

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Construcción de equipos didácticos para la enseñanza de principio
de control automático en los laboratorios de FIEC

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Julio Antonio Alcivar Pardo

Nestor Joffre Diaz Bustamante

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo con mucho amor y gratitud a nuestros padres, quienes han sido nuestro mayor apoyo, guía y motivación a lo largo de este camino, impulsándonos a no rendirnos y a luchar por nuestras metas. De igual manera, dedicamos este proyecto a nuestros profesores, quienes con sus enseñanzas, paciencia y dedicación aportaron a nuestra formación académica y personal, permitiéndonos crecer y convertirnos en mejores profesionales.

Asimismo, dedicamos este logro a las personas importantes que, aunque no pudieron acompañarnos hasta este momento, siempre estarán presentes en nuestro corazón. Finalmente, dedicamos este trabajo a nuestros amigos, por su compañía, apoyo y palabras de aliento durante cada etapa, contribuyendo a que este esfuerzo llegue a su culminación.

AGRADECIMIENTOS

Julio Antonio Alcivar Pardo

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas y organizaciones que contribuyeron directa o indirectamente al desarrollo de esta tesis. A mis docentes, por su guía académica y sus valiosos conocimientos; a mis familiares y amigos, por su apoyo incondicional y motivación constante; y a las instituciones que brindaron los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Cada aporte fue esencial para culminar satisfactoriamente este trabajo y alcanzar las metas propuestas. Agradezco profundamente el apoyo a mi madre, ya que, con su apoyo, me ayudo e impulso constantemente en todo el recorrido de mi vida estudiantil. Agradezco a mis amigos más cercanos Anthony López, Kenneth Quimí y otros, que con su amistad y competitividad sana me permitieron desarrollarme en un ambiente donde mis habilidades tuvieron mejor desarrollo.

Nestor Joffre Diaz Bustamante

Deseo agradecer a Dios por brindarme fortaleza y constancia durante todo este proceso. Agradezco al Ing. Efrén Herrera por su apoyo académico, y al Ing. César Martín, mi tutor, por su orientación en el desarrollo de este trabajo. De igual manera, agradezco a mis amigos, quienes me han acompañado desde el primer semestre. Asimismo, agradezco a mi novia por ser mi apoyo incondicional, y a mis hermanos por su confianza. Finalmente, agradezco a mis amados padres por su esfuerzo y respaldo constante para alcanzar esta meta; este logro es de ustedes.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Julio Antonio Alcivar
Pardo



Nestor Joffre Diaz
Bustamante

EVALUADORES

Efrén Vinicio Herrera Muentes

PROFESOR DE LA MATERIA

Cesar Antonio Martin Moreno

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto integrador, titulado “Construcción e implementación de equipos didácticos para la enseñanza de principios de control automático en los laboratorios de la FIEC”, tiene como propósito desarrollar y aplicar prototipos de plantas de control orientados al ámbito educativo universitario. El objetivo principal es mejorar la calidad del aprendizaje práctico en el área de control automático, mediante la creación de equipos que sean accesibles, replicables y compatibles con los recursos tecnológicos actuales del laboratorio. La iniciativa surge tras identificar diversas limitaciones en las plantas de control existentes. Entre ellas se observan el exceso de sistemas dedicados al control de nivel, la dificultad de replicar las prácticas, la limitada participación simultánea de los estudiantes y la incompatibilidad entre versiones de software utilizadas en las plantas comerciales y las disponibles en el laboratorio. A partir de este diagnóstico, se propone el diseño de prototipos modulares y funcionales, basados en microcontroladores de bajo costo, que permitan realizar ejercicios de control de velocidad, temperatura u otras variables físicas, con entradas analógicas y digitales, y comunicación serial con MATLAB 2016. Estos equipos estarán adaptados a las dimensiones y condiciones del laboratorio, con el fin de garantizar su integración en el entorno académico. Además, su arquitectura permitirá una reproducción sencilla, de manera que varios grupos de estudiantes puedan realizar las mismas prácticas en paralelo, promoviendo un aprendizaje activo y colaborativo.

ABSTRACT

The purpose of this integrative project, entitled “Construction and implementation of teaching equipment for teaching automatic control principles in the FIEC laboratories”, is to develop and apply prototypes of control plants aimed at the university educational field. The main objective is to improve the quality of practical learning around automatic control, through the creation of equipment that is accessible, replicable and compatible with the laboratory's current technological resources. The initiative arises after identifying various limitations in the existing control plants. Among them are the excess of systems dedicated to level control, the difficulty of replicating the practices, the limited simultaneous participation of students and the incompatibility between software versions used in commercial plants and those available in the laboratory. Based on this diagnosis, the design of modular and functional prototypes is proposed, based on low-cost microcontrollers, which allow exercises to control speed, temperature or other physical variables, with analog and digital inputs, and serial communication with MATLAB 2016. This equipment will be adapted to the dimensions and conditions of the laboratory, to guarantee its integration into the academic environment. Furthermore, its architecture will allow easy reproduction, so that several groups of students can carry out the same practices in parallel, promoting active and collaborative learning.

Contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
DECLARACIÓN EXPRESA.....	5
EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
ABREVIATURAS.....	13
CAPÍTULO 1.....	14
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
OBJETIVOS GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 ALCANCE.....	17
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	17
1.6 TRABAJOS PRECEDENTES.....	18
1.7 MARCO TEÓRICO	18
1.7.1 SISTEMAS DE CONTROL.....	18
1.7.1.1 Figura 1.7.1.1.- “Proceso a Controlar”. Nota. Tomado de “Modern Control System” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.	18
1.7.2 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO.....	19

1.7.1.2	Figura 1.7.2.- “Sistema de Lazo Abierto”. Nota. Tomado de “Modern Control System” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.	19
1.7.3	SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO	19
1.7.1.3	Figura 1.7.3.- “Sistema de Lazo Cerrado” Nota. Tomado de “Modern Control System” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.	20
1.7.1.4	Figura 1.7.4.- “Sistema de Control Multivariable” Nota. Tomado de “Modern Control System” (14th ed., p.32), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.	20
1.7.4	CONTROL PID.....	20
1.7.5	CONTROL DE CASCADA	21
1.7.6	Control de velocidad de un motor DC	22
1.7.7	ONDA MECÁNICA.....	22
CAPÍTULO 2.....		24
2.1	METODOLOGÍA	24
2.2	MATERIALES Y EQUIPOS	25
2.3	DISEÑO DE PLANTA	26
2.3.1	PROTOTIPO INICIAL.....	26
2.3.1.1	Figura 2.3.1.1 “Primer modelo de prototipo a desarrollar”	26
2.3.1	PROTOTIPO FINAL	27
2.3.1.2	Figura 2.3.1.2 “Modelo CAD del prototipo Final”.....	27
2.3.1.3	Figura 2.3.1.3 “Modelo Físico desarrollado a partir del modelo CAD del prototipo Final”	28
2.4	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL	29
2.4.1	Figura 2.4.1 Diagrama de bloques de control de un Motor DC	29
2.5	INTEGRACIÓN ENTRE SIMULINK Y EL MICROCONTROLADOR	30

2.5.1	Figura 2.5.1 “Diagrama de bloques del sistema de control de un motor DC basado en su microcontrolador”	30
2.6	BLOQUES DE CONTROL EN SISTEMA DE LAZO ABIERTO	31
2.7	DIAGRAMA DE METODOLOGÍA	38
2.7.1	DISEÑO DE PLANTA DE CONTROL	38
2.7.2	PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR Y CONFIGURACIÓN DE CONEXIONES.....	39
2.7.3	MODELO Y SIMULACIÓN	39
2.8	CONEXIONES Y POLARIDAD DE CONEXIONES LOS DISPOSITIVOS	40
2.9	LAZO CERRADO Y PRUEBAS	43
CAPITULO 3.....		51
3.1	INTRODUCCIÓN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
3.2	RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO EN ENTORNO MATLAB/SIMULINK	51
3.2.1	Señal recibida por parte del Encoder acoplado al motor DC.....	52
3.2.2	Señal de velocidad calculad y señal filtrada (Encoder RPM y Encoder Filtro)	52
3.3	RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO IMPLEMENTADO EN ARDUINO	54
3.3.1	Conjunto de señales obtenidas por medio de la implementación de los bloques de matlab en Arduino	54
3.4	RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO MEDIANTE CONTROL PID EN EL ENTORNO DE MATLAB/SIMULINK.....	55
3.4.1	Respuesta del sistema en lazo cerrado con control PID en el entorno MATLAB/SIMULINK	55
3.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE ENTRADA EN LA CLASE DE SIMULACIÓN PRÁCTICA IMPARTIDA A ESTUDIANTES DE LA MATERIA SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO PAO II - 2025.....	57

3.5.1	Preguntas con los aciertos mas bajos de la prueba de entrada.....	58
3.6	INTERACCIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA MATERIA PRÁCTICA SISTEMAS DE CONTROL AVANZADOS PAO II 2025 CON LA PLANTA DIDÁCTICA	59
3.6.1	Interacción de estudiantes con la planta didáctica	61
3.6.2	Interacción de estudiantes con la planta didáctica	61
Capitulo 4	62
4.1	CONCLUSIONES GENERALES Y ESPECÍFICAS	62
4.2	OBJETIVOS DIDÁCTICOS.....	64
4.3	RECOMENDACIONES SOBRE DESARROLLO FURUTO DE LA PLANTA DIDÁCTICA	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
MPY	Milésimas de pulgadas por año

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, los laboratorios de control automático de la FIEC presentan limitaciones que dificultan el aprendizaje práctico de los estudiantes. La mayoría de los equipos disponibles están dedicados al control de nivel, lo que restringe la variedad de prácticas posibles y reduce la participación simultánea de los grupos. Además, la cantidad limitada de plantas didácticas y la falta de estandarización entre los equipos provocan dificultades para replicar los experimentos y mantener la coherencia en los resultados obtenidos.

Asimismo, se observa una incompatibilidad entre las versiones de software empleadas en los sistemas comerciales y las herramientas disponibles en el laboratorio, como MATLAB 2016. Esta situación limita la integración tecnológica y la posibilidad de aprovechar plenamente los recursos académicos existentes. A ello se suma la necesidad de contar con equipos que sean fácilmente mantenibles, adaptables a las condiciones del laboratorio y económicamente viables para su reproducción.

Ante esta problemática, se plantea la construcción e implementación de equipos didácticos modulares y funcionales, basados en microcontroladores de bajo costo y orientados al control de distintas variables como velocidad o temperatura. Estos prototipos buscan mejorar la enseñanza práctica en el área de control automático, permitiendo que varios grupos de estudiantes trabajen en paralelo y fomentando un aprendizaje activo, colaborativo y acorde con las exigencias tecnológicas actuales.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el ámbito académico, la enseñanza del control automático requiere de entornos prácticos que complementen la teoría y permitan al estudiante aplicar conceptos en sistemas reales. Sin embargo, las limitaciones en la disponibilidad y variedad de equipos en los laboratorios de la FIEC dificultan la realización de prácticas completas y actualizadas. Esta situación afecta directamente el desarrollo de habilidades experimentales, ya que los estudiantes disponen de pocas oportunidades para interactuar con plantas que representan diferentes tipos de control y condiciones de operación.

Por este motivo, se considera necesario desarrollar nuevos equipos didácticos que respondan a las necesidades actuales de formación. Estos prototipos deben ser accesibles, modulares y compatibles con los recursos tecnológicos del laboratorio, de modo que faciliten la replicación de prácticas y el trabajo simultáneo de varios grupos. Con ello se busca mejorar la calidad del aprendizaje práctico, fomentar la participación de los estudiantes y adaptar la enseñanza del control automático a las exigencias tecnológicas e industriales contemporáneas.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERAL

Desarrollar e implementar equipos didácticos modulares y funcionales para la enseñanza de principios de control automático en los laboratorios de la FIEC, con el fin de fortalecer el aprendizaje práctico de los estudiantes mediante la aplicación de tecnologías accesibles, replicables y compatibles con los recursos disponibles.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir dos prototipos idénticos de una planta didáctica de control de velocidad, basados en microcontroladores de bajo costo y adaptados a las condiciones físicas y tecnológicas del laboratorio.
- Implementar la comunicación entre los prototipos y el software MATLAB 2016, permitiendo la interacción con tres o cuatro prácticas diferentes de control y garantizando la integración con los recursos existentes.
- Elaborar manuales técnicos y guías de laboratorio que describen las prácticas asociadas a la planta, su conexión, programación y operación, con el propósito de facilitar su uso, mantenimiento y replicación en futuros ciclos académicos.

1.4 ALCANCE

Diseñar una planta de control que permita la interacción de los estudiantes que aseguren una participación en el laboratorio de sistema de tal manera, que estos puedan reconocer, diseñar, demostrar, practicar diferentes tipos de modelos de control con la misma mediante el uso de electrónica digital.

Este prototipo se llevará a cabo mediante el uso de la herramienta del microcontrolador Arduino, el programa MATLAB R2016. El diseño principal de la planta se encontrará basado por el control de velocidad de motores DC que permitan al estudiante introducir diferentes modelos matemáticos obtenidos en sus diferentes prácticas y ponerlos a prueba con el dispositivo.

Los resultados obtenidos por parte de este prototipo permitirán al laboratorio de sistemas de control una mayor y mejor participación por parte de los estudiantes de pregrado, promoviendo la implementación multidisciplinaria de diferentes materias tales como, Sistemas digitales, Principios de Electrónica, Robótica, entre otras, mediante el análisis de un dispositivo que permita la interacción y visualización del resultado obtenidos mediante los modelos matemáticos de sistemas de control.

1.5 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se reunirán los antecedentes relevantes sobre el diseño e implementación del prototipo, desde el análisis del sistema de control implementado por sí mismo, hasta la descripción en su totalidad de todos los conceptos teóricos y fundamentales esenciales asociados a este. Se establecerá el reconocimiento de todas las características físicas y teóricas que permitirán al análisis de los sistemas de control aplicados dentro del prototipo y a los sistemas con sus modelos matemáticos a ingresar por parte de los estudiantes de pregrado del laboratorio de sistemas de control.

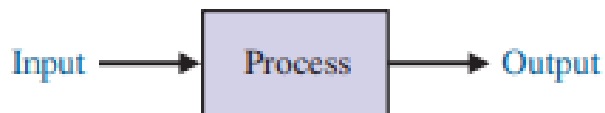
1.6 TRABAJOS PRECEDENTES

Existen proyectos precedentes relacionados a plantas de control también dirigidas tanto a la identificación e implementación de control de plantas de caudal, de temperatura que actualmente se encuentran en el laboratorio de forma operativa. Una de ellas es el rediseño de un sistema de control automático de la planta de caudal que permitió a los estudiantes poder participar con una planta repotenciada donde el control se basa con el uso de un PLC LOGO V8 donde se construyó desde el tablero de control de la planta hasta su diseño del sistema de control de esta para el uso de diferentes tipos de funcionamientos ya sea a lazo abierto o cerrado.

