

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"SISTEMA DE ENSAYOS DE LAZOS DE CONTROL DE MOTORES TRIFÁSICOS"

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Innovación y transferencia tecnológica

AUTOR:

Edwin Alexander Ruano Gordon

DIRECTOR:

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Ibarra - Ecuador 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003410782		
APELLIDOS Y NOMBRES:	RUANO GORDON EDWIN ALEXANDER		
DIRECCIÓN:	Ibarra – Colinas del Sur, calle 2 de agosto 5-27 y Fernando Daquilema		
EMAIL:	earuanog@utn.edu.ec / edwinrugor@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		**TELÉFONO MÓVIL:**	0982533341

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA DE ENSAYOS DE LAZOS DE CONTROL DE MOTORES TRIFÁSICOS
AUTOR (ES):	RUANO GORDON EDWIN ALEXANDER
FECHA: DD/MM/AAAA	16/07/2025
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR/ASESOR:	Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 16 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....
Nombre: Edwin Alexander Ruano Gordon

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 16 de julio de 2025

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del Trabajo de Integración Curricular "SISTEMA DE ENSAYOS DE LAZOS DE CONTROL DE MOTORES TRIFÁSICOS" elaborado por EDWIN ALEXANDER RUANO GORDON, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría
C.C.: 1002641288

Dedicatorias

A Dios, primero y por siempre, por sembrar en mí la fe que sostiene los sueños más desafiantes. Esta tesis es prueba tangible de su gracia constante, su guía en cada decisión y su compañía silenciosa en las madrugadas de estudio, incertidumbre y cansancio. A Él dedico este logro, porque sin su luz, el camino hubiese sido oscuro e incierto.

También se la dedico a ese joven inquieto, recién salido del colegio, que soñaba con cambiar el mundo desde la Ingeniería. Ese chico curioso, perseverante y lleno de esperanza, que una vez creyó que la Mecatrónica era inalcanzable. Hoy, su sueño vive en estas páginas. Gracias por no rendirte.

Esta tesis es para ti Rugor.

Agradecimientos

Con profunda gratitud, quiero expresar mi reconocimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a mi hogar, fuente de fortaleza, sabiduría y guía en cada etapa de este camino desafiante.

Al engranaje de mi vida que saca mi mejor versión, por su amor incondicional, su paciencia en los momentos de agotamiento y su constante fe en mí, incluso cuando yo titubeaba.

A mis Maestros y amigos, quienes me brindaron apoyo emocional, consejos oportunos y palabras de aliento que marcaron la diferencia.

Esta tesis representa no solo un logro académico, sino también una victoria personal construida con el respaldo de los míos.

¡HASTA LA VICTORIA, SIEMPRE!

Índice de Contenidos

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA II

2. CONSTANCIAS II

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR III

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR IV

Dedicatorias V

Agradecimientos VI

Índice de Contenidos X

Índice de Figuras XIII

Índice de Tablas XIV

Índice de Ecuaciones XV

Resumen XVI

Abstract XVII

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Objetivos 2

1.2.1 Objetivo General 2

1.2.2 Objetivos Específicos 2
1.3 Alcance 2
1.4 Justificación 3

CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL 4

2.1 Antecedentes 4
2.2 Marco Teórico 6
2.2.1 Control de Lazo Abierto y Lazo Cerrado 6
2.2.2 Importancia del Control de Motores con Variadores de Frecuencia . 9
2.2.3 Controladores de Tres Términos 10
2.2.4 Control de Sistemas Retardados 12
2.2.5 Variador de Frecuencia 14
2.2.6 Motor Trifásico 15

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO 17

3.1 Modelo de la Investigación 17
3.2 Diseño de la Investigación 18
3.2.1 Fase 1: Interconexión entre Microcontrolador y Variador de Frecuencia 18
3.2.2 Fase 2: Control en Lazo Cerrado de Motores Trifásicos 18
3.2.3 Fase 3: Identificación de Variables de Control 19
3.2.4 Fase 4: Diseño de la Guía de Ensayos 19
3.2.5 Fase 5: Implementación del Sistema de Control 20
3.2.6 Fase 6: Pruebas y Análisis de Resultados 20

CAPÍTULO 4: DESARROLLO 21

4.1 Especificaciones del Sistema 21

4.2 Controlador 21
4.2.1 Diseño del Controlador 22
4.2.2 Identificación de la Planta 25
4.2.3 Calibración y Configuración de Control 30
4.2.4 Modos de operación 30
4.3 Interfaz Gráfica 32
4.4 Acondicionador de señal 34
4.4.1 Cálculos de Acondicionamiento 35
4.4.2 Conexiones del acondicionador de señal 37
4.5 Variador de Frecuencia 38
4.5.1 Conexión del Variador de Frecuencia 39
4.6 Motor 41
4.7 Encoder 43
4.7.1 Conexión del Encoder 44

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS 45

5.1 Implementación 45
5.1.1 Materiales de Construcción 45
5.1.2 Chasis y Estructura 45
5.1.3 Selección de Materiales y Equipos 47
5.1.4 Ensamblaje 48
5.2 Pruebas de funcionamiento 48
5.2.1 Fase 1: Ensayos en modo de operación de lazo cerrado sin carga . . 48
5.2.2 Fase 2: Ensayos en modo de operación de lazo abierto sin carga . . 53

5.2.3 Fase 3: Ensayos en modo de operación de lazo cerrado con carga . . 58

5.2.4 Fase 4: Ensayos en modo de operación de lazo abierto con carga . . 63

5.2.5 Análisis de los ensayos 68

5.3 Análisis de Funcionamiento 69

5.4 Fichas Técnicas 70

5.4.1 Laboratorio 1 70

5.4.2 Laboratorio 2 70

CONCLUSIONES 71

RECOMENDACIONES 72

REFERENCIAS 72

Índice de Figuras

Fig. 2.1. Sistema de control de lazo abierto [1] 7

Fig. 2.2. Sistema de control de lazo cerrado [1] 8

Fig. 2.3. Esquema básico del predictor Smith [2] 13

Fig. 2.4. Conexión en Estrella [3] 16

Fig. 2.5. Conexión en Delta [3] 16

Fig. 4.1. Diagrama de desarrollo 21

Fig. 4.2. Identificación del Sistema 22

Fig. 4.3. Conexión Arduino Mega 2560 24

Fig. 4.4. Respuesta del motor 26

Fig. 4.5. Curva Característica del Motor 27

Fig. 4.6. Ventana de Identificación de Sistema 28

Fig. 4.7. Simulación 28

Fig. 4.8. Estimación de la Función de Transferencia 29

Fig. 4.9. Diagrama de Bloques Lazo Abierto 31

Fig. 4.10. Ensayo de Lazo Abierto 31

Fig. 4.11. Diagrama de Bloques de Lazo Cerrado 32

Fig. 4.12. Ensayo de Lazo Cerrado 32

Fig. 4.13. Interfaz gráfica 33

Fig. 4.14. Acondicionador de señal 34

Fig. 4.15. Esquema acondicionador de señal 36

Fig. 4.16. Circuito del acondicionador 37

Fig. 4.17. Conexión del acondicionador de señal 38

Fig. 4.18. Variador de frecuencia 39

Fig. 4.19. Conexión VFD 40

Fig. 4.20. Motor 42

Fig. 4.21. Encoder 43

Fig. 4.22. Resistencias pull-up del encoder 43

Fig. 4.23. Conexiones encoder 44

Fig. 5.1. Perfil en C - ASTM A36 46

Fig. 5.2. Cajetín de plástico 46

Fig. 5.3. Remache de 5mm 46

Fig. 5.4. Ensamble Prototipo 48

Fig. 5.5. Ensayo 1: Lazo cerrado 500 RPM sin carga 49

Fig. 5.6. Ensayo 2: Lazo cerrado 1000 RPM sin carga 50

Fig. 5.7. Ensayo 3: Lazo cerrado 1200 RPM sin carga 51

Fig. 5.8. Ensayo 4: Lazo cerrado 1500 RPM sin carga 52

Fig. 5.9. Lazo abierto 500 RPM sin carga 54

Fig. 5.10. Lazo abierto 1000 RPM sin carga 55

Fig. 5.11. Lazo abierto 1200 RPM sin carga 56

Fig. 5.12. Lazo abierto 1500 RPM sin carga 57

Fig. 5.13. Lazo cerrado 500 RPM con carga 59

Fig. 5.14. Lazo cerrado 1000 RPM con carga 60

Fig. 5.15. Lazo cerrado 1200 RPM con carga 61

Fig. 5.16. Lazo cerrado 1500 RPM con carga 62

Fig. 5.17. Lazo abierto 500 RPM con carga 64

Fig. 5.18. Lazo abierto 1000RPM con carga 65

Fig. 5.19. Lazo abierto 1200RPM con carga 66

Fig. 5.20. Lazo abierto 1500RPM con carga 67

Fig. 5.21. Código QR de GitHub 79

Fig. 5.22. Código QR del Laboratorio 1 80

Fig. 5.23. Código QR del Laboratorio 2 80

Fig. 5.24. Prototipo 81

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Especificaciones del VFD 15

Tabla 2.2. Parámetros de configuración del VFD 15

Tabla 4.1. Asignación de pines de Arduino 24

Tabla 4.2. Voltajes Arduino y VFD 35

Tabla 4.3. Valores de resistencias 37

Tabla 4.4. Asignación de pines de acondicionador de señal 38

Tabla 4.5. Asignación de pines VFD 40

Tabla 4.6. Configuración VFD 41

Tabla 5.1. Especificaciones del Acero al Carbono [4] 45

Tabla 5.2. Lista de Materiales y Equipos 47

Tabla 5.3. Lazo cerrado - Sin Carga 53

Tabla 5.4. Lazo abierto - Sin Carga 58

Tabla 5.5. Lazo cerrado - Con Carga 63

Tabla 5.6. Lazo abierto - Con Carga 68

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1**.** Control PID 11

Ecuación 4.1**.** Modelo de la Función de Transferencia 23

Ecuación 4.2**.** Planta nominal en lazo sin retardo 23

Ecuación 4.3**.** Función de Tranferencia G(s) 29

Ecuación 4.4**.** Ecuación de la recta 36

Ecuación 4.5**.** Voltaje de salida 36

Ecuación 4.6**.** Despeje de A 36

Resumen

El control de motores trifásicos constituye un componente fundamental en la automatización de procesos industriales, debido a su eficiencia operativa y amplia aplicabilidad. La presente investigación tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema de ensayos de lazos de control, aplicado a motores trifásicos. Esta propuesta surge ante la necesidad de contar con herramientas didácticas flexibles, accesibles y de bajo costo que refuercen la formación práctica en el ámbito del control automático. La metodología contempla el desarrollo de una plataforma experimental conformada por un microcontrolador, un variador de frecuencia, un acondicionador de señal, un motor con encoder y una interfaz gráfica interactiva. Los resultados experimentales validan la funcionalidad del sistema y la implementación del predictor de Smith. Por ello, el sistema desarrollado representa una alternativa eficaz para el análisis, comprensión y enseñanza de técnicas de control aplicadas a sistemas con retardo.

