, «PLANTA ELECTRONICA PARA ENTRENAMIENTO DE SISTEMAS DE CONTROL UTILIZANDO LA INTERFACE NI MYDAQ Y EL SOFTWARE LABVIEW 2010,» 2013.
- [5] N. P. J. STALIN, «IMPLEMENTACIÓN DE UN MODULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL Y REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN LAZO CERRADO EN MOTORES ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS, EMPLEANDO UN VARIADOR DE CONTROL VECTORIAL.,» 2007.
- [6] PINEDA ROSERO KENNYA SILVANA, «IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA CONTROL DE LAZOS ABIERTOS Y CERRADOS UTILIZANDO LABVIEW PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.,» 2012.
- [7] C. C. Fernández, «MANUAL BÁSICO DE MATLAB.,» 2024.
- [8] L. R. OJEDA, «MATLAB CONCEPTOS BÁSICOS Y PROGRAMACIÓN TUTORIAL,» 2007.
- [9] Mathworks, *Simulink para el diseño basado en modelos*, Accedido: 02-05-2024, 2024. dirección: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>.
- [10] Arduino, *Uno R3 — Arduino Documentation*, Accedido: 28-12-2021, 2019. dirección: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.
- [11] MOUSE Electronics, *Arduino Uno R3*, Accedido: 30-05-2024. dirección: <https://www.mouser.ec/ProductDetail/Arduino/A000066?qs=BC3YYPaifMrIue9b%252BHtKQg%3D%3D>.
- [12] Amazon.com, Inc. o sus afiliados, *uxcell Micro Motor DC 7V 6700-6900RPM Motor de alta velocidad para DIY RC Coches Control remoto*, Accedido: 30-05-2024. dirección: <https://www.amazon.com/-/es/uxcell-6700-6900RPM-velocidad-Coches-Control/dp/B07M8Q5J14>.
- [13] P. V. JORGE L, «Motores de Corriente Continua,» 2018.
- [14] S. WEST Instruments de Mexico, «MANUAL DE APLICACIÓN DE ENCODERS,» 2024.
- [15] Naylamp Mechatronics SAC, *MOTOR DC JGA25-370 - 12V/100RPM CON ENCODER*, Accedido: 30-05-2024. dirección: <https://naylampmechatronics.com/motores-dc/797-motor-dc-jga25-370-12v100rpm-con-encoder.html>.
- [16] C. D. Cegelski, S. E. Katogui, H. A. Stoisa, L. J. Corrado y M. F. Nuñez, «SISTEMAS DE CONTROL La automatización como el motor del desarrollo,» 2019.
- [17] educa2.madrid, *Definición sistemas de control*, Accedido: 05-05-2024, 2024. dirección: [https://www.educa2.madrid.org/web/4656105/robotica/-/book/sistemas-de-control-lazo-abierto-lazo-cerrado?\\_book\\_viewer\\_WAR cms\\_tools\\_chapterIndex=895b5ac7-d536-48d8-b7fd-fd3e63756316](https://www.educa2.madrid.org/web/4656105/robotica/-/book/sistemas-de-control-lazo-abierto-lazo-cerrado?_book_viewer_WAR cms_tools_chapterIndex=895b5ac7-d536-48d8-b7fd-fd3e63756316).
- [18] Janeth Alcala, *SISTEMA DIDÁCTICO DE CONTROL DE PRESIÓN*, Accedido: 30-05-2024, 2013. dirección: [https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-a-bloques-de-un-sistema-de-control-en-lazo-cerrado\\_fig1\\_267454753](https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-a-bloques-de-un-sistema-de-control-en-lazo-cerrado_fig1_267454753).
- [19] C. D. P. XAVIER y P. E. P. ANDRÉS, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PID PARA EL CONTROL DE NIVEL DE UN TANQUE CON EL PLC SIEMENS S7-200,» 2009.
- [20] Ruiz Canales, A. and Molina Martínez, J.M., *Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización*, Accedido: 30-05-2024. dirección: [https://www.infoagro.com/documentos/fundamentos\\_sistemas\\_control\\_del\\_riego\\_y\\_fertilizacion\\_parte\\_i.asp](https://www.infoagro.com/documentos/fundamentos_sistemas_control_del_riego_y_fertilizacion_parte_i.asp).
- [21] M. A. Perez, A. P. Hidalgo y E. P. Berenguer, «INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO.,» 2007.
- [22] S. D. Bencomo y F. M. García, «CONTROLADORES PID,» 2024.
- [23] Carlos Félix Pardo Martín, *Controlador PID digital*, Accedido: 30-05-2024, 2018. dirección: <https://www.picuno.com/es/control-pid-digital.html>.