1.7 MARCO TEÓRICO

1.7.1 SISTEMAS DE CONTROL

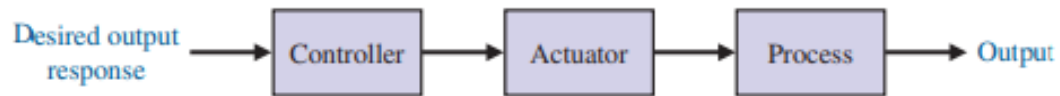
Un sistema de control es aquel donde sus componentes presentan interconexiones que permiten conformar una o más configuraciones del sistema para obtener alguna respuesta deseada, por ello, el estudio de sistema de control no se encuentra solamente basado en ciertos campos específicos de la ciencia o ingeniería tales como la mecánica, electricidad, aeroespacial, sino que, se puede realizar un análisis de cualquier sistema de control ya que, estos se encuentran basado en los fundamentos de sistemas lineales que permitan describir cualquier proceso o relación de causa o efecto representadas en bloques. (Dorf & Bishop, 2022)



1.7.1.1 **Figura 1.7.1.1.- “Proceso a Controlar”.** Nota. Tomado de “*Modern Control System*” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.

1.7.2 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO

Un sistema de control de lazo abierto es aquel sistema donde las salidas de este no se encuentran interrelacionadas con las entradas, es decir, este sistema no tiene algún tipo de sentido o retroalimentación que permita conocer y modificar valores de entrada tomando en cuenta los valores de salida obtenidos. Normalmente, este tipo de sistemas se encuentran en procesos que no necesitan una retroalimentación más que una acción de control de causa y efecto más simple con objetos y actuadores sencillos que no tengan una gran cantidad de control ya sea, por sus características físicas predeterminadas o del sistema o proceso en general. (Dorf & Bishop, 2022)



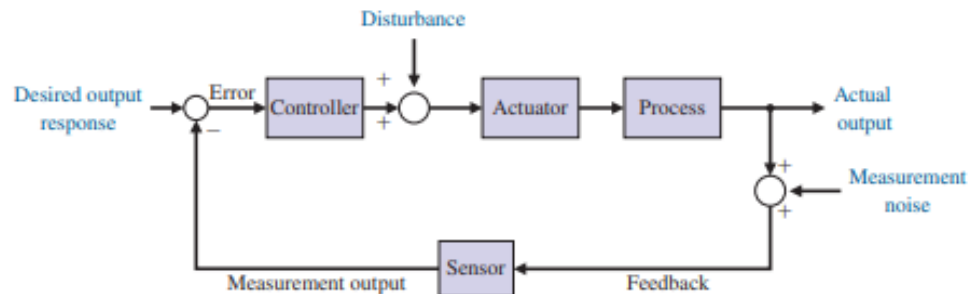
1.7.1.2 *Figura 1.7.2.- “Sistema de Lazo Abierto”. Nota. Tomado de “Modern Control System” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.*

1.7.3 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel sistema donde las salidas de este si se encuentran interrelacionadas con las entradas, teniendo en el sistema algún tipo de sensor o cualquier retroalimentación que le permita a este sistema una lectura de los valores de salida y mediante estos obtener modificaciones “automáticas” de los valores de entrada para así obtener los valores deseados. Este tipo de sistemas son los que más se encuentran actualmente en la vida cotidiana de cualquier tipo de proceso industrial.

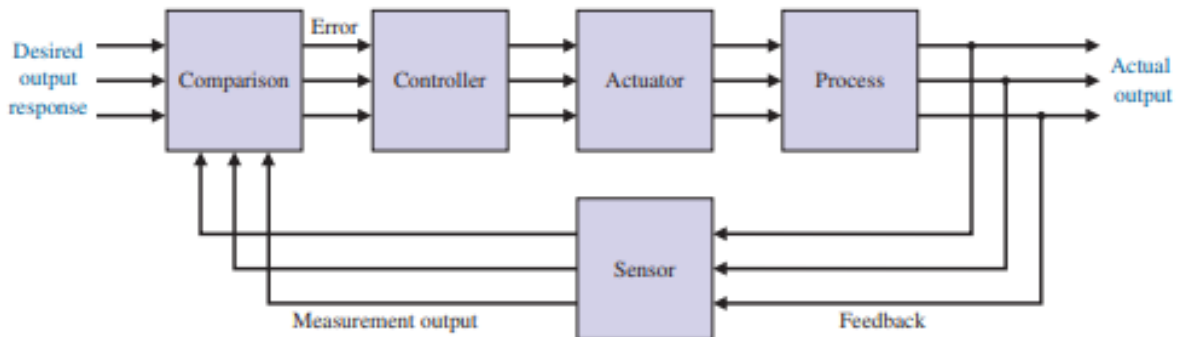
Esto se da, por una gran necesidad por parte de la industria del control automático, que permita mediante la instalación de cualquier proceso una lectura y acción independiente de cualquier controlador u operador manual, reduciendo de esta manera errores que puedan ocasionar pérdidas a la industria. Este tipo de sistemas aparte de ser el más conocido es también visible en nuestra vida cotidiana desde el accionar de los nuevos tipos de autos eléctricos con la cantidad de sensores y

actuadores que tienen los nuevos hasta juguetes de infantes como drones o hasta carros automáticos. (Dorf & Bishop, 2022)



1.7.1.3

Figura 1.7.3.- “Sistema de Lazo Cerrado” Nota. Tomado de “*Modern Control System*” (14th ed., p.31), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.



1.7.1.4

Figura 1.7.4.- “Sistema de Control Multivariable” Nota. Tomado de “*Modern Control System*” (14th ed., p.32), por R. C. Dorf y R. H. Bishop, 2022, Pearson Education.

1.7.4 CONTROL PID

Un sistema de control mediante un modelo de controlador basado en PID, P, PI es uno de los más usados sino el mas en la industria y en casi cualquier sistema. Este tipo de control se basa en el control Proporcional (P), el control integral (I), y el control derivativo (D). Cada una de estas características se encuentran perfectamente relacionadas entre sí para de esta manera, obtener un sistema que permita, mediante los valores de sus respectivas ganancias, una alta precisión de control incluyendo la toma de acción frente a cualquier tipo de interacción o perturbación exterior. Este tipo de control será uno de los tantos posibles modelos de control a implementar al

dispositivo por parte de los estudiantes mediante el ingreso mediante código por los estudiantes de pregrado.

Cada una de estas variables del PID se encuentran establecidas por su accionar al sistema en sí, la parte proporcional (P) toma acción sobre la velocidad de reacción del controlador en función del error instantáneo del sistema ajustando de esta manera la salida. La parte integral (I) es la cual permite corregir los errores proporcionados al sistema mediante perturbaciones o acciones exteriores que no se pueden eliminar mediante la sección proporcional. La parte derivativa (D) es la cual permite una acción a futuro mediante la respuesta a la velocidad del cambio de error, y gracias a esto, permite una clara anticipación del comportamiento del sistema ayudando tanto a la mejora de la estabilidad de este y la reducción de oscilaciones, logrando así, una mejora del tiempo de estabilidad. Un sistema PID tiene la siguiente función de transferencia. (Dorf & Bishop, 2022)

$$G_c = K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

1.7.5 CONTROL DE CASCADA

Uno de los modelos de control que se usa como estrategia de control es del tipo de control en cascada, este tipo de control es del tipo avanzado ya que, emplea más de un lazo de control, de tal manera que, la salida de un controlador permite servir como referencia para todas las variables de control a estudiar o cada modelo participando en este, permitiendo de esta manera mejorar tanto el rendimiento del sistema como mejorar su respuesta frente a los cambios o perturbaciones internas o externas del sistema.

Este tipo de sistema se procede mediante el control tanto de un lazo de control primario que se encarga de la variable principal como de los lazos secundarios

encargados de controlar tanto su variable seleccionada como mejorar la respuesta frente a las perturbaciones. Este tipo de estrategias se implementará como modelo de prueba al dispositivo para poder visualizar como se permite el control de diferentes tipos de variables participando en tiempo real frente al accionar de un mismo dispositivo. Se implementará este método que permita el estudio de estrategias de control más usadas en la industria como lo son las plantas de nivel industriales, temperaturas en hornos, sistemas de velocidad en sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos y más. (Dorf & Bishop, 2022)

1.7.6 Control de velocidad de un motor DC

Para poder realizar el control de velocidad de un motor DC, el cual es la base fundamental del dispositivo, se debe de tomar en cuenta que el objetivo de control es la velocidad la cual depende del voltaje o tensión de armadura como de la corriente. Para ello, se toma en cuenta la ecuación de transferencia de armadura relacionando tanto voltaje como corriente.

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b(t)$$

También se debe de tomar en cuenta la función de transferencia de la parte mecánica del motor.

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) = T_m(t) + T_L(t)$$

1.7.7 ONDA MECÁNICA

Una onda mecánica se puede traducir como la perturbación que se propaga por un medio y que, debido a las características de elasticidad de las partículas, se puede transportar energía e información sin un medio de transporte que sea específico de materia. Una onda se genera por un pulso repetitivo el cual viaja por el medio y realiza un movimiento oscilatorio alrededor de un punto de equilibrio. Estas características

normalmente lo podemos observar en nuestra vida cotidiana como en los resortes, cuerdas tensadas o algún tipo de solido elástico.

La onda que se puede generar del tipo sinusoidal siempre y cuando el movimiento se haya impuesto por sobre un medio sea un M.A.S (Movimiento Armónico Simple). Los parámetros fundamentales de una onda mecánica periódica son: λ =” Longitud de Onda”, T =” Periodo”, A =” Amplitud”, f = Frecuencia. La propagación de una onda mecánica tiene como principal característica la velocidad siempre y cuando la onda sea constante, donde esto da por determinado las propiedades físicas del medio, y donde se obtiene la relación de velocidad de la onda.

$$v = \lambda f$$

Existe una descripción matemática que nos permite calcular el desplazamiento de la partícula por un medio en función de su posición y tiempo, las variables a agregar son $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda y $\omega = 2\pi f$ la frecuencia angular. Esta expresión nos permite realizar un análisis dinámico de la onda en cualquier punto del medio. (Young & Freedman, 2009)

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

CAPÍTULO 2

2.1 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada para el diseño, desarrollo e implementación del dispositivo experimental móvil de control de velocidad, el cual fue utilizado como plataforma física para validar estrategias de control automático en un entorno real. La metodología integra tanto el diseño y montaje del sistema electromecánico, como la configuración del modelo de control y adquisición de datos desde Simulink, incluyendo el procesamiento de señales de retroalimentación y la verificación del desempeño del controlador ante diferentes condiciones de operación.

Este capítulo detalla el procedimiento seguido desde la definición del prototipo hasta la obtención y análisis de resultados, abarcando: selección de materiales, construcción física de la planta, comunicación entre Simulink y Arduino, implementación del control PI/PID, conversión de lecturas del encoder a velocidad en RPM, aplicación de filtros para acondicionamiento de señal y pruebas experimentales en lazo abierto y lazo cerrado.

Con el fin de estructurar el proyecto de forma ordenada y repetible, se adoptó una metodología incremental, basada en etapas de construcción, verificación y validación. El flujo de trabajo general se dividió en las siguientes fases:

- Definición del alcance del prototipo: selección de un sistema que permita evidenciar control de velocidad de manera clara y medible.
- Selección y adquisición de materiales: compra de componentes necesarios para implementar dos plantas experimentales equivalentes.
- Diseño físico y construcción del prototipo: montaje de motor, driver, Arduino, encoder y conexiones eléctricas.
- Configuración de comunicación Simulink–Arduino: selección de la librería compatible con la versión de MATLAB utilizada y validación del enlace.
- Implementación de adquisición de señales y cálculo de velocidad: lectura del encoder, conversión de pulsos a RPM y verificación de consistencia.
- Acondicionamiento de señal: corrección de picos y ruido mediante filtros, con el objetivo de mejorar la retroalimentación del controlador.

- Implementación del controlador PI/PID: sintonización de parámetros, pruebas escalón y evaluación del desempeño.
- Registro y análisis de datos: obtención de gráficas, comparación de escenarios y documentación final.

Este enfoque permitió construir el sistema de manera progresiva, reduciendo fallos por etapas y garantizando que cada bloque del sistema funcione correctamente antes de integrarlo a la siguiente fase.

2.2 MATERIALES Y EQUIPOS

Para el desarrollo del proyecto se implementaron dos plantas experimentales, de acuerdo con el requerimiento establecido para la tesis. Una vez validado el funcionamiento de la primera planta, se adquirió un conjunto adicional de materiales para replicar el sistema, asegurando condiciones similares de operación y permitiendo mayor flexibilidad en pruebas y demostraciones, como se mencionaron en capítulos anteriores, algunos de estos dispositivos ya estaban planeados para la implementación y finalmente cumplieron este propósito.

Los componentes principales utilizados fueron los siguientes:

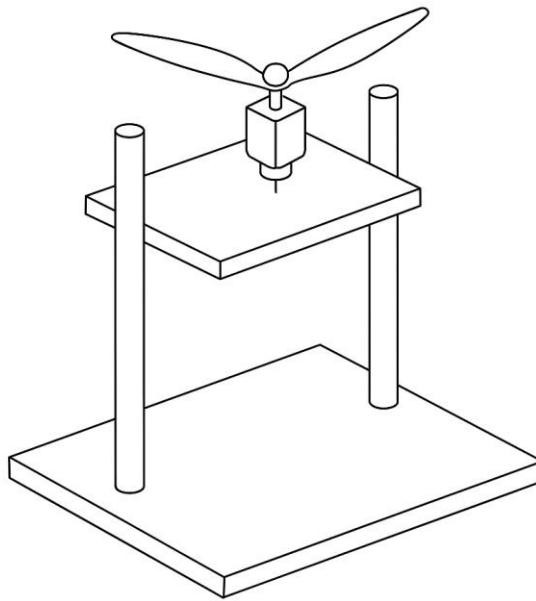
Artículo	PU	Cantidad	PT
Arduino UNO R3	\$16,00	2	\$32,00
Driver L298n	\$6,50	2	\$13,00
Ballun	\$0,75	2	\$1,50
Motor caja reductor 620RPM	\$26,00	2	\$52,00
Adaptador 12V	\$5,00	2	\$10,00
			\$108,50

Estos artículos son los más esenciales al momento de implementar el primero prototipo que se especifica en capítulo posteriores.

2.3 DISEÑO DE PLANTA

El diseño de la planta evolucionó desde una propuesta conceptual inicial hasta un prototipo final enfocado en el objetivo principal del proyecto: demostrar y validar el control de velocidad angular de un motor DC.

2.3.1 PROTOTIPO INICIAL



2.3.1.1 *Figura 2.3.1.1 “Primer modelo de prototipo a desarrollar”*

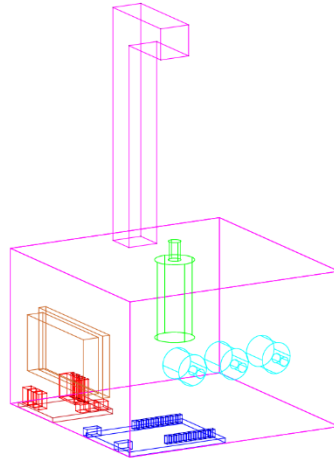
El primer prototipo fue desarrollado como una propuesta de tipo demostrativo, donde se pretendía generar un efecto visual de elevación utilizando una hélice o componente ligero instalado sobre el eje del motor. El propósito era controlar la velocidad del motor con un controlador PID para que el sistema “se estabilice” ante cambios de referencia, observando una respuesta de tipo nivelación.

Sin embargo, este prototipo no fue implementado por razones técnicas y de alcance:

- El motor disponible con caja reductora prioriza torque y control de giro, pero no provee las RPM necesarias para sustentación mediante hélice.