Palabras clave: trifásicos, lazos, control, programación, ensayos.

Abstract

The control of three-phase motors represents a key component in the automation of industrial processes, due to its operational efficiency and broad applicability. This research aims to design and implement a test system for control loops applied to three-phase motors. The proposal arises from the need for flexible, accessible, and low-cost didactic tools that strengthen practical training in automatic control. The methodology involves the development of an experimental platform composed of a microcontroller, a frequency inverter, a signal conditioner, a motor with an encoder, and an interactive graphical interface. The experimental results validate the system's functionality and the implementation of the Smith predictor. Therefore, the proposed system constitutes an effective alternative for the analysis, understanding, and teaching of control techniques applied to time-delay systems.

Keywords: three-phase, loops, control, programming, testing.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El motor eléctrico representa un componente esencial en la ingeniería, ya que convierte de forma eficiente la energía eléctrica en energía mecánica [5]. Entre ellos, los motores trifásicos destacan por su diseño compacto, su elevado par de giro constante y su amplia aplicación en la industria [6]. Los tipos más utilizados incluyen el motor de inducción, el motor síncrono y el motor de reluctancia conmutada, cada uno con aplicaciones específicas. Estos motores se emplean en diversos sectores industriales debido a su fiabilidad, aunque pueden presentar fallas por desgaste o falta de mantenimiento. Para prevenir estos inconvenientes, se recurre a sistemas de control en lazo abierto o cerrado [7].

Los sistemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado resultan fundamentales en la operación de motores trifásicos, ya que permiten un monitoreo continuo y ajustes precisos para asegurar un funcionamiento óptimo. Estos sistemas emplean retroalimentación basada en parámetros como la velocidad, la corriente o la temperatura, a fin de calcular y aplicar correcciones en tiempo real [8].

Dichos sistemas demuestran una alta efectividad al mitigar los efectos de perturbaciones externas, manteniendo condiciones operativas estables en el motor. La implementación de sistemas de control en lazo cerrado contribuye de manera significativa a mejorar la eficiencia energética del motor y a prolongar su vida útil [9].

En este contexto, se considera necesario desarrollar un sistema de control basado en microcontrolador y variador de frecuencia que sea flexible y programable, constituyéndose en una

herramienta pedagógica eficaz. Este tipo de sistema fortalece la formación de los futuros ingenieros al brindarles una visión más clara de la dinámica industrial. Cabe destacar que las herramientas de aprendizaje disponibles en los laboratorios de máquinas eléctricas suelen ser poco flexibles y presentan costos elevados, lo cual limita su accesibilidad y funcionalidad en entornos educativos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de ensayos de lazos de control de motores trifásicos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar los sistemas de control en lazo cerrado que involucren dispositivos programables.
- Diseñar un sistema de control que permita la conexión en lazo abierto y lazo cerrado de un motor trifásico.
- Implementar un sistema de lazo abierto y lazo cerrado para someterlo a condiciones reales de trabajo.

1.3. Alcance

El sistema constará de un microcontrolador, un variador de frecuencia y un motor trifásico, por lo que será capaz de controlar sistemas en lazo abierto y lazo cerrado, así manejará varias

interfaces de conexión entre el microcontrolador y el variador de frecuencia, tales como e/s digitales, e/s analógicas y comunicación serial. Además, se realizará un conjunto de prácticas de laboratorio para demostrar el funcionamiento de interfaces y lazos de control.

1.4. Justificación

El sistema tendrá muchas funcionalidades como el diseño de interfaces y lazos, incluso servirá como material didáctico para los estudiantes de ingeniería, ya que ofrecerá una experiencia más cercana al ámbito laboral, fortaleciendo así los conocimientos de ingeniería y su aplicación.

Para la ingeniería es primordial el manejo de interfaces, los estudiantes de ingeniería en mecatrónica podrán ampliar las destrezas para los sistemas de control, fortaleciendo su formación en ingeniería y habilidades tales como programación de microcontroladores y diseño de lazos de control usando matemáticas y herramientas de software.

CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes

El diseño e implementación de sistemas de control en lazo abierto y cerrado con perturbaciones, basados en microcontroladores y variadores de frecuencia, constituye un componente fundamental de la automática en los sectores industrial, médico y doméstico. Este tipo de sistema permite regular de forma precisa el comportamiento de motores, maquinaria y procesos industriales, tanto en condiciones controladas como en entornos adversos, donde las perturbaciones externas resultan inevitables [10].

En este contexto, el uso de motores eléctricos es ampliamente reconocido en aplicaciones industriales y domésticas. La eficiencia de las operaciones puede incrementarse notablemente mediante el uso de variadores de frecuencia (VFD), lo cual genera beneficios tanto económicos como ambientales [11].

Diversos estudios destacan enfoques y tecnologías complementarias. Por ejemplo, el trabajo de [12] emplea un transistor IGBT en lugar de un variador de frecuencia, junto con una interfaz en entorno Windows que permite el ingreso manual de parámetros como amplitud y velocidad, a la vez que monitorea el torque y la velocidad del motor.

En relación con las perturbaciones, [13] señala que, al implementar sistemas de control, pueden presentarse alteraciones causadas por factores ambientales o fuerzas externas, las cuales afectan el comportamiento de la planta, generando discrepancias respecto al modelo diseñado y degradando el rendimiento del controlador.

Por otra parte, la funcionalidad de estos sistemas se ve fortalecida por el uso de sensores y

componentes de procesamiento digital, como microcontroladores. Estos dispositivos, equivalentes al sistema sensorial y cognitivo en los seres humanos, captan información del entorno y la procesan para ejecutar decisiones. Según [14], el sensor convierte magnitudes físicas como la temperatura en señales eléctricas analógicas, las cuales se someten a procesos de acondicionamiento mediante circuitos con amplificadores operacionales que realizan tareas como amplificación, conversión y filtrado.

Posteriormente, como explica [15], la señal analógica se digitaliza mediante un convertidor analógico-digital (ADC). El microcontrolador procesa esta información digital, gestionando funciones de almacenamiento, control, comunicación y visualización [11].

Asimismo, investigaciones recientes ilustran aplicaciones prácticas de estas tecnologías. En el estudio de [16], se utiliza un PLC Modicon M580, un motor de inducción trifásico y un sensor de velocidad acoplado al eje del motor. El controlador LAMDA es programado en el PLC y se conecta mediante señales analógicas al variador de frecuencia que regula el motor. Además, se incorpora un mecanismo de perturbación para evaluar el comportamiento del sistema.

De igual forma, en [17], se presenta una simulación de campo para un motor síncrono de imanes permanentes tipo BLAC, que incluye el modelado eléctrico y mecánico, así como la implementación de técnicas de modulación SVPWM mediante MATLAB/SIMULINK.

En conjunto, el diseño de sistemas de control robustos exige la integración de conocimientos teóricos y prácticos. Al aplicar herramientas como microcontroladores, sensores, variadores de frecuencia y técnicas de simulación, es posible desarrollar soluciones que optimicen la eficiencia, mejoren la confiabilidad y se adapten a las condiciones reales de operación en la industria.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Control de Lazo Abierto y Lazo Cerrado

Los sistemas de control pueden presentar una estructura de lazo abierto o de lazo cerrado, dependiendo de su diseño y finalidad. Es posible que un sistema originalmente configurado como lazo abierto sea transformado en un sistema de lazo cerrado mediante la incorporación de un lazo de retroalimentación, lo cual permite mejorar su desempeño mediante la supervisión y corrección continua de su comportamiento frente a las condiciones del entorno [1].

Un sistema de lazo abierto se caracteriza por la ausencia de retroalimentación, lo que impide conocer si la salida controlada cumple con los objetivos establecidos. Al no disponer de un mecanismo que compare la salida real con la deseada, este tipo de sistemas no puede corregir posibles desviaciones, lo que los hace vulnerables ante perturbaciones externas o variaciones en las condiciones de operación. Su esquema de funcionamiento se observa en la Fig. **2.1**.

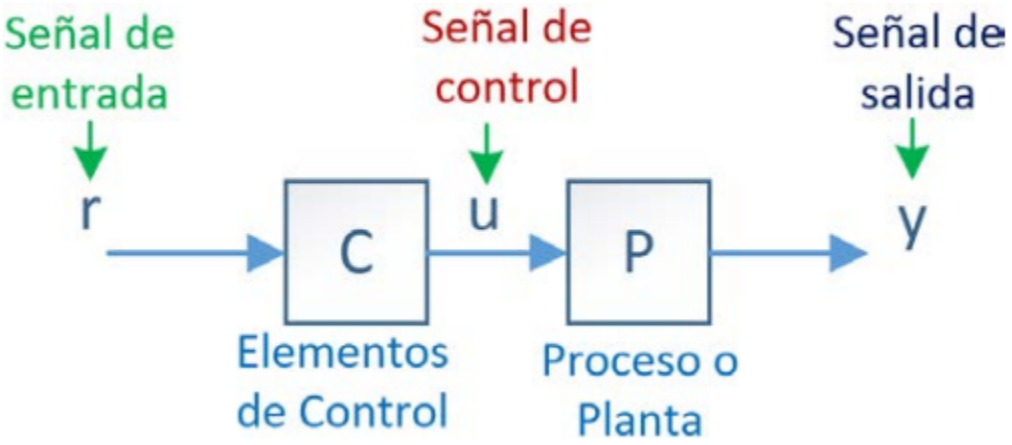


Fig. 2.1. Sistema de control de lazo abierto [1]

El control en lazo cerrado se consolida como una estrategia efectiva para mejorar tanto la estabilidad como el rendimiento de los sistemas dinámicos. Su principal ventaja radica en la capacidad de ajustar continuamente las señales de entrada, tomando como referencia el comportamiento del sistema y las perturbaciones externas. Esta retroalimentación permite que el sistema responda con mayor precisión a las condiciones cambiantes del entorno [18].

No obstante, su implementación exige un mayor nivel de complejidad, ya que requiere la incorporación de sensores y controladores digitales que aseguren un cierre exacto del lazo de control. Además, durante su diseño deben considerarse ciertos comportamientos no lineales, como el fenómeno conocido como pull-out, que puede afectar el desempeño del sistema [18].

Los sistemas de control en lazo cerrado, o sistemas retroalimentados, se caracterizan por utilizar una señal de error generada a partir de la diferencia entre la señal de entrada deseada y la señal de salida real del sistema, así como se muestra en la Fig. **2.2**. Esta señal de error es procesada por el controlador para ajustar la acción de control, con el objetivo de minimizar dicha diferencia. Mediante este mecanismo de retroalimentación, el sistema es capaz de corregir automáticamente perturbaciones externas o variaciones internas, mejorando su

estabilidad, precisión y capacidad de adaptación. Este tipo de control es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere un seguimiento continuo y exacto de una variable de referencia[19].