- [24] electroshop, *¿Qué es PWM y cómo usarlo?* Accedido: 02-05-2024, 2020. dirección: <https://soelectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38#:~:text=%C2%BFPara%20qu%C3%A9%20se%20usa%20PWM,fuentes%20conmutadas%20entre%20otros%20usos./>.
- [25] carakenio73, *Sistema de Control de Motor DC en Matlab – PWM (Pulse width Modulation)*, Accedido: 30-05-2024, 2019. dirección: <https://dademuchconnection.wordpress.com/2019/03/22/sistema-de-control-de-motor-dc-en-matlab-pwm-pulse-width-modulation/>.
- [26] Alicia Fernández Oliveras, *Jugamos con los colores. El disco de Newton (2014)*, Accedido: 30-05-2024, 2014. dirección: <https://fciencias.ugr.es/20-cursos/semana-de-las-ciencias/1853-jugamos-con-los-colores-el-disco-de-newton-2014#:~:text=El%20disco%20de%20Newton%20es,siete%20colores%20del%20arco%20iris..>

ANEXO A  
DISEÑO DE LA ESTRUCTURA Y PLANOS

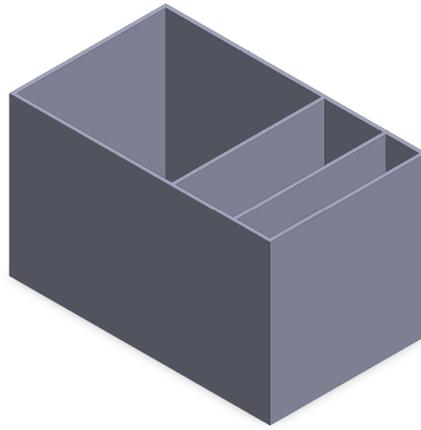


Figura 20. Estructura diseñada en el software Solidworks fuente: Autores.



Figura 21. Disco de Newton fuente: Autores.