- El comportamiento aerodinámico agrega incertidumbre y reduce repetibilidad experimental.
- El objetivo principal de la tesis era validar control de velocidad, por lo que un montaje centrado en velocidad medible era más adecuado.
- Por ello, el prototipo inicial quedó como propuesta conceptual, pero se descartó formalmente en la implementación final

2.3.1 PROTOTIPO FINAL



2.3.1.2 *Figura 2.3.1.2 “Modelo CAD del prototipo Final”*



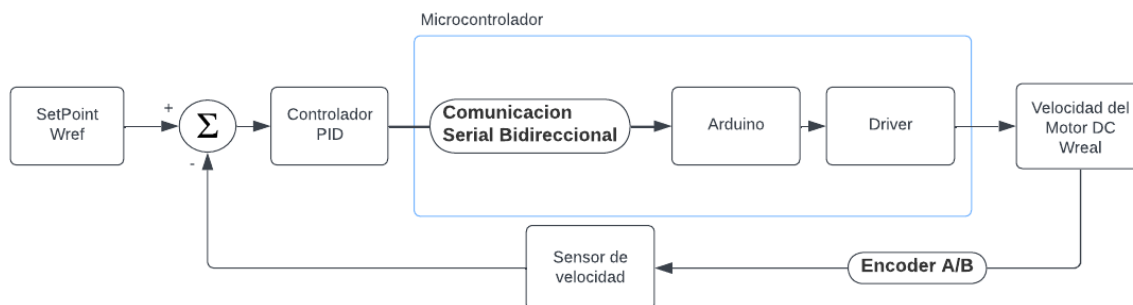
2.3.1.3 *Figura 2.3.1.3 “Modelo Físico desarrollado a partir del modelo CAD del prototipo Final”*

El prototipo final se diseñó para:

- mostrar visualmente el giro del motor,
- medir y controlar la velocidad en RPM,
- registrar señales en Simulink en tiempo real,
- incluir espacio para una pantalla LED (implementación futura o demostrativa).

El actuador fue un motor DC con reductora de aproximadamente 650 RPM, acoplado a un encoder incremental. Se montó el sistema sobre una base compacta (aproximadamente 20 × 20 cm), permitiendo un diseño ordenado y transportable, cumpliendo el objetivo de “dispositivo móvil”.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL



2.4.1 *Figura 2.4.1 Diagrama de bloques de control de un Motor DC*

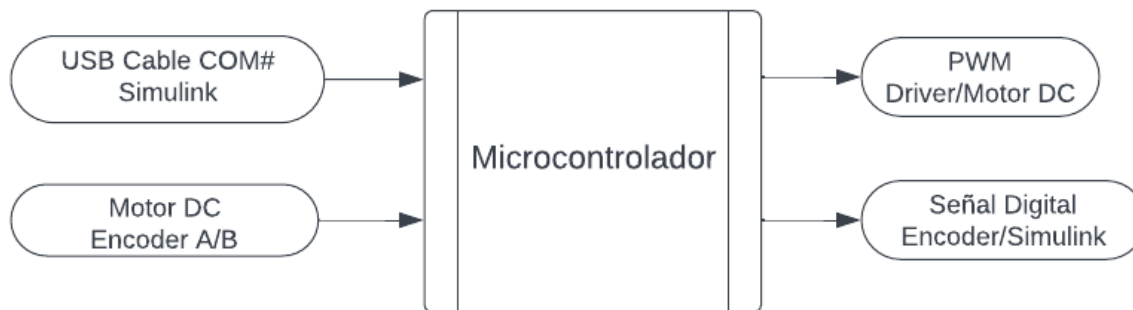
El sistema propuesto implementa un lazo de control de velocidad para un motor de corriente continua mediante un controlador PID. El proceso inicia con la definición de un valor de referencia (setpoint), el cual se compara con la velocidad real medida del motor. Esta diferencia, o señal de error, es procesada por el controlador PID, encargado de generar la acción de control necesaria para corregir la desviación observada.

La señal de control se envía al microcontrolador, donde se establece una comunicación serial bidireccional que permite el intercambio constante de datos entre el algoritmo de control y el hardware del sistema. El microcontrolador, implementado en Arduino, transmite la consigna al driver encargado de gobernar la potencia aplicada al motor DC.

La velocidad real del motor es obtenida mediante un sensor incremental tipo encoder A/B, cuya señal es procesada para determinar la velocidad angular. Este valor retroalimenta el lazo de control, cerrando el sistema y permitiendo ajustar dinámicamente la acción del controlador en función del comportamiento del motor.

Este esquema garantiza un control preciso y estable de la velocidad, además de permitir la integración de futuras mejoras, como la adaptación del controlador, la inclusión de filtros o la incorporación de nuevas variables de medición.

2.5 INTEGRACIÓN ENTRE SIMULINK Y EL MICROCONTROLADOR



2.5.1 *Figura 2.5.1 “Diagrama de bloques del sistema de control de un motor DC basado en su microcontrolador”*

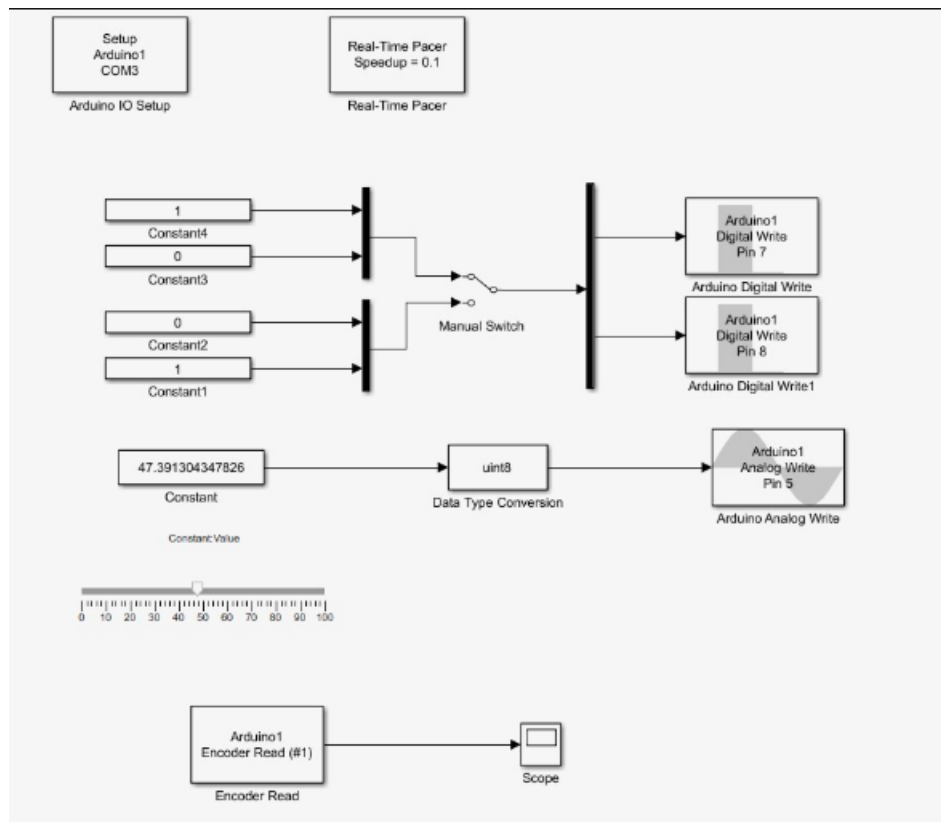
El esquema mostrado representa la interfaz de comunicación entre el entorno de Simulink y el microcontrolador encargado de ejecutar el control del motor de corriente continua. La comunicación se establece mediante un puerto serial (USB Cable COM#), a través del cual Simulink envía las consignas de control y recibe en tiempo real los datos medidos por el sistema físico. Este enlace permite implementar una estrategia de Hardware-in-the-Loop (HIL), en la cual el modelo diseñado en Simulink interactúa directamente con el hardware externo.

Por el lado físico, el microcontrolador recibe las señales del encoder incremental A/B acoplado al motor DC. Estas señales son procesadas para determinar la velocidad angular del eje, la cual posteriormente es enviada a Simulink en forma de señal digital. De esta manera, el modelo en Simulink puede comparar la velocidad real con el valor de referencia y calcular la acción de control.

El microcontrolador, a partir de la señal de control proveniente de Simulink, genera un pulso PWM que se envía al driver del motor. El driver es el encargado de suministrar la potencia y regular la dirección y velocidad del motor DC. Este flujo de información crea un lazo de control cerrado distribuido entre el entorno de simulación y el hardware real, lo cual permite validar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales sin perder la flexibilidad y capacidad de análisis de Simulink.

Este enfoque facilita la experimentación, el ajuste de parámetros y la verificación de algoritmos de control, proporcionando una plataforma robusta para pruebas y futuras ampliaciones del sistema.

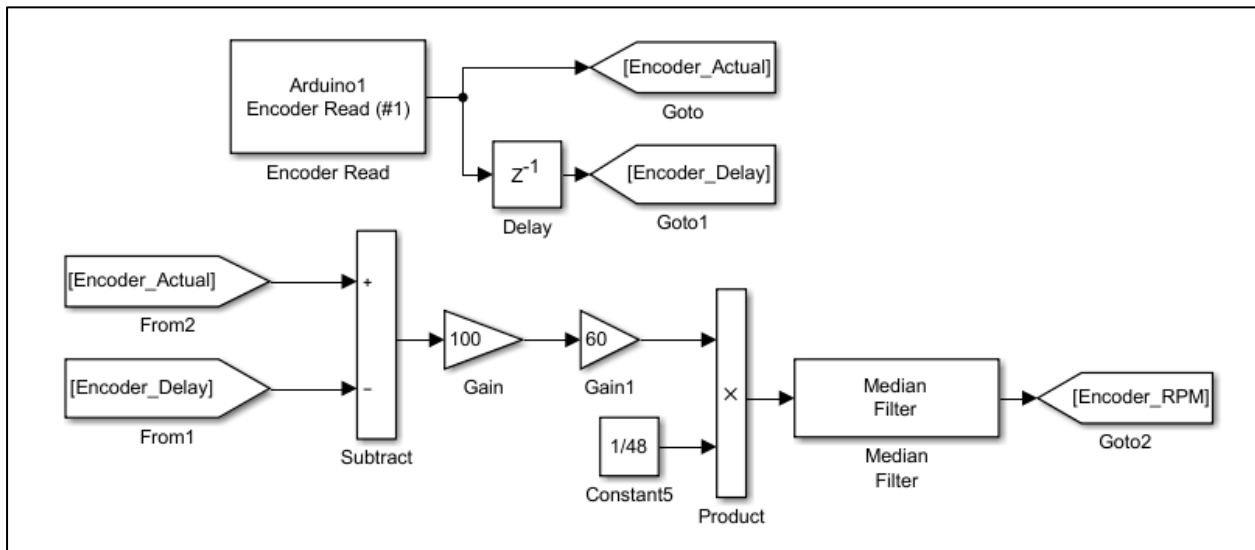
2.6 BLOQUES DE CONTROL EN SISTEMA DE LAZO ABIERTO



2.6.1 **Figura 2.6.1 “Implementación del sistema de lazo abierto en Simulink y sus bloques”**

Uno de los primeros métodos de control enseñados por el Laboratorio de sistemas de control, es el posiblemente considerado uno de los más fáciles y utilizados en nuestra vida cotidiana, el cual es un sistema de lazo abierto, lo que corresponde a un sistema sin retroalimentación o también si control de la señal de salida. Mediante la imagen previamente mostrada podremos describir la funcionalidad total de nuestro sistema de control respectivo, el cual nos indica el control de giro del motor mediante los pines 7 y 8 de nuestro microcontrolador Arduino Uno R3, tomando en cuenta que dichos valores son enviados a

nuestro encoder. El valor convertido a formato es el valor de la constante de lo RPM con la comparación de un dato de 0 a 255 que nos permita un valor constante de conversión entre valores de rpm y valores de ingreso y egreso que nos permita la descripción de la variable de salida en RPM mediante la salida digital del microcontrolador. El bloque Arduino Encoder Read es el encargado de recibir las fases A y B del encoder para poder realizar la medición de velocidad del motor, y así, poder mostrarlos mediante un scope.



2.6.2 *Figura 2.6.2 “Obtención de los valores del Encoder y cálculo de RPM del motor DC”*

Pero antes de poder recibir y utilizar correctamente la señal de velocidad, es importante comprender que el encoder incremental no entrega directamente una señal en unidades de RPM, sino que proporciona una señal discreta asociada al movimiento angular del eje, representada en forma de pulsos o incrementos de conteo. Por esta razón, para obtener una medición de velocidad es necesario realizar un procesamiento matemático a partir del número de pulsos detectados durante un intervalo de muestreo.

En el modelo desarrollado, la señal proveniente del bloque Encoder Read representa el conteo instantáneo del encoder, denominada como *Encoder_Actual*. Paralelamente, se implementó un bloque de retardo unitario z^{-1} para almacenar el valor previo de la lectura, denominado *Encoder_Delay*. Posteriormente, ambas señales son ingresadas a un bloque de resta, donde se calcula la diferencia entre la muestra actual y la anterior:

$$\Delta N = Encoder_Actual - Encoder_Delay$$

Este valor ΔN representa el número de pulsos detectados dentro de una ventana de muestreo. Considerando que el sistema opera con un tiempo de muestreo $T_s = 0,01$ s, se transforma el número de pulsos por muestra a pulsos por segundo multiplicando por el inverso del tiempo de muestreo, lo cual en el diagrama se representa mediante una ganancia de 100:

$$\Delta N / T_s = \Delta N \times 100$$

Posteriormente, para convertir la señal a revoluciones por minuto, se multiplica por 60, debido a que un minuto contiene 60 segundos. Esta etapa se observa en el diagrama mediante una segunda ganancia de 60:

$$\Delta N \times 100 \times 60$$

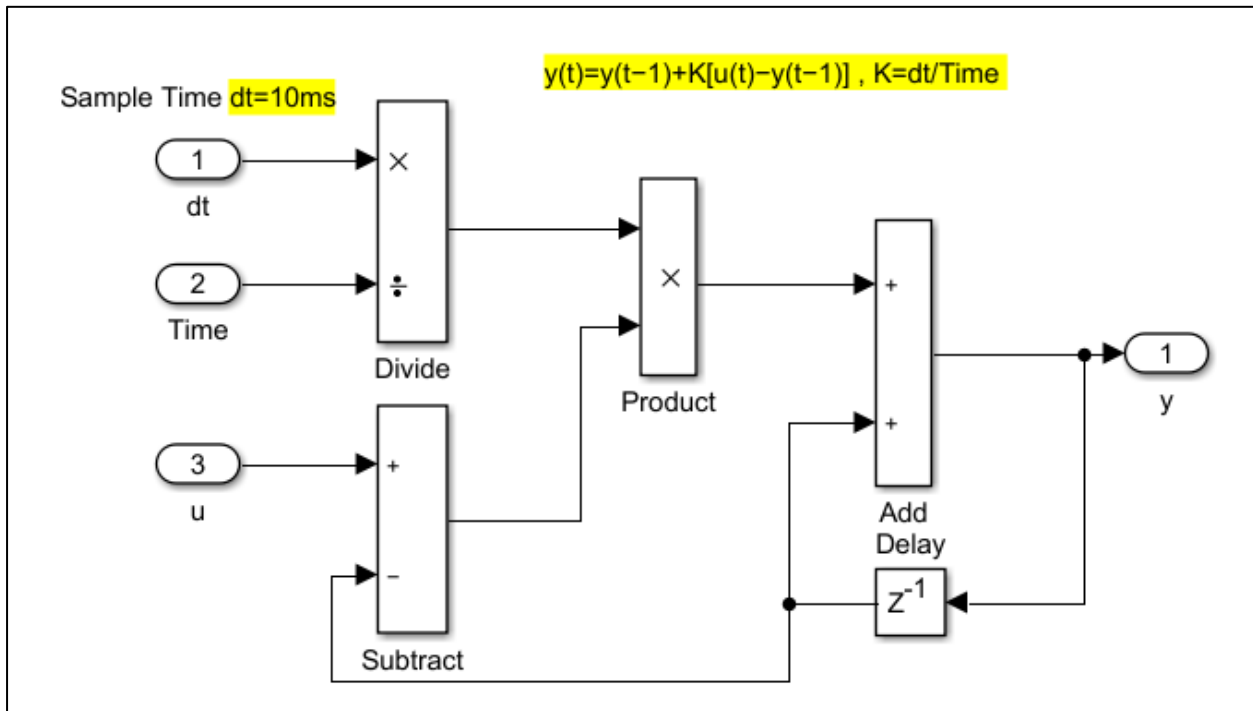
Finalmente, debido a que el encoder utilizado tiene una resolución de 48 pulsos por revolución (PPR = 48), se divide el resultado entre este valor para obtener directamente la velocidad del motor en unidades de RPM. En el modelo de Simulink esto se representa mediante la constante 1/48 y el bloque "Product":

$$RPM = (\Delta N / 48) \times (60 / T_s)$$

Reemplazando $T_s = 0,01$ s, la ecuación se puede expresar de forma simplificada como:

$$RPM = 125 \times \Delta N$$

Como resultado, la señal de salida obtenida a partir de este cálculo representa la velocidad estimada del motor en RPM. No obstante, debido a que el cálculo se basa en conteo discreto de pulsos y puede verse afectado por cuantización, ruido eléctrico o variaciones instantáneas en la lectura del encoder, la señal generada puede presentar picos o valores atípicos. Por esta razón, se incorporó un bloque "Median Filter", el cual permite eliminar valores espurios y estabilizar la medición antes de utilizarla como señal de retroalimentación dentro del lazo de control. De esta manera, se obtiene una señal Encoder_RPM más confiable para la implementación del controlador PID.