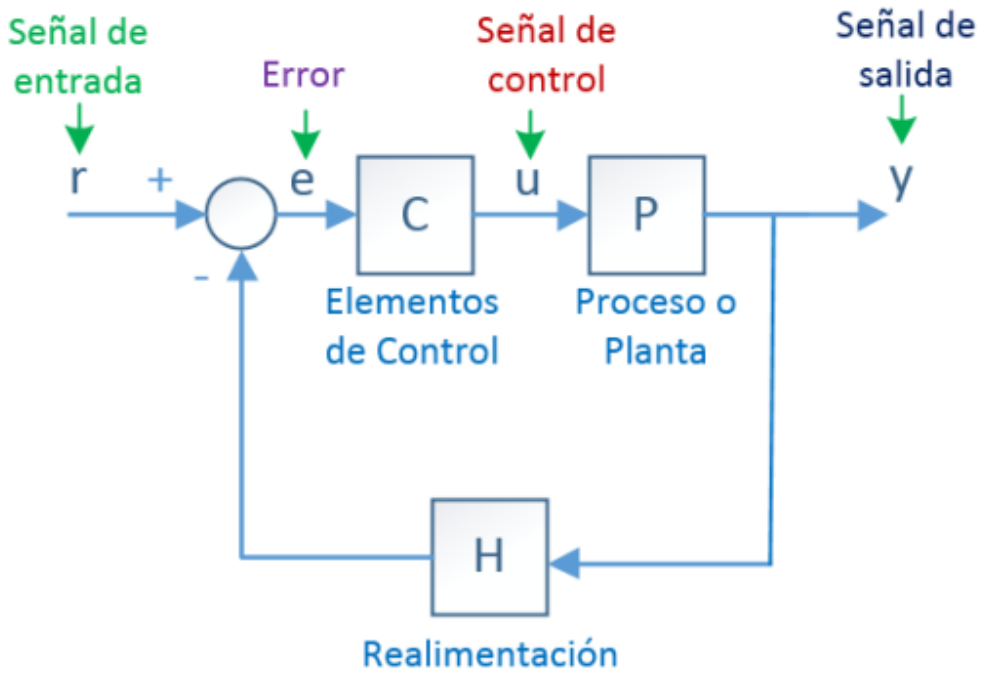


Fig. 2.2. Sistema de control de lazo cerrado [1]

Por otra parte, la automatización industrial ha experimentado avances significativos con la implementación de sistemas de control basados en microcontroladores y variadores de frecuencia, que optimizan el rendimiento de motores eléctricos trifásicos en aplicaciones como el control de velocidad y torque. Este enfoque combina la flexibilidad de los microcontroladores con la robustez de los variadores de frecuencia, lo que facilita su integración en diversos entornos industriales y educativos [20].

Existen muchas formas de realizar un sistema que controle y monitoree el funcionamiento y desempeño del motor trifásico, una de ellas es mediante una interfaz por computador usando

IGBT para alimentar el motor o también con un variador de frecuencia y un microcomputador como una Raspberry pi. Lo que cambiaría serían las interfaces y su lenguaje de programación, pero el objetivo seguirá siendo el mismo.

2.2.2. Importancia del Control de Motores con Variadores de Frecuencia

El variador de frecuencia es considerado una forma especializada de accionamiento de velocidad variable. Este tipo de tecnología también es conocida como inversor, controlador de velocidad ajustable o accionamiento para motores de corriente alterna. Su función principal es regular la velocidad del motor, lo que permite llevar a cabo diferentes tipos de operaciones y adaptarse a múltiples condiciones de trabajo [21].

En sus primeras aplicaciones, los variadores de frecuencia presentaban ciertas limitaciones, como una regulación poco estable, elevados niveles de consumo energético y una eficiencia reducida. No obstante, estos inconvenientes se han ido superando progresivamente gracias al desarrollo de la electrónica de potencia, lo que ha permitido mejorar significativamente su rendimiento y fiabilidad [21].

También se considera que el variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que ajusta la velocidad y el par de un motor eléctrico trifásico mediante el control de la frecuencia de alimentación. Estos dispositivos son cruciales en procesos donde se requiere variabilidad en la operación del motor, como en la automatización industrial, sistemas HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), y aplicaciones de robótica [22].

Además, los variadores de frecuencia pueden ser usados en distintas aplicaciones con motores de corriente alterna debido a su extensa variedad de características, ya que ofrecen protección

de fase, subtensión y sobretensión y permiten el control de los motores con velocidades ajustables y la capacidad de arranque/parada [23].

2.2.3. Controladores de Tres Términos

El diseño de un sistema seguro y productivo, depende del tipo de controlador que se use para la manipulación de los procesos que se requieren en una planta de trabajo. El controlador PID es el más eficaz, ya que busca corregir el error entre una variable del proceso y su punto de ajuste deseado; esto se debe a que el controlador PID se basa en los tres parámetros principales: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) [24].

2.2.3.1. Control Proporcional (P)

El control P mantiene una correlación lineal entre la salida del controlador o señal de accionamiento, con el error o diferencia entre la señal medida y el ajuste. Por lo que con este tipo de control se deberían establecer límites en el sistema, ya que se obtiene la ganancia del controlador K_c , que puede aumentar o disminuir la inestabilidad de la señal medida [24].

2.2.3.2. Control Integral (I)

Por otra parte, el control integral I es usado para eliminar alguna desviación existente en el sistema. Este tipo de control actúa solo cuando se requiere permanecer en un rango de control de ajuste fino. Por ello, el control I correlaciona la salida del controlador con la integral del error [24].

2.2.3.3. Control Derivativo (D)

Finalmente, un control derivativo (D) busca anticipar las condiciones del proceso mediante el análisis de la variación del error y conseguir la forma de minimizar dicha variación. Por ello se dice que, a mayor variación del error, la respuesta del controlador debe ser más pronunciada. Además, este controlador debe ser combinado con controladores P, I o PI para lograr un correcto manejo de los sistemas [24].

2.2.3.4. Control proporcional - integral y derivativo (PID)

Un control PID tiene correlación entre la salida del controlador con el error, y con la integral y derivada de este. Este comportamiento se obtiene mediante la ecuación 2.1,

$$c(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)\, dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + C, \tag{2.1}$$

donde c(t) es la salida del controlador, e(t) es el error, T_i es el tiempo integral, T_d constante de tiempo derivada, C es el valor inicial del controlador y K_c es la ganancia del controlador.

El control PID integra las acciones proporcional, integral y derivativa en una sola expresión. En este tipo de control, la ganancia K_c influye no solo en la respuesta proporcional, sino también en los efectos integral y derivativo, amplificando así el impacto de cada componente sobre la salida del sistema. No obstante, debido a que la acción derivativa es sensible al ruido, el controlador PID no es adecuado para procesos con alta interferencia, ya que el ruido puede distorsionar su función predictiva. Aun así, este tipo de control es ampliamente utilizado en sistemas que no requieren una compensación compleja y que buscan una respuesta ágil y eficiente [24].

2.2.4. Control de Sistemas Retardados

El retardo es una característica inherente a los sistemas dinámicos y, aunque en determinadas situaciones su efecto puede ser insignificante, en otras influye de forma considerable sobre el comportamiento del sistema. Su presencia puede deberse a las propiedades internas del proceso, como los tiempos asociados al transporte de energía o masa, o a factores externos que afectan la operación del sistema [2].

La importancia del retardo radica en su relación con la constante de tiempo del sistema. Cuando el retardo es relativamente pequeño, es posible simplificar su tratamiento mediante aproximaciones durante el diseño del controlador. Sin embargo, si el retardo es significativo, se requieren estrategias de compensación más precisas, como lo es el predictor de Smith (PS) se presenta como una solución eficaz, ya que permite anticipar el efecto del retardo y mejorar la respuesta del sistema sin comprometer su estabilidad [2].

El predictor de Smith (PS) permite aislar el efecto del retardo en el diseño del controlador, lo que facilita una respuesta más precisa y eficiente del sistema. Esta técnica destaca por su simplicidad en la implementación y por su alta efectividad, razón por la cual se considera una de las estrategias más empleadas para compensar el tiempo muerto en sistemas con retardo. No obstante, su aplicación presenta limitaciones, ya que requiere que la planta sea estable y muestra baja robustez ante posibles incertidumbres en el modelo del sistema [25]. En la Fig. **2.3** se observa el esquema básico del predictor Smith, donde G(s) hace referencia al proceso y e^{-st} es la función de transferencia vinculada al retardo [26].

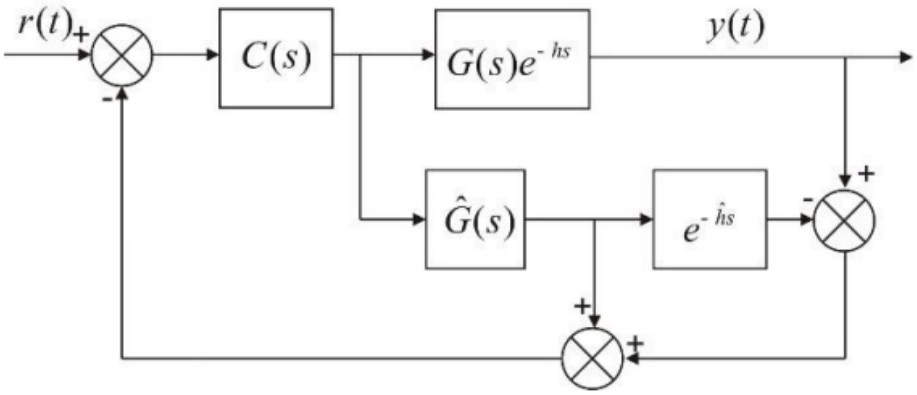


Fig. 2.3. Esquema básico del predictor Smith [2]

El predictor de Smith se considera una de las primeras estructuras diseñadas para compensar el tiempo muerto en sistemas de una sola entrada y una sola salida. Su principal objetivo es mejorar el desempeño de controladores de tipo PI o PID en aquellos procesos que presentan tiempos muertos significativos, permitiendo una respuesta más estable y eficiente del sistema [27].

Sin embargo, existe el predictor de Smith filtrado, que representa una evolución de la estructura clásica del predictor de Smith, diseñada para superar sus principales limitaciones. Esta variante incorpora características que permiten considerar la robustez del sistema en el diseño del controlador, mejorando significativamente la capacidad de rechazo a perturbaciones y logrando un desacoplamiento más efectivo entre el punto de ajuste y la respuesta ante perturbaciones externas. Esta estructura aborda las deficiencias del enfoque convencional y puede aplicarse tanto en plantas estables como inestables o con comportamiento integrado [28].