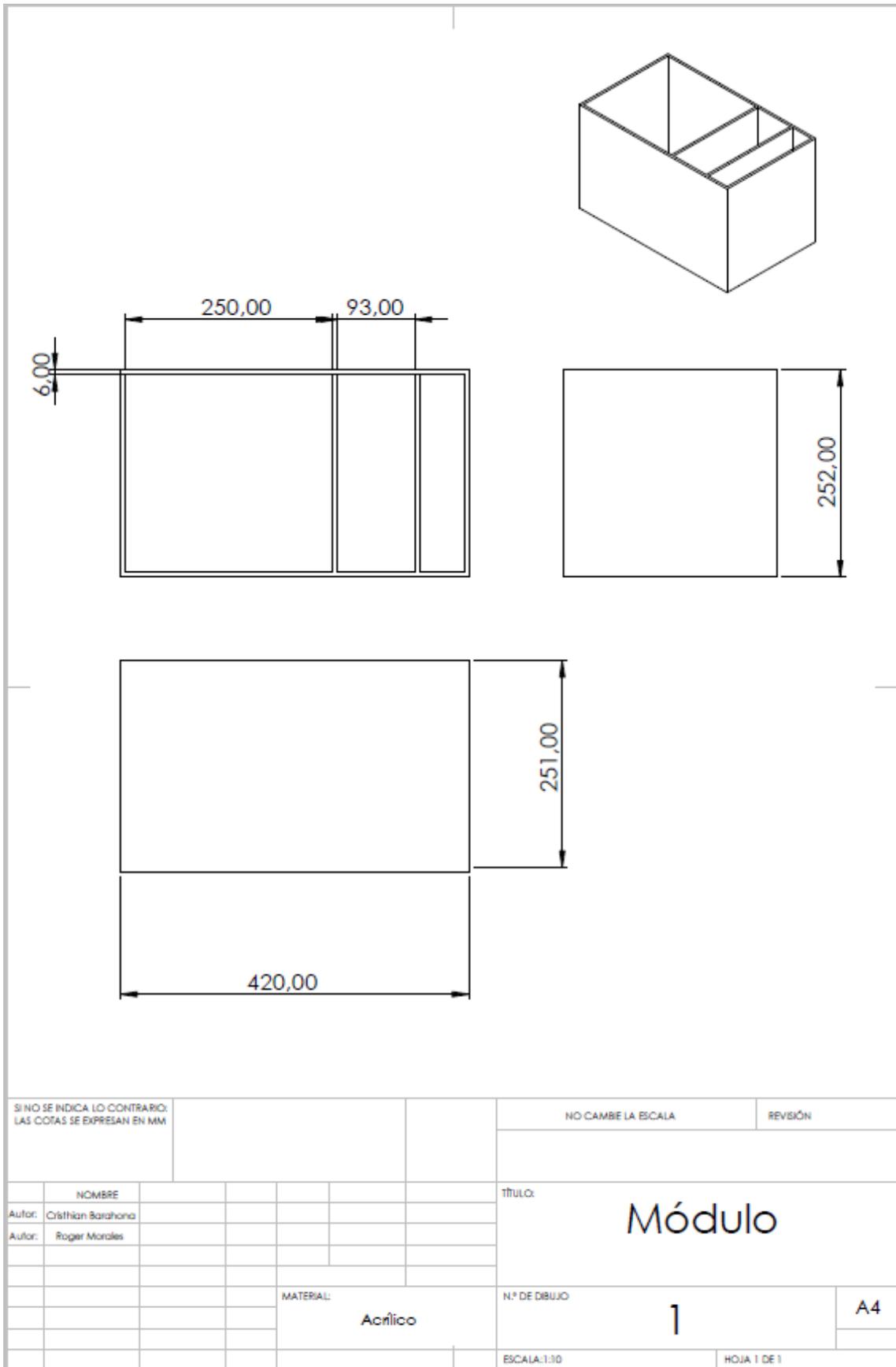


Figura 22. Planos de la estructura fuente: Autores.

## ANEXO B PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK

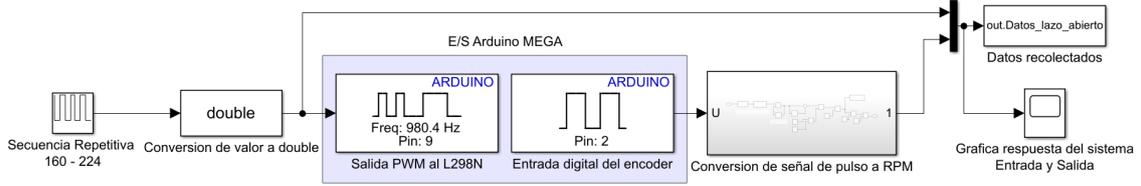


Figura 23. Sistema en lazo abierto fuente: Autores.

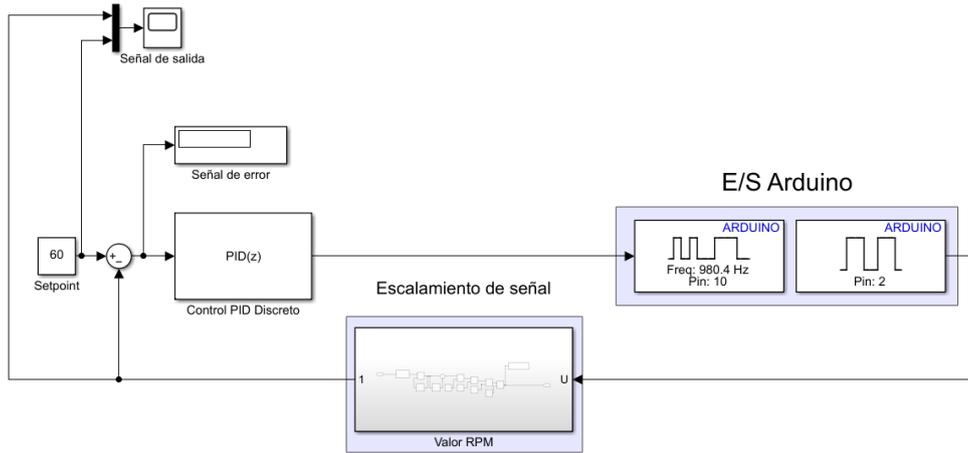


Figura 24. Sistema con implementación del control PID fuente: Autores.

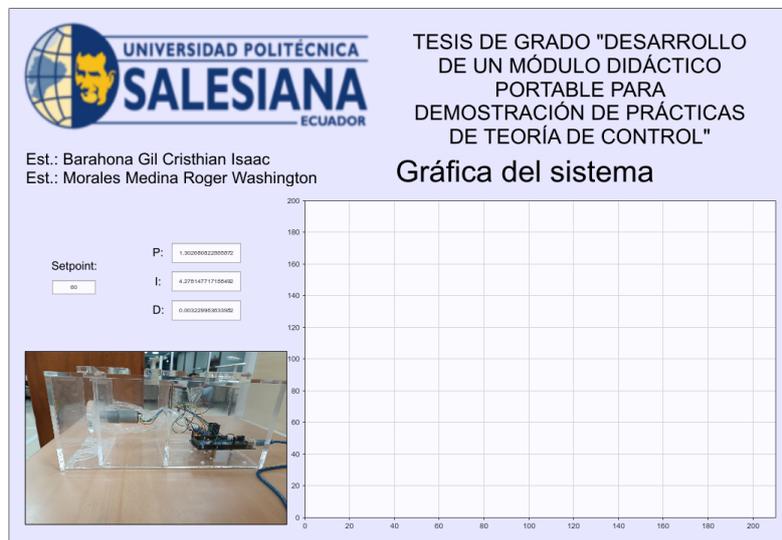


Figura 25. Interfaz de usuario para el sistema con control PID fuente: Autores.