2.6.3 *Figura 2.6.3 “Filtro pasa bajo implementado”*

Aplicamos un filtro adicional a la señal previamente procesada con el objetivo de obtener una medición final más estable, reduciendo el ruido de alta frecuencia y suavizando fluctuaciones residuales que aún pueden presentarse en la estimación de velocidad. Este filtrado se implementó mediante un filtro pasa bajas discreto de primer orden, el cual es ampliamente utilizado en sistemas de control debido a su sencillez, estabilidad y facilidad de implementación en tiempo real.

El filtro aplicado se basa en una ecuación recursiva, donde la salida filtrada actual depende de la salida filtrada anterior y de la muestra actual de la señal de entrada. En el modelo de Simulink, esta estructura se representa mediante un bloque de retardo unitario z^{-1} , un bloque de resta, un producto y finalmente una suma que genera la nueva señal filtrada. La ecuación general del filtro utilizado es:

$$y(t) = y(t - 1) + K [u(t) - y(t - 1)]$$

Donde:

- $y(t)$ es la salida filtrada en el instante actual,
- $y(t - 1)$ es la salida filtrada anterior (almacenada con el bloque z^{-1}),

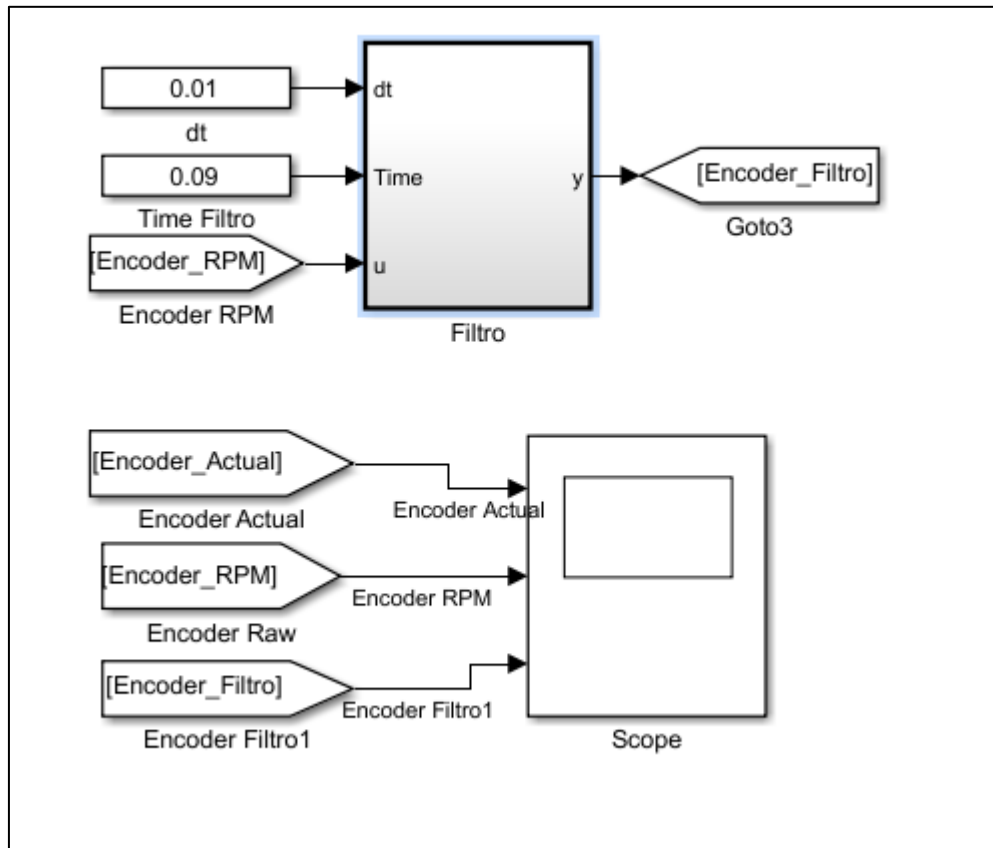
- $u(t)$ es la señal de entrada al filtro (en este caso, la velocidad previamente calculada y filtrada),
- K es un coeficiente de filtrado que define el comportamiento dinámico del filtro.

Para determinar el valor del coeficiente K , se utilizó la relación:

$$K = dt / Time$$

En la implementación realizada, el tiempo de muestreo fue configurado como $dt = 10$ ms (0,01 s), lo cual corresponde al tiempo de muestreo empleado en el sistema. El parámetro "Time" actúa como una constante de suavizado, donde valores mayores producen una señal más estable, pero con mayor retardo, mientras que valores menores permiten una respuesta más rápida pero con menor atenuación del ruido.

De esta manera, el filtro funciona como un promedio recursivo que suaviza progresivamente la señal, permitiendo reducir variaciones rápidas no deseadas y obteniendo una medición de velocidad más limpia. Este procesamiento es especialmente importante antes de ingresar la señal al controlador PID, ya que mejora la calidad de la retroalimentación y disminuye la posibilidad de acciones de control innecesarias causadas por ruido o mediciones inestables.



2.6.4 *Figura 2.6.4 “Bloque del Filtro Pasabajos y señales empleadas para la visualización de su desempeño”*

Para finalmente obtener las señales correspondientes a una medición de velocidad adecuada para el control, se implementó el bloque “Filtro”, el cual recibe como entrada la señal *Encoder_RPM* (velocidad calculada a partir del conteo de pulsos del encoder). Este bloque aplica un filtrado pasa bajas discreto de primer orden, con el objetivo de suavizar la señal y reducir el ruido residual que aún puede persistir después del cálculo de velocidad y del filtrado previo.

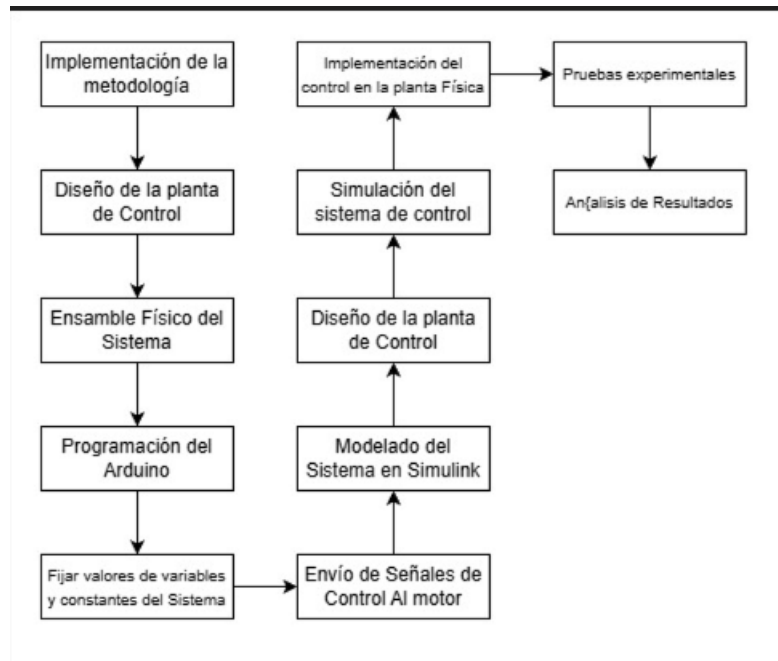
En esta etapa, el filtro fue parametrizado utilizando un tiempo de muestreo $dt = 0,01 s$, equivalente al tiempo de muestreo general del sistema, y una constante de suavizado $Time = 0,09 s$, definida experimentalmente como un valor adecuado para mejorar la estabilidad de la señal sin introducir un retardo excesivo. La salida del filtro corresponde a la señal *Encoder_Filtro*, la cual representa la velocidad final acondicionada y lista para ser utilizada como retroalimentación dentro del lazo de control.

Con el fin de analizar el comportamiento de la medición y evidenciar el efecto del filtrado, se visualizaron simultáneamente tres señales dentro de un bloque “Scope”:

- Encoder_Actual: lectura directa del conteo del encoder (señal discreta de movimiento).
- Encoder_RPM (Encoder Raw): velocidad estimada en RPM obtenida a partir de la diferencia entre muestras.
- Encoder_Filtro: velocidad filtrada final, utilizada como señal de retroalimentación.

La comparación de estas señales permitió verificar de manera clara la mejora obtenida con el acondicionamiento, ya que la señal filtrada presentó menor ruido y mayor estabilidad, lo cual resulta fundamental para evitar oscilaciones o respuestas erráticas en el controlador PID. En consecuencia, esta etapa permitió disponer de una medición confiable para el análisis experimental del sistema y la implementación adecuada del control de velocidad.

2.7 DIAGRAMA DE METODOLOGÍA



2.7.1.1 *Figura 2.7.1.1 “Diagrama de bloques de la metodología utilizada”*

La metodología empleada en este proyecto se estructura en cuatro etapas principales que permiten lograr un diseño, implementación y validación integral del sistema de control de velocidad para un motor de corriente continua mediante Arduino y Simulink. Cada una de estas fases describe de manera secuencial las actividades desarrolladas, así como los elementos técnicos involucrados.

2.7.1 DISEÑO DE PLANTA DE CONTROL

La primera fase consiste en el diseño conceptual y físico de la planta de control. En esta etapa se definieron los componentes principales del sistema, tales como el motor DC, el driver de potencia, el encoder incremental A/B y el microcontrolador Arduino. Asimismo, se elaboraron los gráficos, ensamblajes y esquemas de conexión necesarios para garantizar una integración coherente y funcional de todos los elementos.

Se llevó a cabo la planificación detallada del cableado, la distribución de los módulos y la disposición mecánica del prototipo, de manera que se asegure estabilidad,

accesibilidad y facilidad de mantenimiento. Este diseño inicial constituye la base para las siguientes fases, ya que establece la estructura física sobre la cual se implementará el sistema de control.

2.7.2 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR Y CONFIGURACIÓN DE CONEXIONES

Una vez definida la plataforma física, se procedió a la programación del microcontrolador. Esta etapa contempla el desarrollo de un sistema de comunicación serial bidireccional entre Arduino y Simulink, lo cual permite el intercambio de datos en tiempo real. El microcontrolador recibe desde Simulink la señal de control generada por el algoritmo, y envía de regreso las mediciones capturadas por el encoder.

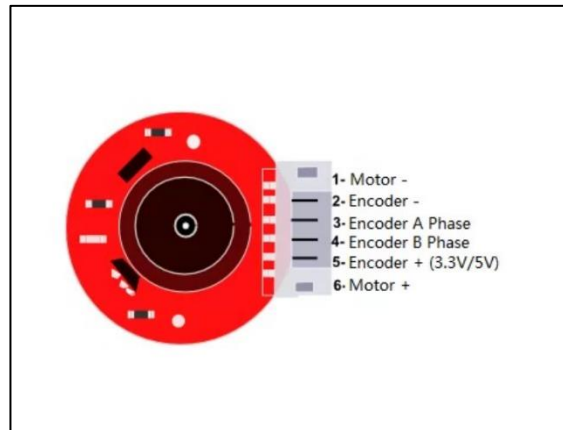
Adicionalmente, se configuraron las rutinas para la lectura de los canales A y B del encoder incremental, con el fin de obtener la velocidad real del motor. También se implementaron las instrucciones PWM para controlar el driver y, por consiguiente, la velocidad del motor DC. La correcta configuración del flujo de señales es esencial para garantizar el funcionamiento del lazo cerrado.

2.7.3 MODELO Y SIMULACIÓN

En esta fase, se desarrolló el modelo matemático y funcional del sistema dentro del entorno de Simulink. Se integraron los bloques de control necesarios, incluyendo el controlador PID, los bloques de visualización, adquisición de datos y las interfaces de comunicación serial.

El modelado permitió analizar el comportamiento dinámico de la planta, estimar los parámetros relevantes y ajustar el controlador antes de realizar pruebas físicas. La simulación en Simulink se utilizó como herramienta predictiva para verificar la estabilidad del sistema, evaluar diferentes configuraciones del controlador y anticipar posibles problemas en la etapa experimental. Esta fase tiene un rol clave en la validación preliminar del diseño.

2.8 CONEXIONES Y POLARIDAD DE CONEXIONES LOS DISPOSITIVOS



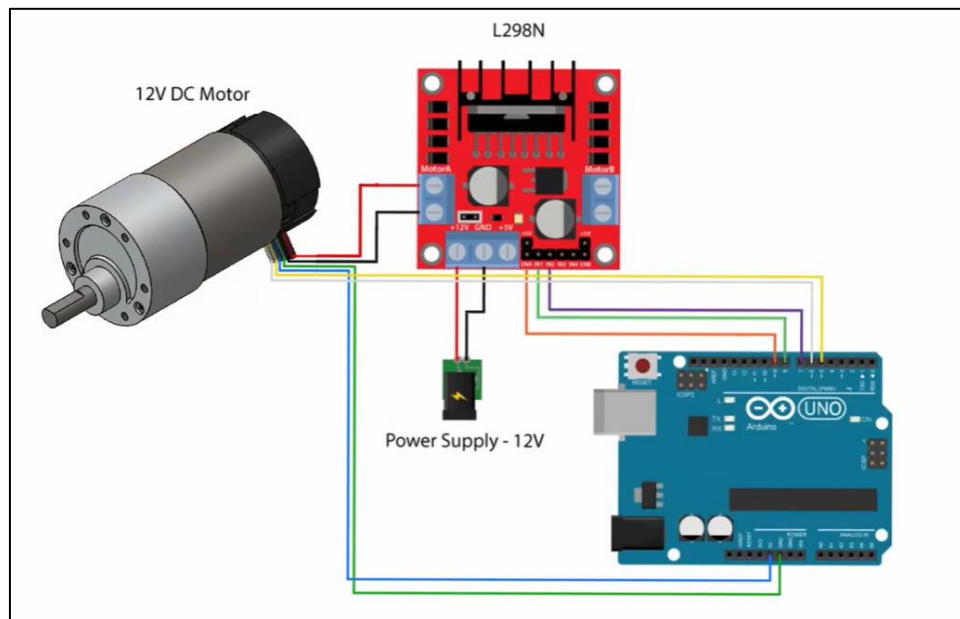
2.8.1 *Figura 2.8.1 “Conexiones y Pines del motor DC y su respectivo encoder”*

Las conexiones del motorreductor modelo 25GA–370, el cual opera con una tensión nominal de 12 V, se realizaron considerando que el conjunto incorpora un encoder incremental integrado. Este dispositivo cuenta con seis pines, los cuales corresponden tanto a la alimentación del motor como a la alimentación y señales de salida del encoder.