2.2.5. Variador de Frecuencia

En los motores de corriente alterna asíncronos, la rapidez de rotación se establece por la frecuencia de la red eléctrica, no por la tensión de suministro. Para regular esta velocidad, se emplean los variadores de frecuencia, cuyo objetivo primordial es ajustar la frecuencia de la corriente proporcionada al motor. Estos dispositivos se componen de tres fases esenciales:

- Un convertidor, que transforma la corriente alterna en corriente continua.
- Un circuito intermedio, que filtra y regula la corriente continua a través de inductancias y condensadores, contribuyendo también a disminuir las alteraciones armónicas.
- Un inversor, que transforma la corriente de nuevo en alterna, aunque con una frecuencia fluctuante. Durante esta fase, se utilizan transistores IGBT para producir señales exactas.

A todo esto se añade un circuito de control, cuya función es administrar el funcionamiento del variador, monitorear parámetros eléctricos (como la corriente, la tensión o la temperatura) y simplificar la interacción del usuario a través de interfaces simples.

Los variadores de frecuencia más utilizados son los de tipo PWM (Modulación por Ancho de Pulso), conocidos por su eficiencia y fiabilidad. Estos equipos no solo permiten ajustar la velocidad de los motores con precisión, sino que también mejoran el factor de potencia y evitan sobrecargas durante los arranques. Además, los variadores pueden integrarse fácilmente con otros sistemas de automatización, como PLCs, siempre que se respeten medidas como el aislamiento galvánico para proteger los dispositivos electrónicos[29].

Es decir, que el variador de frecuencia es un equipo robusto y eficiente, en la Tabla **2.1** se visualizan sus especificaciones, y en la Tabla **2.2** los parámetros de configuración del VFD, este equipo está diseñado para controlar motores trifásicos mediante la regulación de

frecuencia y voltaje aplicados al motor. Este modelo soporta métodos de control escalar y vectorial, así como comunicación Modbus RS-485, características que permiten su uso con microcontroladores para ajustar dinámicamente los parámetros operativos [30].

Tabla 2.1. Especificaciones del VFD

Característica	Denominación
Rango de potencia	1.5kW
Frecuencia de salida	0.1 - 600 Hz
Interfaces de control	Entradas digitales, análogas y seriales

Tabla 2.2. Parámetros de configuración del VFD

Característica	Denominación
Tipo de entrada de control	Digital o Analógica
Frecuencia base del motor	Hz
Límites de frecuencia mínima y máxima	entre 0,1 - 599Hz
Rampas de aceleración y desaceleración	–

2.2.6. Motor Trifásico

Los motores de corriente alterna asíncronos se utilizan de forma generalizada en aplicaciones industriales y domésticas, principalmente por su facilidad de uso, bajo costo y escaso requerimiento de mantenimiento. Su funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético giratorio generado en el estator y las corrientes inducidas en el rotor como resultado de dicho campo.

En particular, los motores trifásicos cuentan con un sistema de bobinado inductor dispuesto en el estator, compuesto por tres devanados independientes, distribuidos espacialmente a 120 grados eléctricos entre sí. Estos devanados se alimentan mediante un sistema trifásico de corriente alterna, lo que permite generar un campo magnético giratorio que induce el movimiento en el rotor [3]. En la Fig. **2.4** y **2.5** se observa la conexión en estrella y delta. La conexión estrella la intensidad que recorre cada fase coincide con la intensidad de línea, y la tensión aplicada a cada fase es $\sqrt{3}$ menor que la tensión de línea. Mientras que en delta, la intensidad que recorre cada fase es $\sqrt{3}$ menor que la intensidad de línea.

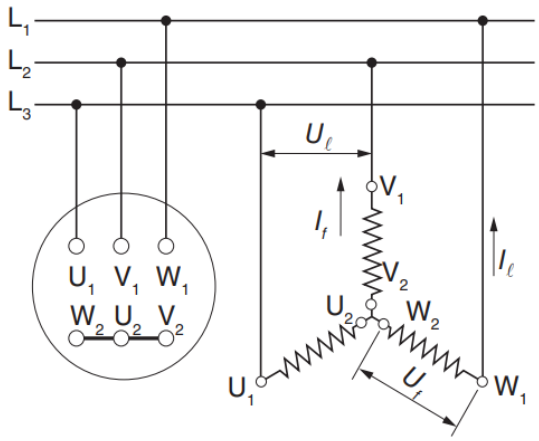


Fig. 2.4. Conexión en Estrella [3]

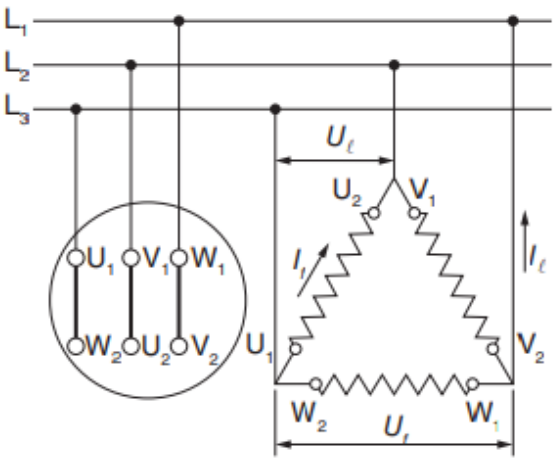


Fig. 2.5. Conexión en Delta [3]

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el desarrollo del sistema de ensayos de lazos de control de motores trifásicos, utilizando sistemas de control en lazo abierto y cerrado. Se detallan los pasos considerados para alcanzar el diseño e implementación del sistema propuesto.

3.1. Modelo de la Investigación

Este trabajo se clasifica como investigación aplicada, ya que tiene como propósito resolver un problema específico en un contexto técnico: la interconexión eficiente entre microcontroladores y variadores de frecuencia. La investigación se orienta a la aplicación práctica de conocimientos provenientes de electrónica, automatización y control, buscando satisfacer necesidades en la gestión de motores eléctricos y control automatizado.

La investigación también es descriptiva, dado que se analizan y detallan las características técnicas de los componentes involucrados, como microcontroladores, variadores de frecuencia y sistemas de control en lazo abierto y cerrado.

Adicionalmente, se trata de una investigación documental, ya que se basa en la recopilación de información relevante a partir de fuentes académicas y técnicas. El análisis de datos provenientes de manuales de equipos, normas técnicas y artículos científicos proporciona una base sólida para el desarrollo del sistema.

Finalmente, la investigación incluye un componente experimental, puesto que se llevarán a cabo ensayos para verificar el funcionamiento de la interconexión entre el microcontrolador

y el variador de frecuencia. El trabajo implicará la ejecución de pruebas bajo distintas configuraciones, en lazo abierto y cerrado, con el fin de evaluar el rendimiento del sistema y realizar ajustes cuando sea necesario.

3.2. Diseño de la Investigación

A continuación, se describen las fases y actividades desarrolladas para implementar el sistema de ensayos con interconexión entre el microcontrolador y el variador de frecuencia, utilizando sistemas de control en lazo abierto y cerrado. Las actividades se ajustan a las especificaciones del cronograma.

3.2.1. Fase 1: Interconexión entre Microcontrolador y Variador de Frecuencia

En esta fase se establece la comunicación entre el microcontrolador y el variador de frecuencia.

- **Actividad 1.1: Conexión física y lógica del microcontrolador y el variador de frecuencia.**
- **Actividad 1.2: Configuración de los parámetros necesarios,** para que el microcontrolador envíe las señales al variador.

3.2.2. Fase 2: Control en Lazo Cerrado de Motores Trifásicos

Se desarrollan los controles en lazo cerrado para optimizar la respuesta del motor trifásico frente a perturbaciones externas.

- **Actividad 2.1: Programación del microcontrolador,** es necesaria para establecer el control en lazo cerrado.

- **Actividad 2.2: Configuración del sistema,** se realizará ajustes para dar retroalimentación al motor y ajustar los parámetros de control.
- **Actividad 2.3: Pruebas iniciales del control en lazo cerrado,** se desarrolla una evaluación del sistema para validar la estabilidad y respuesta ante distintos escenarios.

3.2.3. Fase 3: Identificación de Variables de Control

Se identifican las variables clave que afectarán el desempeño del sistema, como la velocidad, torque y frecuencia, fundamentales para la operación en lazo abierto y cerrado.

- **Actividad 3.1: Definición de variables de control relevantes,** permite el estudio de parámetros críticos del sistema de control.
- **Actividad 3.2: Análisis de sensibilidad de las variables seleccionadas,** se encarga de la identificación de como los cambios en las variables afectan el desempeño del motor.

3.2.4. Fase 4: Diseño de la Guía de Ensayos

Se crea una guía detallada de procedimientos experimentales para estandarizar las pruebas.

- **Actividad 4.1: Redacción de la guía con diferentes interfaces de comunicación,** es la descripción de procedimientos específicos y configuración de la comunicación entre microcontrolador y variador de frecuencia.
- **Actividad 4.2: Verificación de protocolos de ensayo,** se encarga de asegurarse que la guía complete todas las situaciones posibles de prueba.

3.2.5. Fase 5: Implementación del Sistema de Control

En esta fase, se integran los sistemas de control en lazo abierto y cerrado, y se prueba su rendimiento en condiciones reales.

- **Actividad 5.1: Implementación del sistema de control en lazo abierto y cerrado,** se refiere a la instalación y puesta en marcha del sistema en condiciones de trabajo

3.2.6. Fase 6: Pruebas y Análisis de Resultados

Finalmente, se realizan pruebas exhaustivas para evaluar el funcionamiento del sistema bajo diferentes condiciones.

- **Actividad 6.1: Pruebas de funcionamiento en condiciones controladas,** es la evaluación del comportamiento del sistema para validar su precisión.
- **Actividad 6.2: Ajustes y optimización del sistema,** se realizarán las respectivas modificaciones y ajustes basados en los resultados obtenidos durante las pruebas bajo condiciones reales.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO

4.1. Especificaciones del Sistema

El desarrollo de un sistema de ensayos de lazos de control de motores trifásicos se implementa con base en el diagrama de la Fig. **4.1**.

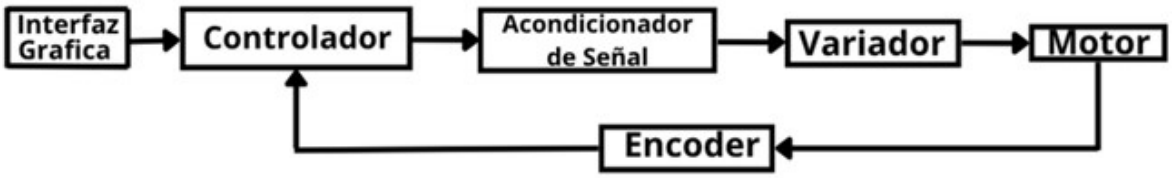


Fig. 4.1. Diagrama de desarrollo

4.2. Controlador

En el "Sistema de Ensayos de Lazos de Control de Motores Trifásicos", la presencia de un retardo muerto puede afectar drásticamente la estabilidad y el rendimiento del controlador, hacer el uso de un "Predictor de Smith" resulta fundamental. Este esquema compensa el efecto del retardo estimando la salida futura del sistema a partir de un modelo interno, permitiendo que el controlador actúe sobre una versión virtual sin retardo de la planta. En el microcontrolador Arduino Mega, es posible implementar un Predictor Smith discreto junto con el modelo matemático de la planta obtenido mediante "Systems Identification" de Matlab como se visualiza en la Fig. **4.2** [31].

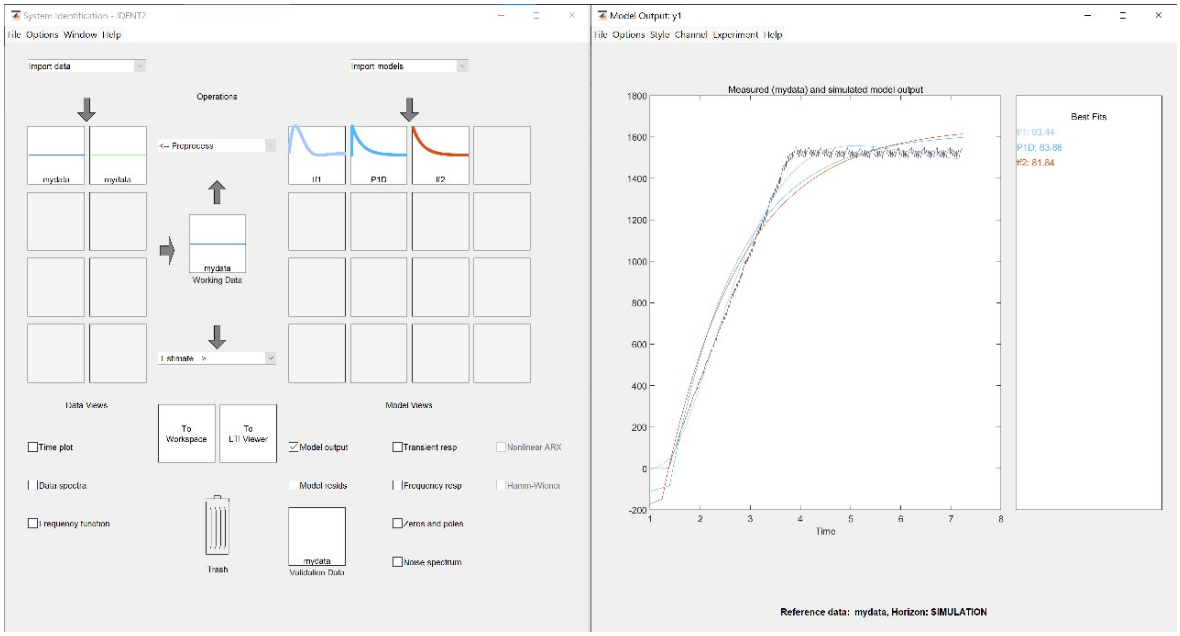


Fig. 4.2. Identificación del Sistema

La implementación del Predictor Smith en un sistema basado en Arduino Mega 2560 permite mejorar el tiempo de respuesta y reducir el sobre impulso del sistema controlado, incluso en presencia de retardos importantes. Sumado a la flexibilidad del entorno de desarrollo y la amplia compatibilidad con bibliotecas externas, este microcontrolador es una solución adecuada y cómoda económicamente, tanto para aplicaciones académicas como industriales.

La combinación de herramientas de simulación, control predictivo y monitoreo visual mediante interfaces gráficas convierte al Mega 2560 en una excelente elección para prototipos avanzados y proyectos de automatización integrados [31, 32]

4.2.1. Diseño del Controlador

Se analiza la función de transferencia obtenida para caracterizar la dinámica de la planta, evaluando su respuesta al escalón, sus polos y su margen de fase y ganancia. Enseguida, se establece las especificaciones de desempeño requeridas, tales como tiempo de asentamiento,

sobre impulso máximo y rechazo a perturbaciones. Una vez validado el modelo, se separa el retardo muerto de la parte dinámica invertible. Donde,

$$G(s) = G_n(s)e^{-T_d s}, \tag{4.1}$$

por lo tanto,

$$G_n(s) = \frac{K_p}{(1 + T_{p1}s)}, \tag{4.2}$$

con C(s) definido, se construye el Predictor de Smith, integrando un bloque del modelo inverso 1/$G_n(s)$ y el retardo muerto en lazo interno, de forma que la acción de control se alimente de un error corregido, libre del desfase introducido por el retardo. El esquema resultante consiste en dos ramas:

- Compara la salida real y la salida modelo retardada
- C(s) sobre la referencia menos la salida modelo sin retardo.

Al implementar el esquema en tiempo discreto sobre la plataforma de control, se convierte C(s) a C(z), y se ajusta la rutina de predicción para calcular en cada instante la respuesta del modelo interno. Además, se efectúa pruebas de sensibilidad variando la ganancia del lazo y el retardo, así se evalúa la robustez del controlador frente a incertidumbres del modelo. Tras verificar el cumplimiento de los criterios tiempo de asentamiento, rechazo a perturbaciones y margen de estabilidad se implementa el controlador en la plataforma de control (Arduino Mega 2560), este se encargará de monitorear las señales en tiempo real y refinando los parámetros de forma iterativa hasta alcanzar el desempeño deseado.

4.2.1.1. Conexiones del Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560, un chip de 8 bits con arquitectura RISC que opera a 16MHz. Esta placa destaca por su gran cantidad de pines, cuenta con 256KB de memoria Flash, 8KB de SRAM y 4KB de EEPROM, lo que proporciona un amplio margen para implementar algoritmos de control, filtros digitales y rutinas de comunicación sin comprometer la estabilidad del sistema. En la Fig. **4.3** se visualiza las conexiones del Arduino Mega y en la Tabla **4.1** se observan la asignación de pines.

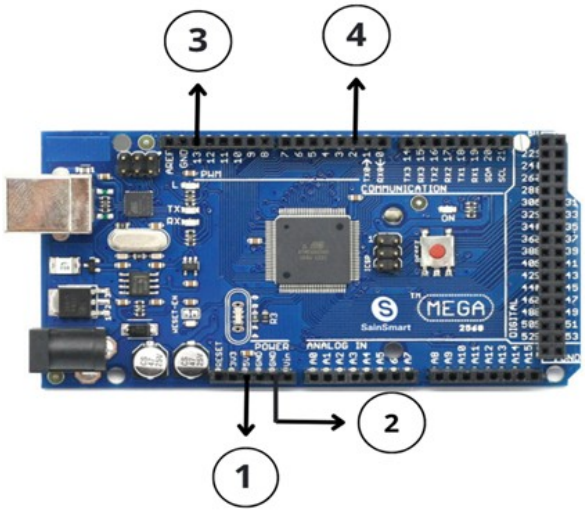


Fig. 4.3. Conexión Arduino Mega 2560

Tabla 4.1. Asignación de pines de Arduino

Número	Detalle
1	Pin 5V - Voltaje de salida positivo encoder
2	Pin GND - Voltaje de salida pin negativo
3	Pin 13 - Salida PWM acondicionador
4	Pin 2 - Entrada digital encoder

Todos los pines negativos deben estar interconectados debido a que actúan como punto de referencia cero voltios para todas las señales del circuito, si los GND no están conectados entre sí, cada módulo puede tener una referencia diferente, lo que causa errores de lectura, mal funcionamiento o incluso daños.

La programación del sistema de ensayos de lazos de control se muestra en el Anexo A.

4.2.1.2. Software de programación

Para el desarrollo de la programación, su código es escrito en el software Arduino IDE (Integrated Development Environment), ya que es un software de acceso gratuito y puede ser usado en cualquier ordenador, además es compatible con las placas Arduino [33].

En el programa, Arduino recibe la información desde el encoder, la procesa y envía una señal PWM hacia el acondicionador de señal. Posterior a ello, el VFD recibe esta señal y la envía hacia el motor, para finalmente visualizar las gráficas en la interfaz de Python. Para cumplir con el sistema de ensayos, la programación contiene el cálculo de las RPM (revoluciones por minuto), la aplicación del Filtro IIR y predictor Smith. En el Anexo A, se indica el código QR hacia GitHub, para visualizar los códigos desarrollados del sistema de ensayos de control.

4.2.2. Identificación de la Planta

4.2.2.1. Recolección de datos

Para excitar la planta se utiliza la salida máxima del Arduino mega 2560 (5 V), esta señal PWM se conecta en la entrada del acondicionador de señal indicado en la Fig. **4.14** y su salida al variador de frecuencia esto representa nuestra entrada u(k) esto provoca que el motor gire

a la velocidad máxima (1610 RPM a 60Hz). En la Fig. **4.4** se indica la gráfica obtenida de la respuesta del motor.

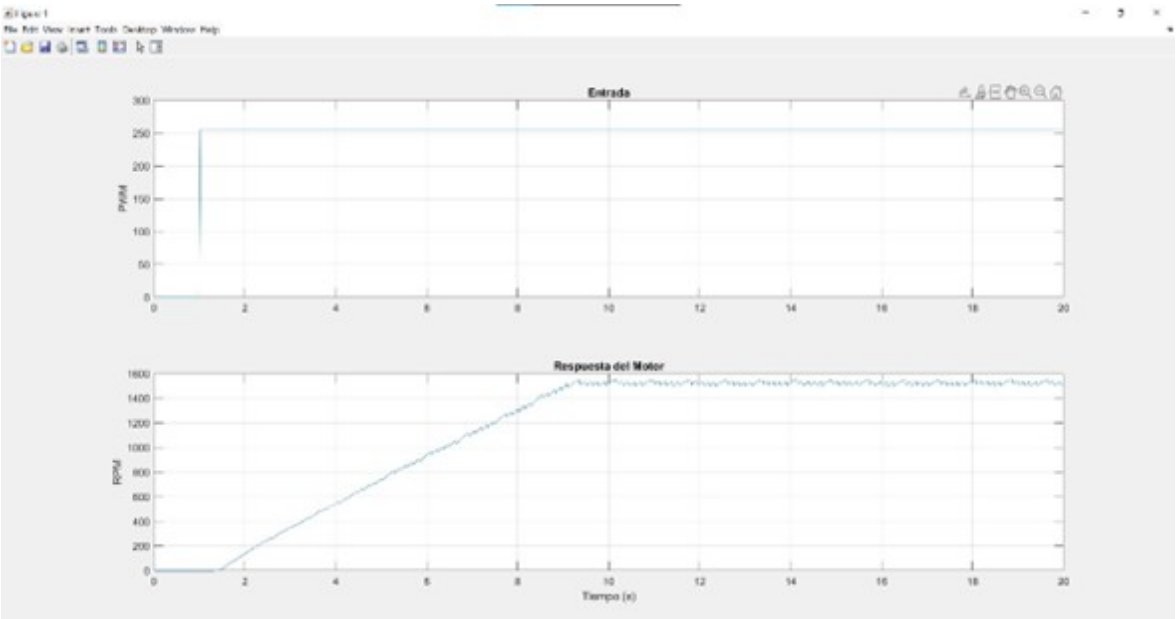


Fig. 4.4. Respuesta del motor

4.2.2.2. Curva característica del motor

Es necesario registrar la salida y(k) con un muestreo uniforme T_s=5 milisegundos. Posteriormente, exportar a MATLAB los vectores de tiempo t, la señal de entrada u(k) y la señal de salida y(k). En la Fig. **??** se observa la curva característica del motor.