De acuerdo con la distribución mostrada en la figura, los pines 1 y 6 corresponden a los terminales de potencia del motor (Motor – y Motor +, respectivamente). Por otra parte, el encoder requiere una alimentación independiente, compuesta por los pines 2 y 5, correspondientes a Encoder – (GND) y Encoder + (3,3 V / 5 V). Finalmente, los pines 3 y 4 representan las salidas del encoder incremental en los canales A y B, las cuales generan pulsos digitales proporcionales al giro del eje.

Estas señales A y B permiten realizar el conteo de incrementos de posición angular y, mediante el procesamiento adecuado en el microcontrolador, obtener la estimación de velocidad del motor en unidades de RPM. En consecuencia, la correcta identificación de la polaridad y funcionalidad de cada pin resulta fundamental para asegurar una lectura confiable del encoder y un funcionamiento estable del sistema de control.

Adicionalmente, para garantizar estabilidad eléctrica y evitar lecturas erráticas, se consideró indispensable mantener una referencia de tierra común entre el Arduino, el driver de potencia y las fuentes de alimentación utilizadas, asegurando así condiciones adecuadas para la adquisición y análisis de datos durante la etapa experimental.



2.8.2 *Figura 2.8.2 “Conexiones del sistema implementado para un control de velocidad de un motor DC”*

Una vez identificada la distribución de pines del motorreductor modelo 25GA–370 y las señales asociadas al encoder incremental, se procedió al conexionado general del sistema conforme al esquema mostrado. Esta etapa fue fundamental, ya que un error de polaridad o una conexión incorrecta puede provocar lecturas inestables del encoder, mal funcionamiento del driver o incluso daños en los componentes. Por esta razón, se aplicó un procedimiento de conexión y validación progresiva, priorizando primero el correcto suministro de alimentación y luego la integración de señales de control y medición.

Para la alimentación del actuador se utilizó una fuente externa de 12 V, debido a que la corriente demandada por el motor es superior a la que puede suministrar el Arduino de forma directa. En consecuencia, la fuente de 12 V se conectó a los terminales de entrada del módulo L298N, el cual cumple la función de etapa de potencia y permite controlar el motor mediante un puente H interno. De esta forma, el Arduino no alimenta al motor, sino que únicamente entrega señales de control (PWM y dirección), mientras el driver realiza el manejo de potencia requerido.

El motor DC se conectó a las salidas del L298N (OUT1 y OUT2 o canal equivalente), cuidando la polaridad de los terminales para asegurar el sentido de giro esperado. En caso

de que el sentido de giro no coincidiera con el deseado, se corrigió invirtiendo los terminales del motor o ajustando las señales digitales de dirección (IN1 e IN2).

Con respecto al control de velocidad, se utilizó el pin de habilitación del driver (ENA) como entrada PWM, ya que este pin permite regular la energía promedio entregada al motor mediante el ciclo de trabajo de la señal. En el modelo desarrollado en Simulink, el control se implementó con un rango de señal PWM compatible con Arduino, es decir, valores entre 0 y 255, permitiendo variar la velocidad del motor de manera proporcional al valor enviado. En cuanto al encoder incremental incorporado en el motorreductor, se identificaron los pines correspondientes a alimentación y señales de salida. El encoder proporciona dos canales de señal, denominados fase A y fase B, los cuales permiten medir la rotación del eje a partir del conteo de pulsos generados durante el giro. Estas señales fueron conectadas directamente a entradas digitales del Arduino, permitiendo registrar el movimiento y posteriormente calcular la velocidad del motor en unidades de RPM dentro de Simulink. Se verificó previamente el funcionamiento del encoder mediante pruebas de lectura básica, confirmando que el conteo variaba correctamente con el giro del motor.

Un aspecto crítico durante el montaje fue la implementación de una referencia común de tierra (GND común) entre todos los componentes del sistema: Arduino, driver L298N y fuente externa de 12 V. Esta condición es indispensable para garantizar que las señales de control y medición tengan una referencia estable, evitando errores de lectura, ruido inducido o comportamiento errático del sistema. En particular, se observó que la ausencia de una tierra compartida puede generar mediciones inconsistentes del encoder o fallos en la comunicación entre Arduino y Simulink.

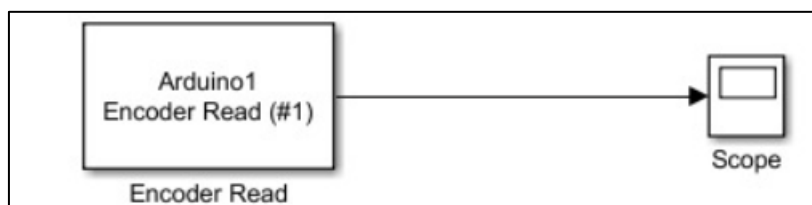
Finalmente, una vez completadas las conexiones, se realizó una verificación general del sistema que incluyó: continuidad eléctrica, polaridad de alimentación, estabilidad del motor ante señales PWM fijas y consistencia de lecturas del encoder antes de proceder a las pruebas en lazo cerrado con controlador PID.

2.9 LAZO CERRADO Y PRUEBAS

Finalmente, se procedió a la implementación práctica del modelo desarrollado sobre la mini planta real, con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema de control en condiciones físicas y medibles. En esta etapa se integró el controlador PI/PID diseñado en Simulink con el microcontrolador Arduino, logrando cerrar el lazo de control directamente sobre el hardware mediante la comunicación establecida entre el entorno de simulación y la planta experimental.

Las pruebas experimentales se realizaron variando el valor de referencia (setpoint) de velocidad y registrando la respuesta del motor ante diferentes condiciones de operación. Para ello, se capturaron señales de entrada y salida del sistema, incluyendo el comportamiento del actuador ante cambios bruscos en la referencia, así como la estabilidad de la señal medida por el encoder incremental. Este procedimiento permitió evaluar de manera objetiva el desempeño del sistema de control, verificando su capacidad de seguimiento y regulación de velocidad.

El análisis de resultados se llevó a cabo mediante la observación y comparación de las curvas de respuesta temporal obtenidas, considerando parámetros típicos de desempeño en control automático, tales como: tiempo de subida, tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error en estado estacionario. Adicionalmente, se realizó una comparación entre los resultados teóricos (simulación) y el comportamiento real del sistema, identificando diferencias atribuibles a efectos no ideales presentes en la planta física, como fricción, saturación del actuador, ruido de medición y variaciones en la alimentación. Esta fase experimental permitió validar la efectividad del controlador implementado, así como detectar oportunidades de mejora en etapas posteriores del proyecto.

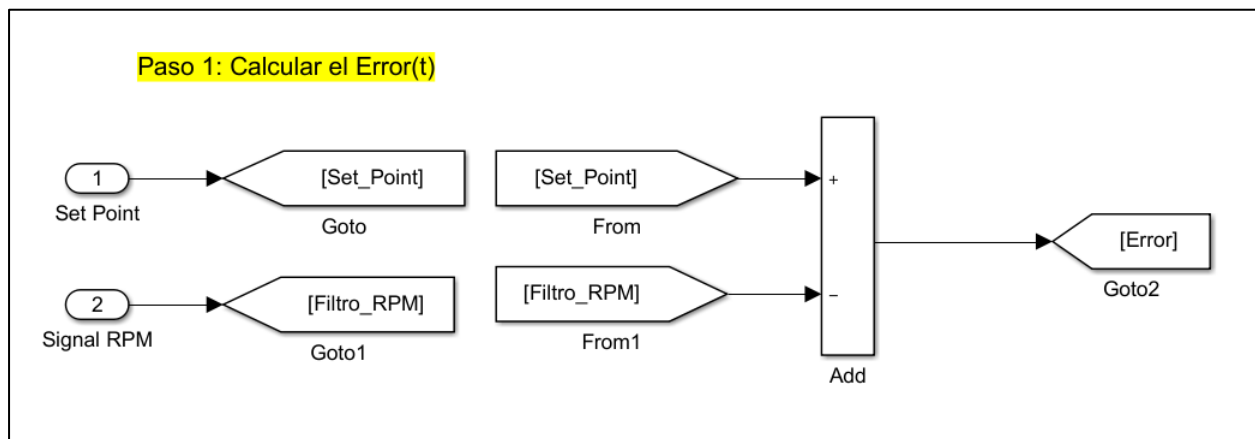


Como etapa inicial de validación, se efectuó una prueba orientada a verificar el correcto funcionamiento del encoder incremental y la comunicación entre Arduino y Simulink. Para ello, se utilizó el bloque de lectura del encoder "Arduino1 Encoder Read (#1)", cuya salida

fue visualizada mediante un bloque “Scope”, permitiendo monitorear en tiempo real el comportamiento de la señal medida.

El objetivo principal de esta prueba fue confirmar que el sistema era capaz de adquirir datos del encoder de forma confiable, detectando variaciones de conteo asociadas al movimiento del eje del motor. De esta manera, se verificó que el microcontrolador recibía correctamente las señales A y B del encoder, y que dichas lecturas eran transmitidas hacia Simulink sin pérdidas significativas ni interrupciones de comunicación.

Posteriormente, se variaron valores arbitrarios de velocidad mediante la señal de control, observando la respuesta correspondiente en la lectura del encoder. Con esto se comprobó que el conteo incrementaba proporcionalmente al aumento de velocidad del motor y disminuía cuando se reducía la señal aplicada. Esta etapa fue clave para asegurar que la retroalimentación del sistema era válida antes de implementar el control en lazo cerrado, permitiendo calibrar el sistema de medición y garantizar condiciones adecuadas para las pruebas con el controlador PI/PID.



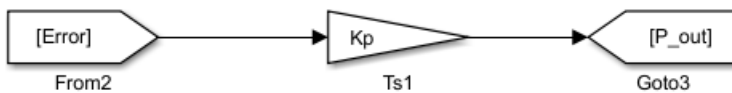
El primer paso para implementar el controlador PID en MATLAB/Simulink mediante un diagrama de bloques consiste en obtener la señal de error, ya que esta representa la diferencia entre el valor deseado y el valor real medido del sistema. En este caso, el error se calcula comparando el Set Point (referencia de velocidad) con la señal de velocidad realimentada Filtro_RPM (velocidad del motor medida y previamente filtrada).

Para ello, se emplea un bloque de suma/resta configurado con signos “+” y “-”, de manera que se obtiene:

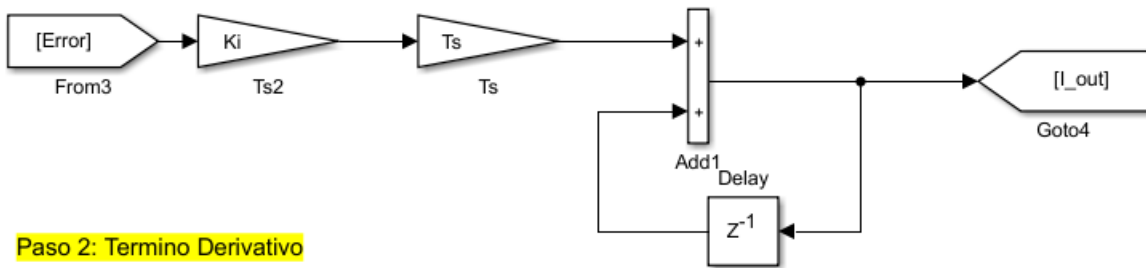
$$Error(t) = Set_Point(t) - Filtro_RPM(t)$$

De esta forma, la señal $Error(t)$ indica cuánto se desvía la velocidad real del motor respecto al valor de referencia establecido, y será la señal principal utilizada en los siguientes pasos para generar la acción de control del PID.

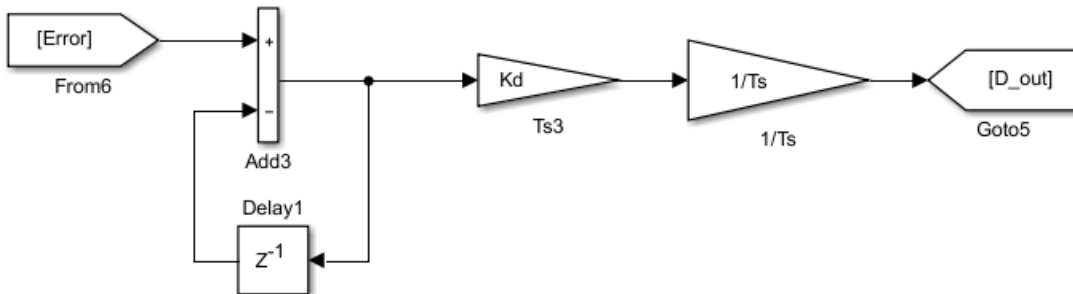
Paso 2: Termino Proporcional



Paso 2: Termino Integral



Paso 2: Termino Derivativo



Una vez calculada la señal de error $Error(t)$, el siguiente paso en la implementación del controlador PID en Simulink consiste en obtener por separado cada uno de sus términos: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). Para esto, se utiliza la misma señal de error como entrada y se procesa mediante bloques aritméticos, considerando las ganancias correspondientes K_p , K_i y K_d .