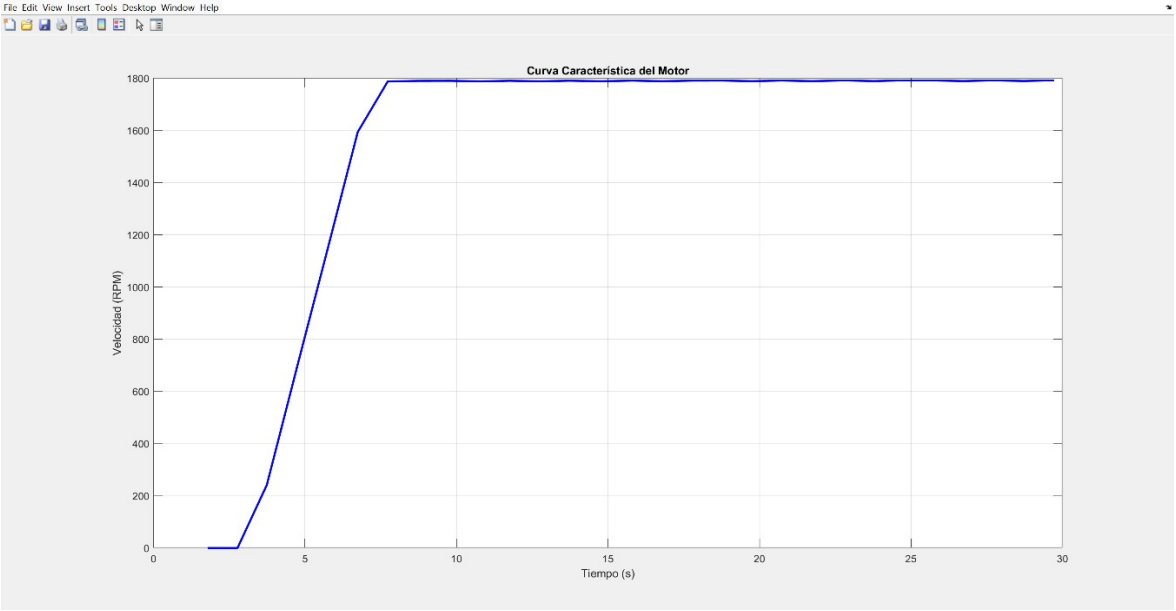


Fig. 4.5. Curva Característica del Motor

4.2.2.3. Herramienta de Identificación del Sistema

En la ventana de comandos de MATLAB se coloca el comando “system identification”, se abrirá la ventana de la Fig. **4.6**.

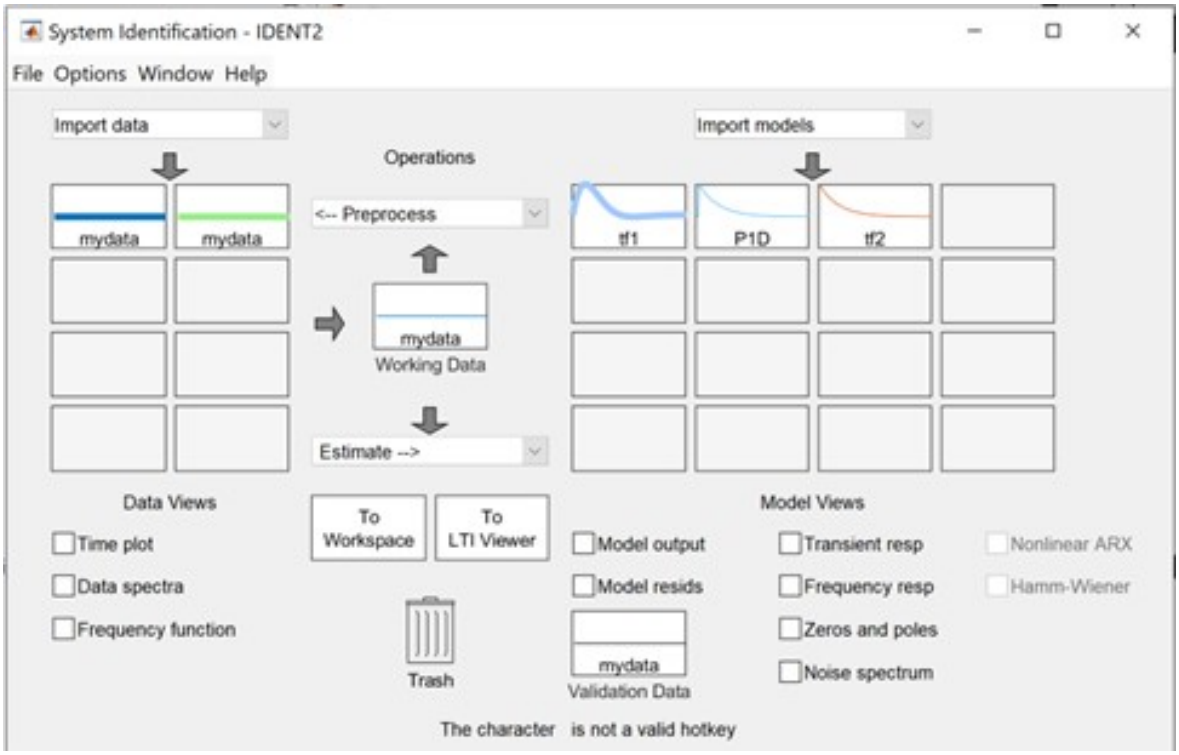


Fig. 4.6. Ventana de Identificación de Sistema

Posteriormente, se importan los vectores PWM y RPM para obtener una gráfica como la de la Fig. **4.7** que indica el porcentaje del mejor ajuste de planta.

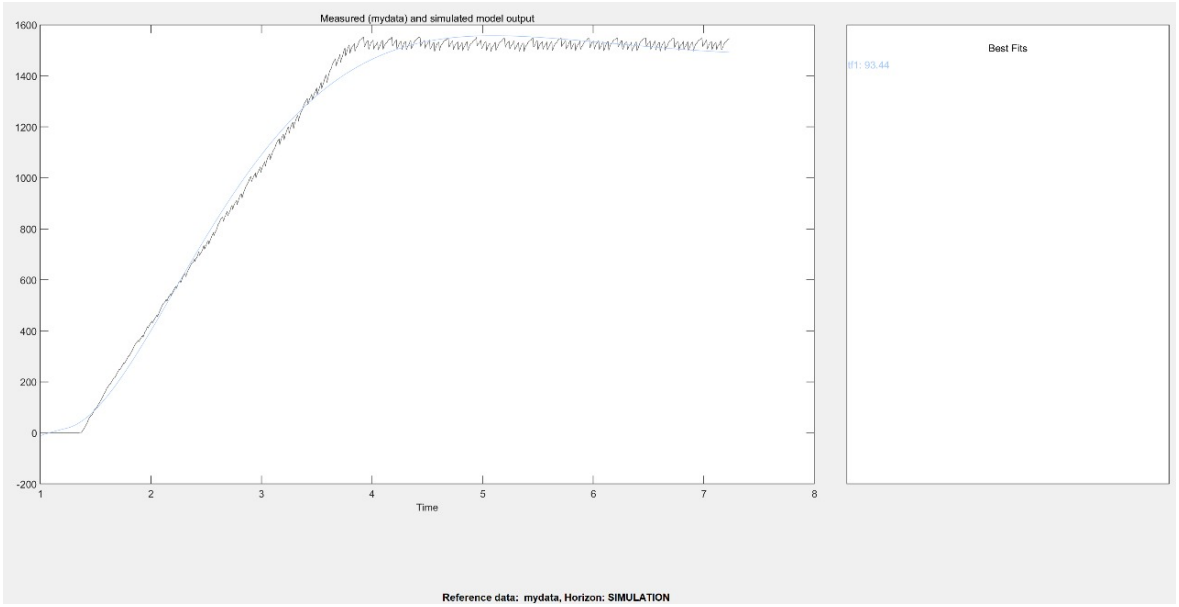


Fig. 4.7. Simulación

Obtenido el porcentaje para el ajuste de la planta, se estima la función de transferencia completando los campos de la ventana que se muestra en la Fig. **4.8**.

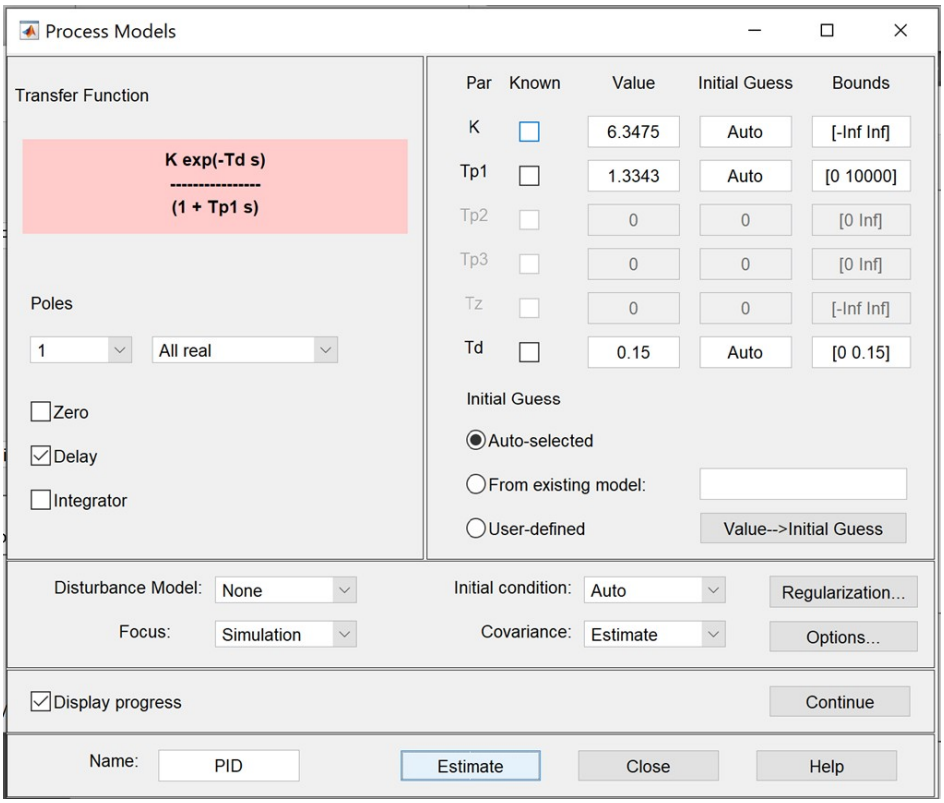


Fig. 4.8. Estimación de la Función de Transferencia

Por otra parte, es necesario ajustar los valores de K_p,T_{p1} y T_d para minimizar el error de predicción y ajustarse hasta alcanzar el porcentaje de 93.44 %. Considerando la ecuación,

$$G(s) = \frac{K_p}{(1 + T_{p1}s)^{-T_d s}}, \tag{4.3}$$

donde,$K_p = 6,3475$ es la ganancia estática, $T_{p1} = 1,3343$ es la constante de tiempo del primer polo y $T_d = 0,15$ el tiempo muerto.