Término proporcional (P)

El término proporcional se obtiene multiplicando directamente la señal de error por la ganancia proporcional K_p . Esta acción permite generar una corrección inmediata proporcional al error presente en el sistema:

$$P(t) = K_p \cdot Error(t)$$

Término integral (I)

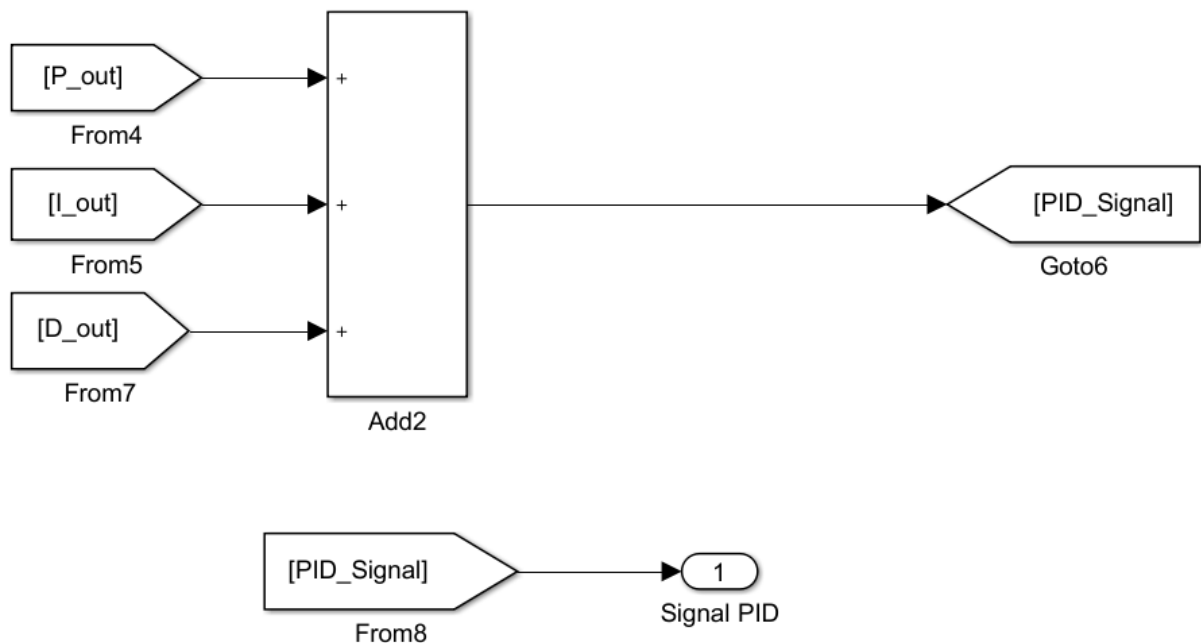
El término integral se calcula acumulando el error a lo largo del tiempo, con el fin de reducir el error en estado estacionario. En el diagrama, este comportamiento se representa mediante un bloque de retardo z^{-1} y un sumador, que permiten almacenar el valor anterior y realizar la acumulación progresiva:

$$I(t) = I(t - 1) + K_i \cdot Error(t)$$

Término derivativo (D)

El término derivativo se obtiene a partir del cambio del error respecto al tiempo, permitiendo anticipar variaciones rápidas en el sistema. En la implementación se utiliza nuevamente un retardo z^{-1} para disponer del error anterior y calcular su diferencia con el error actual:

$$D(t) = K_d \cdot (Error(t) - Error(t - 1))$$

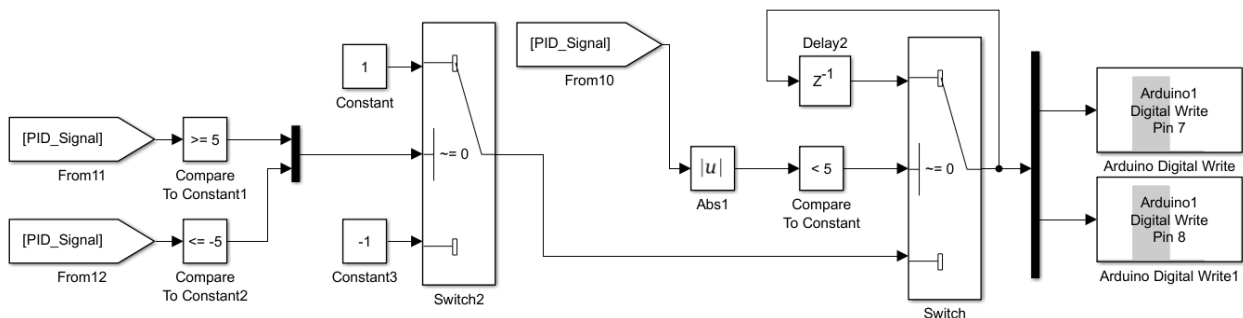


Una vez obtenidos los tres componentes del controlador (K_p , K_i y K_d) de forma independiente, el siguiente paso consiste en realizar la suma total de estos términos para construir la señal de control final del PID. En el diagrama de Simulink, esta operación se ejecuta mediante un bloque sumador, el cual combina los aportes proporcional, integral y derivativo de la siguiente manera:

$$PID(t) = K_p(t) + K_i(t) + K_d(t)$$

La salida de este bloque representa la acción de control total calculada por el PID. Sin embargo, debido a que la señal será utilizada como entrada PWM hacia el Arduino y posteriormente aplicada al driver L298N.

De esta manera se obtiene la señal denominada PID_Signal, la cual corresponde a la salida final del controlador y se utiliza posteriormente como señal de mando del actuador. Adicionalmente, esta señal se enruta también hacia un bloque de visualización (Scope) con el fin de monitorear su comportamiento durante la ejecución del sistema.



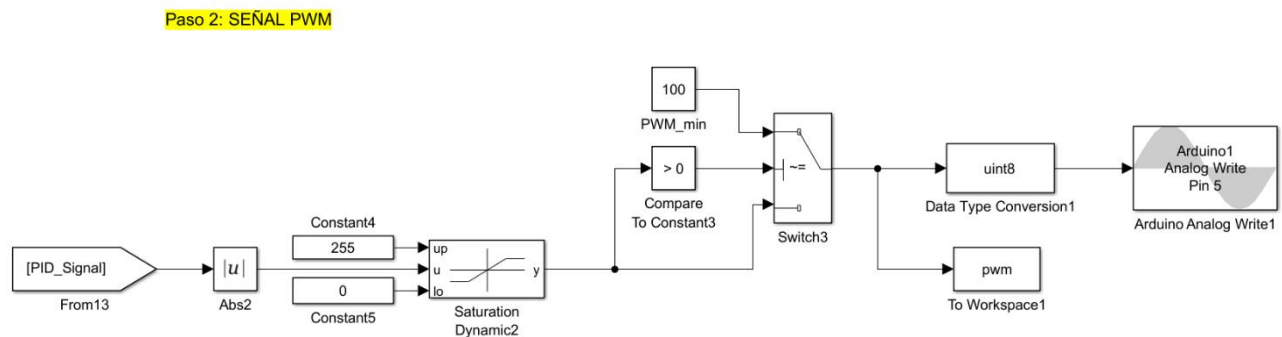
Una vez obtenida la señal final del controlador PID_Signal, el siguiente paso consiste en acondicionarla y aplicarla al motor DC mediante el Arduino y el driver L298N, incorporando mejoras en la lógica de control tanto para la magnitud de la señal como para la definición del sentido de giro. En este esquema final, la señal del PID no solo se adapta para la generación de la señal PWM, sino que también se filtra y se condiciona para evitar cambios bruscos y comportamientos no deseados en el sistema físico.

En primer lugar, la señal PID_Signal es evaluada mediante bloques de comparación que determinan si su valor supera umbrales positivos o negativos predefinidos. A partir de esta evaluación, un bloque Switch selecciona el valor lógico correspondiente que define el sentido de giro del motor, representado mediante constantes positivas o negativas. Esta

lógica permite discriminar claramente entre giro horario, giro antihorario o condición de reposo, según el valor instantáneo del controlador.

Posteriormente, la magnitud absoluta de la señal seleccionada es procesada mediante un bloque Abs, garantizando que la señal utilizada para el control de velocidad sea siempre positiva. Adicionalmente, se incorpora un bloque de retardo (Delay) que permite suavizar la transición de la señal y reducir oscilaciones rápidas, mejorando así la estabilidad del sistema durante cambios de referencia o perturbaciones. La señal resultante es comparada con un umbral mínimo, asegurando que solo valores significativos sean aplicados al actuador.

Finalmente, las señales lógicas generadas son enviadas a los pines digitales del Arduino mediante bloques Digital Write, los cuales controlan directamente las entradas de dirección del driver L298N. De esta manera, el sistema implementa un control coordinado de velocidad y sentido de giro del motor DC, permitiendo una respuesta más estable y robusta ante variaciones de la señal de control, así como una mejor representación del comportamiento dinámico del sistema durante la operación experimental.

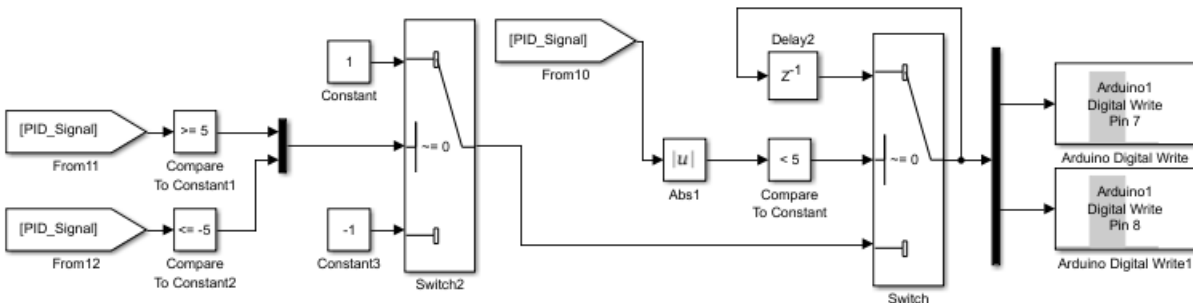


Este es el proceso de adecuación de la señal de control generada por un controlador PID para su aplicación en un sistema de control de velocidad de un motor de corriente continua. La señal de salida del PID, identificada como PID_Signal, puede adoptar valores positivos o negativos en función del error existente entre la velocidad de referencia y la velocidad medida. Para que esta señal sea compatible con el hardware de potencia, se transforma inicialmente mediante una operación de valor absoluto, obteniendo una magnitud positiva

proporcional al esfuerzo de control. Posteriormente, dicha señal es limitada mediante un bloque de saturación al rango comprendido entre 0 y 255, correspondiente a los valores aceptados por la función de salida PWM del microcontrolador Arduino.

Una vez determinada la magnitud de la señal, se evalúa su condición mediante un bloque comparador, lo que permite habilitar la lógica de control de dirección del motor. Adicionalmente, se incorpora un umbral mínimo de activación PWM_min, aplicado a través de un bloque conmutador, con el propósito de asegurar que el motor reciba la energía suficiente para vencer la fricción estática durante el arranque. Esta estrategia evita la aplicación de señales PWM de bajo valor que no producen movimiento mecánico y pueden generar efectos indeseados como ruido eléctrico. Finalmente, la señal seleccionada es convertida a un formato entero sin signo de 8 bits, garantizando su correcta transmisión al pin de salida PWM del Arduino mediante el bloque de escritura analógica.

El funcionamiento de este esquema se encuentra estrechamente relacionado con el cálculo de la velocidad angular del motor, expresada en revoluciones por minuto (RPM), la cual se obtiene a partir de la variación de pulsos del encoder en un intervalo de muestreo definido. La señal PID_Signal se genera como respuesta a esta medición de velocidad, permitiendo cerrar el lazo de control al transformar la acción del controlador en una señal física aplicada al motor.



Este es el esquema lógico empleado para determinar el sentido de giro de un motor de corriente continua a partir de la señal de control generada por un controlador PID. En el modelo, la señal PID_Signal es analizada mediante bloques de comparación que permiten identificar su signo y magnitud. En particular, se evalúa si la señal supera un umbral positivo o negativo predefinido, lo que permite distinguir entre una intención de giro en sentido directo, inverso o una condición de reposo cuando la señal no alcanza valores significativos. La selección de la dirección se realiza mediante un bloque conmutador que asigna un valor discreto asociado al sentido de rotación: un valor positivo para el giro hacia adelante, un valor negativo para el giro inverso y un valor nulo cuando no se requiere movimiento. Con el fin de evitar cambios frecuentes de sentido provocados por ruido o pequeñas variaciones alrededor del punto de equilibrio, se incorpora una zona muerta direccional. Esta se implementa comparando el valor absoluto de la señal PID_Signal con un umbral mínimo, de modo que, cuando la magnitud del esfuerzo de control es reducida, se mantiene la dirección previamente establecida a través de un bloque de retardo.

Una vez definida la dirección efectiva, esta se traduce en señales lógicas enviadas a los pines digitales del microcontrolador Arduino, los cuales se encuentran conectados al puente H del driver de potencia. Mediante estos pines se establece la polaridad de alimentación del motor, determinando su sentido de giro.

CAPITULO 3

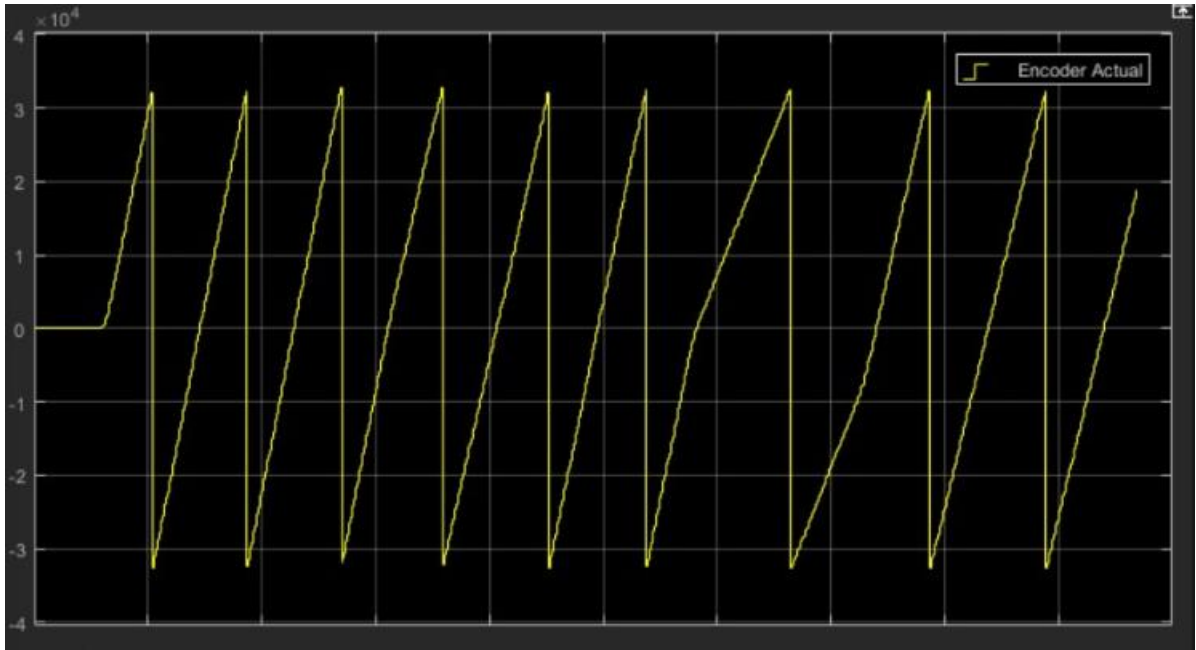
3.1 INTRODUCCIÓN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realizó la exposición y el correspondiente análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior, donde, se demostró que el diseño, implementación y validación de un sistema de control de velocidad para un motor de corriente continua permitió a los estudiantes de una manera más didáctica y practica desarrollar y afianzar sus conocimientos teóricos sobre las materias de interés. Los resultados serán presentados por medio de las simulaciones correspondientes de los sistemas desarrollados en el entorno MATLAB/SIMULINK, como también, la implementación del algoritmo de control del microcontrolador Arduino, permitiendo de esta manera realizar una evaluación del comportamiento del sistema en condiciones reales de operación.

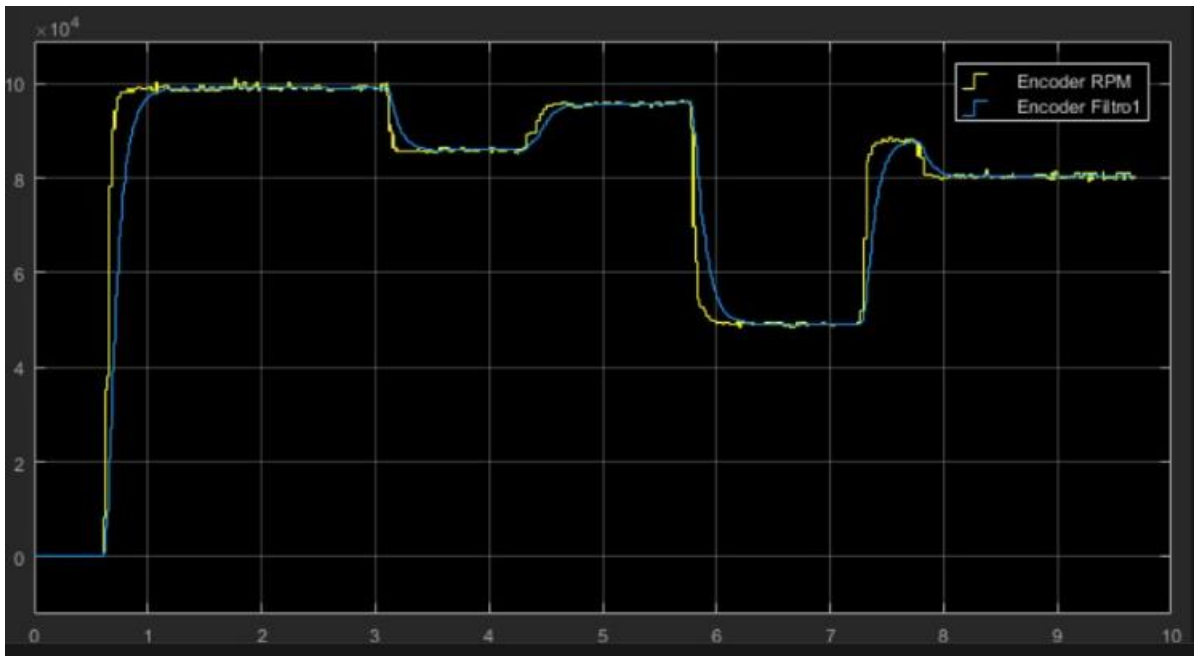
Este capítulo también incorporara un análisis de carácter didáctico, basado en la aplicación de una prueba de entrada de conocimientos del sistema implementado y respaldada en la retroalimentación directa de los estudiantes que actualmente cursan los paralelos prácticos de la materia de Sistemas de Control Avanzado en el PAO II – 2025. Aquí se evaluó el impacto del prototipo como herramienta de apoyo al aprendizaje evidenciando la relación entre los conceptos teóricos abordados en clase y su aplicación práctica sobre una planta física real.

3.2 RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO EN ENTORNO MATLAB/SIMULINK

Con la implementación del prototipo y metodología anteriormente descrita se realizó el desarrollo de la simulación del sistema de control de velocidad del motor DC operando en lazo abierto, es decir, sin la incorporación de la señal de velocidad. El objetivo de esta prueba fue la evaluación técnica del comportamiento dinámico de la planta de control, verificándose de esta manera la correcta adquisición de la señal proveniente del encoder y analizarse la relación existente entre la señal PWM aplicada y la velocidad angular obtenida.



3.2.1 Señal recibida por parte del Encoder acoplado al motor DC



3.2.2 Señal de velocidad calculad y señal filtrada (Encoder RPM y Encoder Filtro)

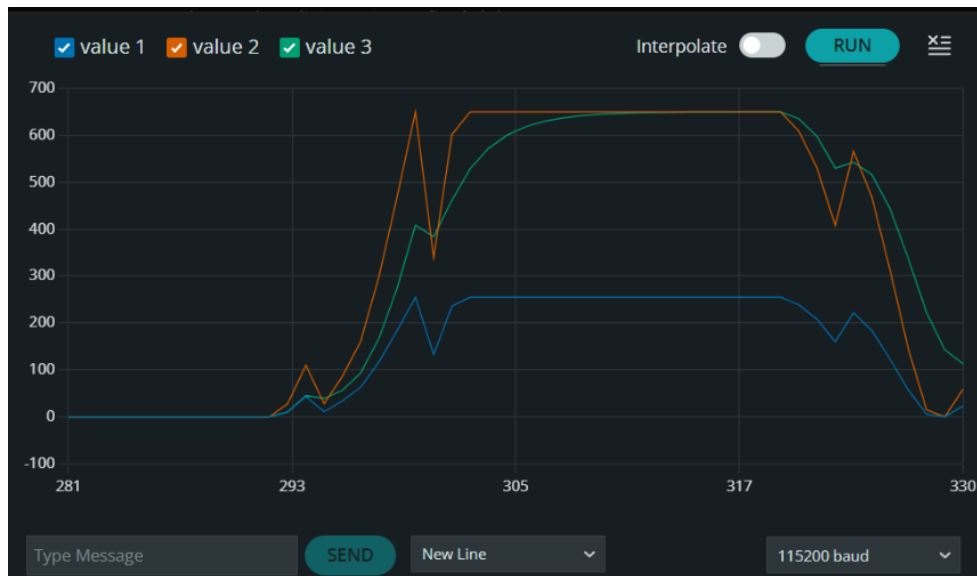
En la imagen 3.2.1 se presentó la señal denominada *Encoder Actual*, la cual corresponde al conteo acumulativo de pulsos generados por el encoder incremental acoplado al eje del motor DC. Esta señal representó directamente el número total de incrementos detectados como también su valor máximo y el reinicio de conteos, esta señal no se encuentra con algún tipo de procesamiento adicional. Se pudo determinar que esta señal tiene una forma de diente de sierra, lo cual nos confirma el correcto funcionamiento del encoder el cual cumple con la función, luego de llegar a su límite máximo de registro, se produce un reinicio del contador. La pendiente de la señal corresponde directamente a la velocidad del motor, de manera que, podemos determinar que mientras esta sea más pronunciada nos permitió inferir que la velocidad del motor DC es mayor que las que se relacionan con pendientes menores. Este comportamiento permitió verificar que el encoder respondió de forma consistente ante los cambios de la señal PWM aplicada al motor, lo cual sirvió para confirmar la correcta medición de posición angular.

En la figura 3.2.2 se presentó la comparación entre la señal del encoder procesada para obtener una señal de velocidad obtenida directamente del encoder y la señal de velocidad filtrada por un filtro de primer orden pasa bajo. La señal sin filtrar presentó fluctuaciones y picos asociados al conteo discreto de pulsos y al ruido presente en la medición. Por ello, se evidenció la necesidad de aplicar un filtro pasa bajo para poder exhibir un comportamiento más suave y estable, lo cual, fue fundamental para proseguir con el uso de esta señal como retroalimentación en el sistema de control.

Se evidenció que el sistema de lazo abierto presento un error permanente, ya que la velocidad depende únicamente del valor de la señal PWM aplicado y por ello, no existía un mecanismo que permitiera corregir desviaciones frente a un cambio de setpoint. También se pudo observar una presencia de fenómenos físicos donde se pudo evidenciar la existencia de una zona muerta para valores bajos de PWM.

Con ello, permitió observar el correcto funcionamiento de la planta y del sistema de medición de velocidad, al mismo tiempo, que se evidenció la necesidad de implementar un sistema de control de lazo cerrado que nos permita mejorar el desempeño del sistema y garantizar un seguimiento adecuado de la referencia de velocidad.

3.3 RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO IMPLEMENTADO EN ARDUINO



3.3.1 Conjunto de señales obtenidas por medio de la implementación de los bloques de matlab en Arduino

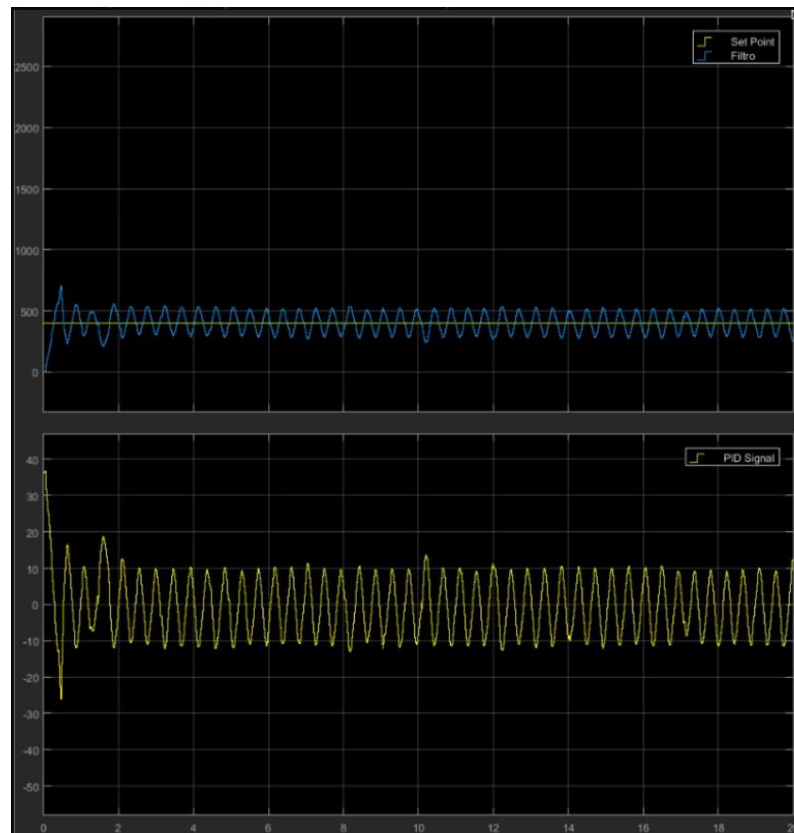
En la figura 3.3.1 se presentaron los resultados obtenidos a partir de la implementación en Lazo abierto mediante código en el microcontrolador Arduino, utilizando el Serial Plotter del entorno de Arduino IDE. En esta prueba se realizaron evaluaciones del sistema físico frente a variaciones extremas de la señal de referencia. En esta imagen se encuentran representados las señales principales como lo son, la señal de referencia, la señal de velocidad calculada a partir del encoder y la señal de velocidad filtrada. Al incrementar el valor del setpoint hasta su valor máximo, el motor respondió con un aumento progresivo de la velocidad, lo cual sirvió como evidencia para determinar nuevamente que la señal aplicada al sistema se relaciona directamente con el comportamiento del sistema. Sin embargo, como es característico en los sistemas de lazo abierto, la velocidad alcanzada no siguió de manera exacta el valor de referencia.

Se evidenció que la señal de velocidad calculada represento variaciones abruptas y picos, por lo cual, las causas atribuidas a este fenómeno son el conteo discreto del encoder y la limitada resolución de este. Aun así, luego de aplicar el filtro la respuesta fue más estable,

reduciendo así, las oscilaciones y permitiendo una mejor interpretación del comportamiento real del motor durante los transitorios.

Los resultados obtenidos permitieron validar la implementación en Arduino de la metodología seguida en los bloques de control en el entorno de MATLAB/SIMULINK, con ello, se pudo confirmar, que de manera consistente el comportamiento de la planta es lo esperado por un sistema de lazo abierto, tanto en condiciones de aumento como reducción.

3.4 RESULTADOS DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO MEDIANTE CONTROL PID EN EL ENTORNO DE MATLAB/SIMULINK



3.4.1 *Respuesta del sistema en lazo cerrado con control PID en el entorno MATLAB/SIMULINK*

En la figura 3.4.1 se evidenció la presentación de los resultados obtenidos mediante la simulación del sistema del control de velocidad del motor DC el cual operó en lazo cerrado mediante un bloque controlador de PID. En la parte superior se encuentra una comparación entre la señal de referencia setpoint y la señal de velocidad de retroalimentación, esta después de pasar por el filtro pasa bajo, "*Filtro*". En la sección inferior, se presentó la señal de control generada por el controlador *PID_Signal*.

En la sección superior, se observó que en el inicio de la simulación en la etapa transitoria se pudo constatar de una respuesta del sistema donde la velocidad aumento rápidamente sobrepasando el valor de setpoint, luego de ello, realizó el esfuerzo de control requerido para poder llegar a una zona cercana del mismo punto de referencia. Y a partir de ese momento, se presentó una oscilación periódica alrededor del punto de referencia.

Con este comportamiento se puede evidenciar que la presencia de una respuesta sub amortiguada existente en el sistema, esto va asociada a la sintonización de los parámetros del PID y a la dinámica propia de la planta.

El análisis de la señal *PID Signal* permitió identificar que el controlador pudo ajustar de manera efectiva y continua el esfuerzo del sistema de control por comenzar las variaciones que tiene la señal de velocidad, manteniendo así de esta manera el sistema oscilando por un punto de operación deseado. Por ello, se confirmó el correcto funcionamiento del controlador PID implementado en el entorno de SIMULINK.

Mediante las características de los resultados y graficas obtenidas anteriormente descritas se confirmó que existe como referencia posterior a la implementación del controlador PID en el microcontrolador Arduino, donde se permite el comportamiento dinámico del sistema y poder evaluar sus efectos de dicha sintonización del controlador.

3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE ENTRADA EN LA CLASE DE SIMULACIÓN PRÁCTICA IMPARTIDA A ESTUDIANTES DE LA MATERIA SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO PAO II - 2025

Con el objetivo de poder evaluar los conocimientos previos, se presentó a los estudiantes de la materia práctica de la asignatura Sistemas de Control Avanzado en el presente término una prueba de entrada, donde se buscó conocer cuáles eran los conocimientos sobre los conceptos fundamentales necesarios para comprender la implementación de un sistema de control de velocidad de un motor DC. Esta prueba se realizó antes de la interacción directa con la planta didáctica desarrollada en el presente proyecto. Los resultados obtenidos evidenciaron que los estudiantes poseían un conocimiento teórico básico adecuado sobre algunos de los componentes utilizados y sus funciones en el sistema empleado. En la pregunta relacionada con la función principal del driver L298N se identificó un punto crítico, ya que solo el 50 % reconoció de forma correcta su función como etapa de potencia del motor. Esto evidenció la existencia de un entendimiento parcial sobre la arquitectura real de un sistema de accionamiento de motores DC. Existió otra pregunta que presentó una situación similar y estuvo relacionada con la función del comando `analogWrite()` en Arduino, donde solo el 50 % respondió correctamente que esta instrucción generaba una señal PWM proporcional al valor ingresado. Sin embargo, se observó confusión con las demás respuestas, las cuales estuvieron asociadas a señales analógicas, lo que permitió evidenciar una comprensión parcial o incompleta sobre la capacidad de generar señales PWM mediante código en C++ o Arduino. Las siguientes preguntas relacionadas con la identificación del tipo de control presentaron más del 90 % de respuestas correctas, lo cual permitió identificar un adecuado entendimiento sobre los tipos de sistemas de control. En las preguntas posteriores, los estudiantes demostraron un reconocimiento mayoritario sobre la función de un filtro pasa-bajo y del término integral en un controlador PID, así como su efecto principal en la reducción del error en estado estacionario. Mediante esta prueba se evidenció que los estudiantes contaban con una base teórica aceptable en conceptos fundamentales de control automático, modulación PWM y control PID. No obstante, también se identificaron limitaciones en ciertos aspectos prácticos, particularmente en la interacción

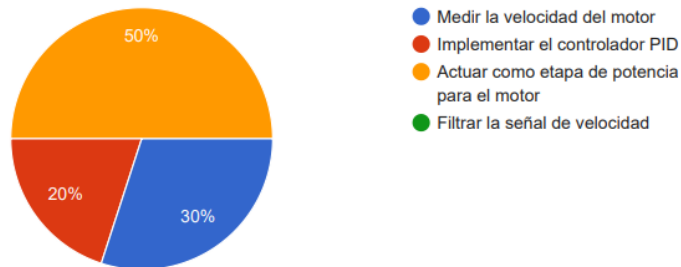
entre los distintos elementos del sistema y en la relación entre las señales de control involucradas.