El numerador constante (6.988) corresponde a la ganancia global del sistema, mientras que los coeficientes del denominador determinan dos polos reales que definen la velocidad de respuesta y la amortiguación del proceso. Esta expresión indica que el modelo tiene dos polos,

ningún cero y tres coeficientes libres a estimar. Para acceder a sus valores y a la incertidumbre asociada.

4.2.3. Calibración y Configuración de Control

La calibración y configuración del sistema de control debe considerar los siguientes aspectos:

- Efectuar una calibración inicial mediante adquisición de datos de respuesta del motor sin carga y con carga nominal, para caracterizar la dinámica del sistema.
- Ajustar el sistema de control con herramientas como PID o compensadores avanzados (p. ej. Smith Predictor), según el modelo identificado.
- Realizar la validación del lazo cerrado mediante pruebas de escalón, seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones, con visualización en tiempo real de variables críticas como velocidad, corriente y torque.

4.2.4. Modos de operación

El sistema de ensayos consta de dos modos de operación establecidos, lazo abierto y lazo cerrado.

4.2.4.1. Lazo Abierto

El modo operativo del sistema de control de lazo abierto, se encarga del monitoreo de las RPM que se visualizan en la interfaz gráfica. En la Fig. **4.9** se observa el diagrama de bloques, mientras que en la Fig. **4.10** se puede observar la gráfica obtenida en el ensayo del sistema de control de lazo abierto.

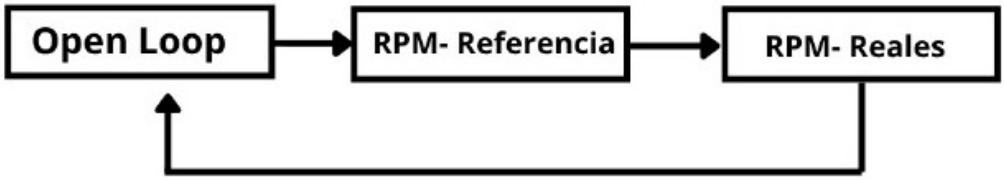


Fig. 4.9. Diagrama de Bloques Lazo Abierto



Fig. 4.10. Ensayo de Lazo Abierto

4.2.4.2. Lazo Cerrado

El modo operativo del sistema de control de lazo cerrado, se encarga del monitoreo de las RPM y de establecer un ajuste para compensar esta velocidad ante una caída por someter al motor a una carga. En la Fig. **4.11** se observa el diagrama de bloques, mientras que en la Fig. **4.12** se observa la gráfica obtenida en el ensayo del sistema de control de lazo cerrado.



Fig. 4.11. Diagrama de Bloques de Lazo Cerrado

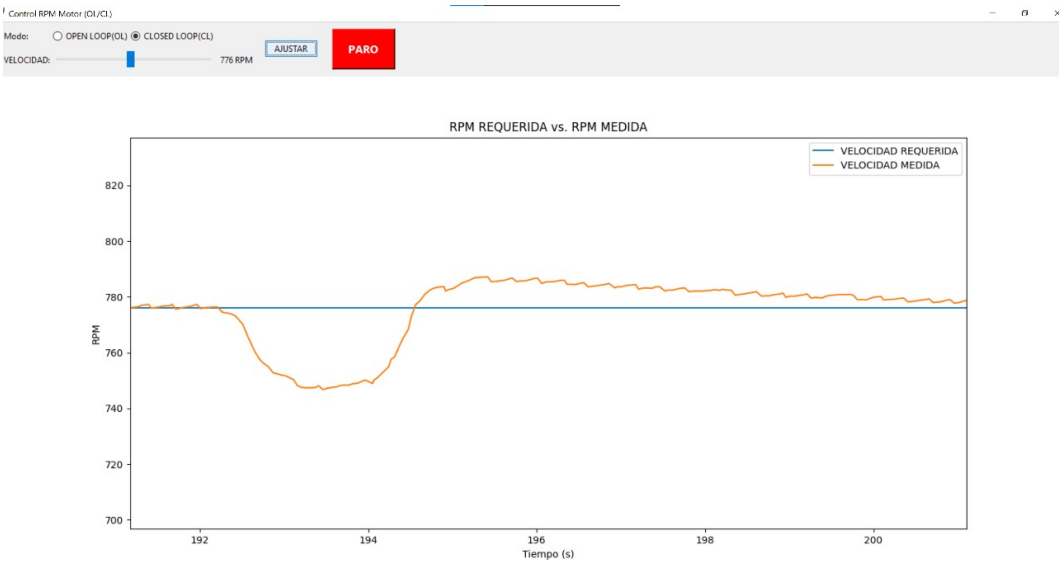


Fig. 4.12. Ensayo de Lazo Cerrado

4.3. Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica permite al operador determinar el modo de funcionamiento, lazo abierto o lazo cerrado a través de botones de modo de funcionamiento (1), visualizados en la Fig. **4.13**. También permite ajustar el valor de referencia de las RPM mediante un slider de velocidad (2), junto a este control se encuentra una etiqueta numérica que muestra de modo inmediato la velocidad seleccionada, lo cual facilita la verificación previa al envío. Por otro lado, en el lado derecho de la interfaz se ubican dos botones denominados AJUSTAR (3) que envía

al Arduino el modo de funcionamiento y la referencia de RPM, y un botón de emergencia denominado PARO (4), este es de color rojo, y su activación instantánea envía la consigna de 0 RPM en lazo cerrado para detener el motor de forma inmediata.

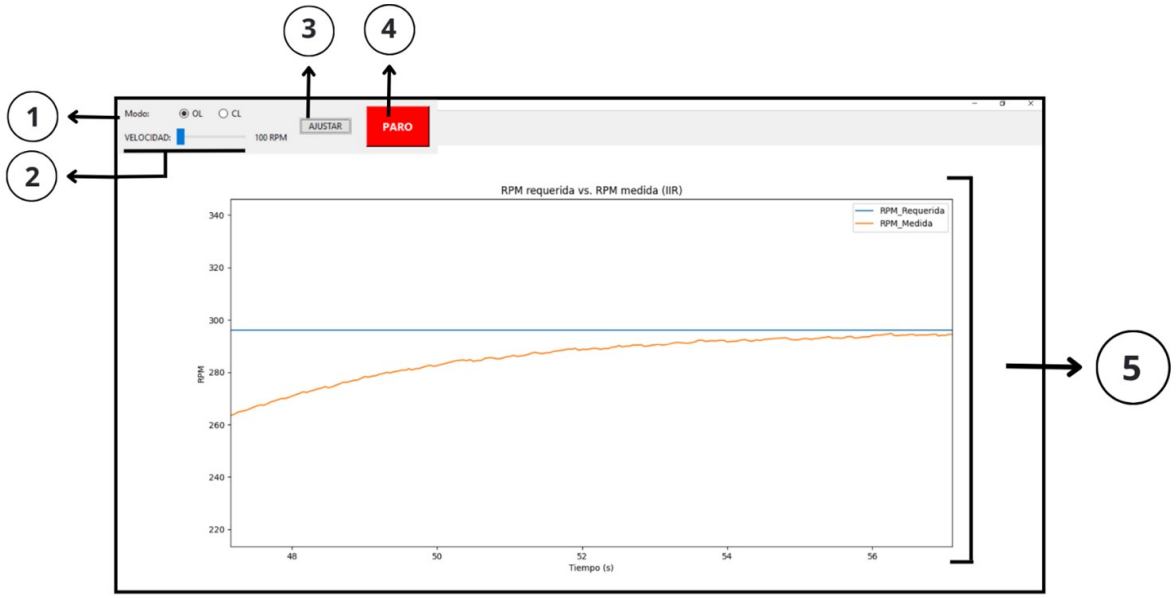


Fig. 4.13. Interfaz gráfica

En la mitad inferior de la interfaz se presenta un gráfico en tiempo real elaborado con "Matplotlib" (biblioteca de visualización de datos en Python que permite crear gráficos estáticos, interactivos y animados) [34], donde se presentan simultáneamente las curvas de velocidad requerida y de velocidad medida.

El diseño de la interfaz amigable sigue criterios de ergonomía y usabilidad reconocidos en la literatura de interacción hombre–máquina, procurando una disposición lógica, alertas visuales destacadas y retroalimentación inmediata ante acciones críticas. Se aplican principios de coherencia, visibilidad del estado del sistema y prevención de errores, tal como recomiendan Shneiderman y Plaisant en su obra sobre diseños efectivos de interfaz gráfica [35]. Este entorno resulta idóneo para experimentación académica y validación de estrategias de control automático en tiempo real, integrando hardware y software de forma fluida y confiable [36].

La interfaz en Python se encarga de extraer los datos del Arduino para generar la gráfica de las RPM de referencia y RPM medidas.

4.4. Acondicionador de señal

El acondicionador de señal es un circuito que está diseñado para tomar una señal analógica proveniente de un microcontrolador en este caso, una salida del Arduino Mega 2560 de 0V a 5V y adaptarla a un nivel superior de tensión (10V) a través de etapas de ganancia controlada. Esta arquitectura se implementa utilizando amplificadores operacionales LM741, ampliamente conocidos por su estabilidad y facilidad de uso en aplicaciones de bajo consumo y propósitos generales. El circuito de la Fig. **4.14** está alimentado por fuentes simétricas de $\pm 12V$, esencial para permitir tanto el manejo de señales positivas como negativas en el dominio analógico.