Estos resultados reforzaron la problemática planteada en capítulos anteriores y respaldaron la implementación del presente proyecto, evidenciando la necesidad de disponer de plantas didácticas como herramienta de apoyo en el proceso de enseñanza de la asignatura. Esto permitió fortalecer los conocimientos teóricos y brindar a los estudiantes una experiencia práctica con un dispositivo físico, otorgándoles una visión más aplicada y una mejor capacidad de análisis y toma de decisiones frente a la variedad de plantas y proyectos que podrían enfrentar en su futura inserción en el ámbito laboral

¿Cuál es la función principal del L298N en un sistema con Arduino y motor DC?

 Copiar

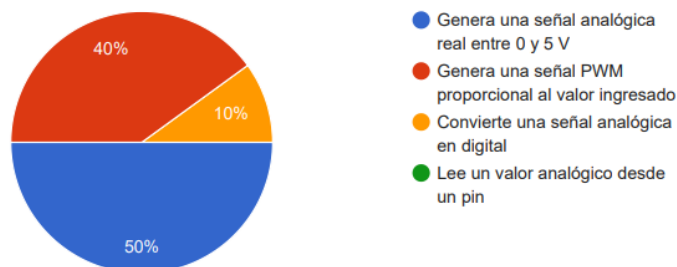
10 respuestas



En Arduino, la función analogWrite():

 Copiar

10 respuestas



3.5.1 Preguntas con los aciertos mas bajos de la prueba de entrada

3.6 INTERACCIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA MATERIA PRÁCTICA SISTEMAS DE CONTROL AVANZADOS PAO II 2025 CON LA PLANTA DIDÁCTICA

Luego de la correspondiente prueba de entrada, anteriormente descrita, se procedió a la presentación de la planta didáctica de control de velocidad desarrollada en el presente proyecto, como parte de una simulación práctica en el laboratorio. Esta actividad tuvo como objetivo permitir a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos en el presente término en un sistema físico real, observando el comportamiento de un motor DC bajo diferentes condiciones de operación y esquemas de control.

Durante la interacción con la planta, los estudiantes evidenciaron pruebas tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, modificando los valores de setpoint, las ganancias del controlador PID y la señal PWM. A partir de esta experiencia, se identificó de manera práctica la relación existente entre la señal de control generada y la respuesta del sistema. Se observó que los estudiantes lograron comprender con mayor claridad conceptos previamente abordados y reconocidos como de comprensión parcial. Asimismo, se identificó un enfoque práctico de conceptos teóricos tales como la existencia de una zona muerta del actuador, la saturación de la señal PWM, la influencia del filtrado en la señal de velocidad y la necesidad de ajustar los parámetros del controlador seleccionado, considerando las limitaciones físicas de la planta a controlar. De igual manera, se visualizó en tiempo real el comportamiento de las señales de velocidad, señales de control y otras variables previamente descritas.

La simulación de la práctica permitió comprender procesos completos relacionados con la implementación de la planta didáctica, tales como la medición de la variable de interés, la selección del tipo de bloque o sistema de control y la relación entre los modelos y diagramas utilizados en la simulación y el comportamiento real del sistema.

Esta actividad evidenció que el uso de una planta didáctica facilitó la integración de conceptos teóricos con habilidades prácticas, permitiendo experimentar de forma directa las limitaciones, ajustes y consideraciones necesarias al implementar un sistema de control sobre una planta física real.

Una vez finalizada la interacción de los estudiantes con la planta didáctica, se llevó a cabo una sesión de retroalimentación oral con el objetivo de recopilar percepciones y observaciones respecto al uso del prototipo como herramienta de apoyo al aprendizaje en la asignatura Sistemas de Control.

Esta sesión se desarrolló de manera informal, en la cual los estudiantes manifestaron que la utilización de este tipo de plantas permitió comprender conceptos previamente evaluados y abordados desde un enfoque teórico. Entre los aspectos destacados se encontraron la identificación de limitaciones físicas del motor DC y del actuador, tales como la zona muerta, la saturación de la señal PWM y la presencia de ruido en las señales de medición, entre otros.

Los estudiantes indicaron que resultó favorable la aplicación de dispositivos analógicos que permitieron modificar los parámetros del controlador en tiempo real, lo que facilitó la comprensión del proceso de sintonización y ajuste de un controlador PID.

La retroalimentación también evidenció que el prototipo permitió comprender de manera más integral el proceso completo de implementación de un sistema de control, desde la adquisición de señales hasta su acondicionamiento.

Finalmente, la retroalimentación permitió recopilar una percepción positiva respecto al uso del prototipo como herramienta didáctica, destacando su utilidad para reforzar el aprendizaje práctico y para comprender de forma aplicada los conceptos fundamentales de los sistemas de control. Los elementos observados en esta etapa complementaron los resultados obtenidos en la prueba de entrada y en la interacción directa con la planta.



3.6.1 *Interacción de estudiantes con la planta didáctica*



3.6.2 *Interacción de estudiantes con la planta didáctica*

Capítulo 4

4.1 CONCLUSIONES GENERALES Y ESPECÍFICAS

El desarrollo del presente proyecto permitió alcanzar el objetivo principal planteado, el cual estuvo orientado al diseño, construcción e implementación de equipos didácticos para la enseñanza de principios de control automático en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. A partir de los resultados obtenidos, tanto en simulación como en la implementación física, se evidenció que la planta didáctica desarrollada cumplió adecuadamente su función como herramienta de apoyo al aprendizaje práctico de los estudiantes. La construcción de la planta de control de velocidad basada en un motor de corriente continua permitió integrar de manera efectiva conceptos teóricos fundamentales del control automático con su aplicación directa sobre un sistema físico real. Esta integración facilitó la comprensión del comportamiento dinámico de la planta, así como la relación existente entre la señal de control, la señal de referencia y la respuesta del sistema, aspectos que resultan difíciles de interiorizar únicamente mediante modelos teóricos o simulaciones aisladas.

Los resultados obtenidos durante las pruebas en lazo abierto demostraron que el sistema presentó un comportamiento coherente con la teoría de control, evidenciando características propias de este tipo de sistemas, tales como la presencia de error permanente, la dependencia directa de la velocidad respecto a la señal PWM aplicada y la influencia de fenómenos físicos como la zona muerta y la saturación del actuador. Estas observaciones permitieron reforzar la importancia del uso del lazo cerrado como mecanismo de corrección del error y mejora del desempeño dinámico. De igual manera, la implementación del sistema de control en lazo cerrado mediante un controlador PID permitió observar una mejora significativa en el comportamiento del sistema, reduciendo el error en estado estacionario y permitiendo un seguimiento más adecuado de la señal de referencia. A pesar de la presencia de oscilaciones asociadas a la sintonización del controlador y a la dinámica propia de la planta, el sistema mantuvo un comportamiento estable y controlado, lo cual evidenció la correcta implementación del algoritmo de control.

La integración entre el entorno MATLAB/Simulink y el microcontrolador Arduino permitió validar una arquitectura de control híbrida adecuada para el ámbito académico. Esta integración facilitó la visualización en tiempo real de las señales del sistema, la modificación de parámetros del controlador y la evaluación del desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación. El uso de herramientas ampliamente disponibles en el laboratorio permitió además garantizar la compatibilidad del prototipo con los recursos tecnológicos existentes.

En relación con el primer objetivo específico, orientado al diseño y construcción de dos prototipos idénticos de una planta didáctica de control de velocidad, se concluyó que dicho objetivo fue cumplido satisfactoriamente. Los prototipos desarrollados presentaron una estructura compacta, funcional y adecuada para su utilización en el entorno de laboratorio, permitiendo su transporte y manipulación sin dificultad. La selección de componentes electrónicos y mecánicos respondió a criterios de disponibilidad, costo y compatibilidad con el entorno académico, garantizando la replicabilidad del sistema.

El diseño físico y eléctrico de los prototipos permitió una integración ordenada de los distintos elementos del sistema, tales como el motor DC, el driver de potencia, el encoder incremental y el microcontrolador Arduino. Esta disposición facilitó el acceso a los componentes durante las pruebas y prácticas, permitiendo a los estudiantes identificar de manera clara la función de cada elemento dentro del sistema de control. Asimismo, la utilización de dos prototipos idénticos permitió simular condiciones reales de laboratorio, donde varios grupos de estudiantes pueden trabajar de forma simultánea. Respecto al segundo objetivo específico, relacionado con la implementación de la comunicación entre los prototipos y el software MATLAB 2016, se concluyó que la integración fue exitosa. La comunicación serial establecida permitió el intercambio bidireccional de información entre el entorno de simulación y el sistema físico, posibilitando la adquisición de datos en tiempo real y la aplicación de señales de control desde Simulink hacia el motor DC. Esta arquitectura permitió implementar estrategias de control en lazo abierto y en lazo cerrado, validando el uso de MATLAB/Simulink como herramienta de apoyo en prácticas experimentales. La correcta implementación de la comunicación permitió además replicar en el microcontrolador los algoritmos de control desarrollados en Simulink, evidenciando la coherencia entre la simulación y el comportamiento real del sistema. Las diferencias

observadas entre ambos entornos fueron atribuibles a factores no ideales presentes en la planta física, tales como ruido de medición, cuantización de señales y limitaciones del actuador, lo cual enriqueció el análisis y fortaleció el aprendizaje práctico.

En cuanto al tercer objetivo específico, enfocado en la elaboración y aplicación de prácticas de laboratorio mediante el uso del prototipo, se concluyó que la planta didáctica permitió a los estudiantes aplicar de manera directa los conceptos teóricos adquiridos en clase. La interacción con el sistema físico facilitó la comprensión de aspectos fundamentales como la medición de velocidad mediante encoder, el procesamiento y filtrado de señales, la generación de señales PWM y la sintonización de controladores PID.

La experiencia práctica permitió además que los estudiantes comprendieran el proceso completo de implementación de un sistema de control, desde la definición de la referencia hasta la aplicación de la acción de control sobre el actuador. Este enfoque integral contribuyó al fortalecimiento del criterio técnico y a una mejor comprensión de las limitaciones reales que deben considerarse al diseñar e implementar sistemas de control en aplicaciones reales.

4.2 OBJETIVOS DIDÁCTICOS

Desde el enfoque didáctico, se concluyó que la utilización de la planta desarrollada permitió reducir la brecha existente entre la teoría y la práctica en la enseñanza de los sistemas de control. Los resultados de la prueba de entrada evidenciaron que, si bien los estudiantes contaban con una base teórica aceptable, existían limitaciones en la aplicación práctica de dichos conocimientos. La interacción con la planta permitió abordar estas limitaciones de manera directa. La experiencia práctica facilitó la comprensión de conceptos que previamente habían sido identificados como de comprensión parcial, tales como la función real de los drivers de potencia, la generación de señales PWM mediante software y la interacción entre las distintas señales del sistema. La posibilidad de visualizar en tiempo real el comportamiento del sistema permitió a los estudiantes relacionar de forma directa los diagramas de bloques utilizados en simulación con el comportamiento físico del motor.

La retroalimentación obtenida por parte de los estudiantes permitió concluir que el uso de la planta didáctica favoreció el aprendizaje activo y participativo. Los estudiantes destacaron la utilidad del prototipo para comprender el proceso completo de diseño, implementación y

ajuste de un sistema de control, así como para identificar las limitaciones físicas y operativas del sistema. Esta experiencia contribuyó al desarrollo de habilidades prácticas y al fortalecimiento del criterio técnico, aspectos fundamentales para la formación profesional en el área de la ingeniería.

En consecuencia, se concluyó que la planta didáctica desarrollada constituye una herramienta válida y efectiva para la enseñanza de los principios de control automático, con potencial para ser incorporada de manera permanente en las prácticas de laboratorio de la asignatura Sistemas de Control.

4.3 RECOMENDACIONES SOBRE DESARROLLO FURUTO DE LA PLANTA DIDÁCTICA

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda ampliar el alcance del prototipo mediante la implementación de nuevas estrategias de control, tales como control en cascada, control adaptativo o control por realimentación de estado, con el fin de enriquecer las prácticas disponibles y permitir el análisis de sistemas de control más avanzados.

Asimismo, se recomienda incorporar nuevas variables de control, como control de posición o control de temperatura, utilizando la misma arquitectura básica del sistema. Esto permitiría diversificar las aplicaciones del prototipo y aumentar su utilidad dentro del laboratorio, beneficiando a un mayor número de asignaturas relacionadas con el control automático.

Se sugiere además desarrollar interfaces gráficas más intuitivas que faciliten la interacción de los estudiantes con el sistema, ya sea mediante el uso de pantallas integradas o aplicaciones externas. Estas interfaces podrían permitir la modificación de parámetros de control y la visualización de señales de manera más amigable, mejorando la experiencia de aprendizaje.

BIBLIOGRAFÍA

- Arduino. (s. f.). *Arduino Uno Rev3: Technical specifications* [Recurso]. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Autor desconocido. (s. f.). *Guía modelación motor DC 1* [Documento en Scribd]. <https://es.scribd.com/document/822650566/Guia-Modelacion-motor-DC-1>
- Bishop, R. H. (2008). *Modern Control Systems* (11th ed.). Pearson.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern Control Systems* (13th ed.). Pearson.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2015). *Feedback Control of Dynamic Systems* (7th ed.). Pearson.
- MathWorks. (s. f.). *Arduino Programming: MATLAB & Simulink* [Recurso]. <https://la.mathworks.com/discovery/arduino-programming-matlab-simulink.html>
- MathWorks. (s. f.). *Get Started: Motor Drives using Arduino + Simulink* [Documentación]. https://la.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/arduino_ref/get-started-motor-drives-using-arduino-simulink.html
- MathWorks. (s. f.). *Getting Started with Arduino Hardware* [Documentación]. https://www.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/arduino_ref/getting-started-with-arduino-hardware.html
- MathWorks. (s. f.). *Legacy MATLAB and Simulink Support for Arduino* [Archivo]. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32374-legacy-matlab-and-simulink-support-for-arduino>
- MathWorks. (s. f.). *Simulink Support Package for Arduino Hardware* [Archivo]. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>
- MathWorks. (2016). *Control System Toolbox User's Guide (R2016b)*. The MathWorks, Inc.

- MathWorks. (2016). *MATLAB User's Guide (R2016b)*. The MathWorks, Inc.
- MathWorks. (2016). *Simulink User's Guide (R2016b)*. The MathWorks, Inc.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Phillips, C. L., & Parr, J. M. (2011). *Feedback Control Systems* (5th ed.). Pearson.
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2006). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- Smith, S. W. (1997). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing.
- STMicroelectronics. (2000). *L298: Dual Full-Bridge Driver (datasheet)* [Ficha técnica]. STMicroelectronics.
- University of Michigan. (s. f.). *Simulink Arduino IO Package* [Recurso]. https://ctms.engin.umch.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_IOPack
- Arduino. (n.d.). *Arduino*. Retrieved from ARDUINODOCS: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- Dorf, R., & Bishop, R. (2022). *Modern Control System* (14 ed.). Pearson Education.
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria* (12 ed., Vol. 1). Pearson Educación.