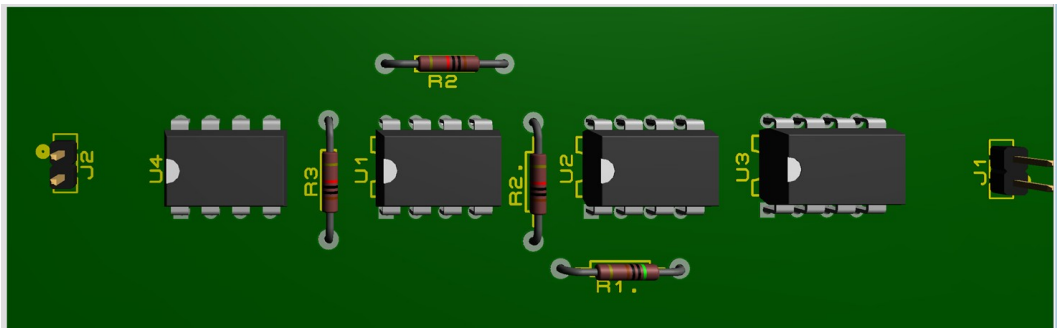


Fig. 4.14. Acondicionador de señal

La primera etapa consiste en un seguidor de tensión (buffer) configurado con un amplificador operacional LM741 (U4) que entrega una réplica exacta de la entrada sin carga adicional, lo que protege la señal de control del Arduino ante posibles variaciones de impedancia.

Después la señal pasa por dos etapas amplificadoras en cascada, la primera (U1) posee una

ganancia determinada por el cociente de dos resistencias R2 y R1, elevando la señal de 5V a 7.5V; la segunda etapa (U2), con resistencias de igual valor, amplifica nuevamente manteniendo la relación lineal, hasta alcanzar un nivel de salida aproximado de 10V.

Estas etapas en serie permiten una ganancia precisa sin sobrecargar ningún amplificador operacional, mejorando la estabilidad y reduciendo el riesgo de oscilaciones o saturación.

La etapa final (U3) es un seguidor de tensión que entrega la señal amplificada a una carga externa con una impedancia de salida muy baja, característica propia de este tipo de configuración. Este diseño resulta adecuado para aplicaciones en las que se necesita escalar y acondicionar la señal de un sistema embebido antes de enviarla a módulos de potencia o etapas de instrumentación más exigentes.

4.4.1. Cálculos de Acondicionamiento

El acondicionamiento de señal es necesario debido a que el VFD trabaja a 10V y el microcontrolador Arduino Mega2560 tiene una salida de 5V. Por lo que, se realizan los siguientes cálculos para obtener los valores de resistencias necesarias para el funcionamiento del acondicionador. En la Tabla **4.2** se observa el voltaje de salida de Arduino y el voltaje de entrada deseado para el VFD.

Tabla 4.2. Voltajes Arduino y VFD

V_{out} **(Arduino)**	V_{in} **Deseado (VFD)**
0V	0V
5V	10V

Se obtiene el esquema de acondicionamiento haciendo uso de amplificadores operacionales

LM741CN debido a su accesibilidad en el mercado. En la Fig. **4.15** se visualiza el esquema base para conseguir los valores de R1, R2 y R3.

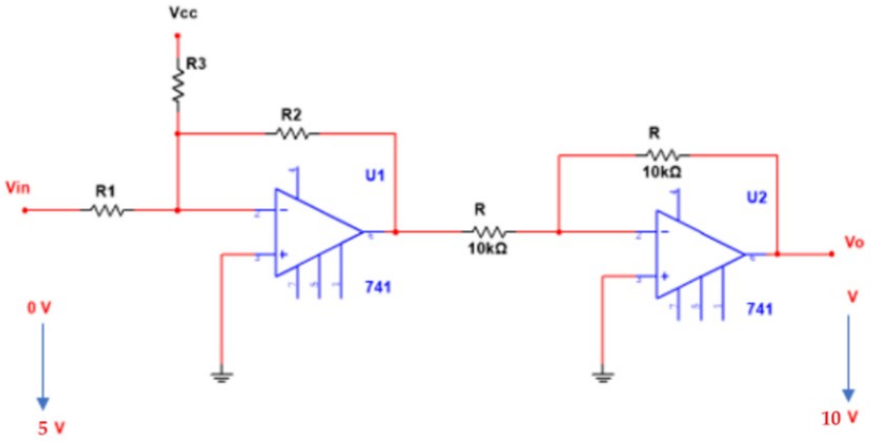


Fig. 4.15. Esquema acondicionador de señal

Considerando la ecuación 4.1, y un valor A=2. Además, asumiendo R_2=10kΩ, se tiene,

$$V_o = A\, V_{in} + B\ , \tag{4.4}$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1}\, V_{in} + \frac{R_2}{R_3}\, V_{cc}, \tag{4.5}$$

$$A = \frac{R_2}{R_1}. \tag{4.6}$$

Posteriormente, se obtiene los valores de las resistencias indicados en la Tabla **4.3**, considerando una alimentación de $\pm 12V$:

Tabla 4.3. Valores de resistencias

Resistencias
R_1=5kΩ
R_2=10kΩ
R_3=$\infty(omitido)$
R=10kΩ

4.4.2. Conexiones del acondicionador de señal

Considerando lo obtenido en la Tabla **4.3**, se desarrolló el acondicionador de señal con base en el circuito completo desarrollado en Proteus en la Fig. **4.16**.

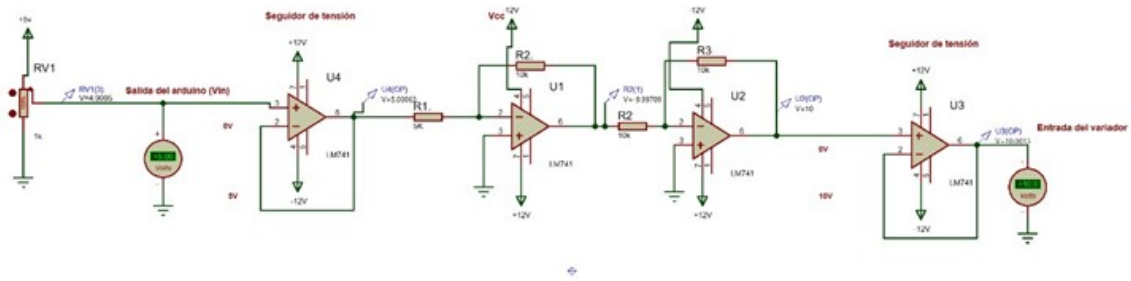


Fig. 4.16. Circuito del acondicionador

En la Fig. **4.17** se visualiza la conexión del acondicionador de señal y en la Tabla **4.4** se verifica la asignación de pines.

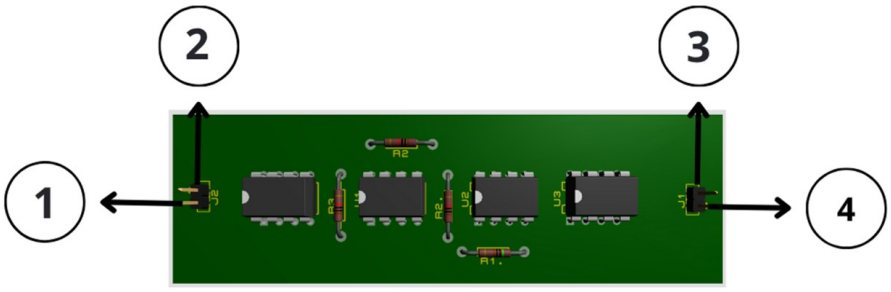


Fig. 4.17. Conexión del acondicionador de señal

Tabla 4.4. Asignación de pines de acondicionador de señal

Número	Detalle
1	Pin + Voltaje de Entrada - Pin 13
2	Pin - GND Arduino
3	Pin - Voltaje de Entrada ACM
4	AVI del VFD

El acondicionador de señal es muy sensible ante voltajes altos o conexiones erróneas, y por lo tanto es necesario tomar en cuenta la polaridad de la fuente simétrica y de su entrada.

4.5. Variador de Frecuencia

En la Fig. **4.18** se indica el variador de frecuencia VFD015EL23A de la serie VFD-EL de Delta Electronics está diseñado para convertir una alimentación monofásica de 200–240 V CA en una salida trifásica de hasta 3 HP (2,2 kW) con 9,5 A, empleando un puente rectificador de diodos de corriente continua y un inversor basado en IGBT de alta frecuencia. Su etapa de potencia incorpora filtros EMI/RFI integrados para reducir interferencias electromagnéticas

y un circuito de detección de corriente de alta precisión que provee protección contra sobrecargas y sobre temperatura, garantizando un desempeño estable y eficiente en aplicaciones de velocidad variable [37].



Fig. 4.18. Variador de frecuencia

El VFD015EL23A dispone de un bloque de bornes que agrupa las conexiones de alimentación, motor y señales de entrada/salida sean analógicas, digitales y de relé estas últimas son limitadas en la corriente que pueden soportar, así como un teclado numérico de membrana con pantalla de siete segmentos para la configuración local de parámetros, monitoreo de frecuencia y ajuste de perfil V/Hz. La lógica de mando está soportada por un microprocesador embebido que facilita funciones avanzadas como frenado dinámico, inyección CC y soporte de protocolos de comunicación industrial (Modbus RTU) [37, 38].

4.5.1. Conexión del Variador de Frecuencia

A tráves de la Fig. **4.19** y la Tabla **4.5**, se visualiza la conexión del VFD. Los pines 1 y 2 son necesarios para iniciar la marcha del motor en caso de no activarlo no será posible

activar el motor desde la interfaz, los pines 2 y 3 provienen de la salida del acondicionador de señal, se debe tomar en cuenta la polaridad de esta señal, en caso de conectarlo con los polos cambiados se producirá un daño en los amplificadores operacionales LM741. En la Tabla **4.6** se observa la configuración realizada en el VFD.

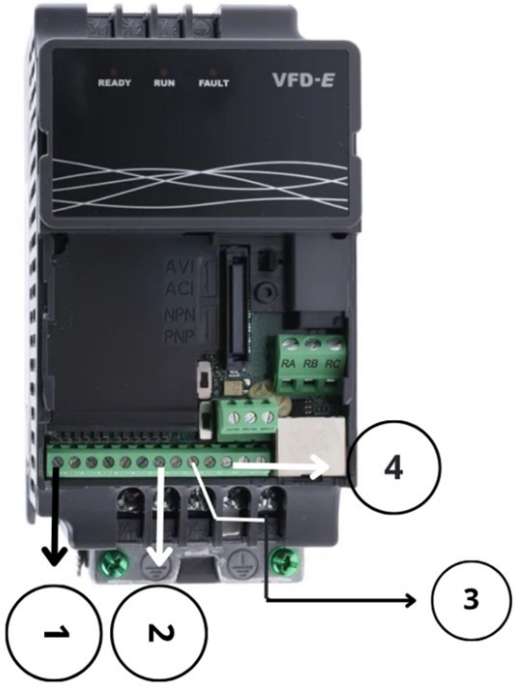


Fig. 4.19. Conexión VFD

Tabla 4.5. Asignación de pines VFD

Número	Detalle
1	Pin 1 de marcha - MI1
2	Pin 2 de marcha DCM
3	Pin - Voltaje de Entrada ACM
4	Pin + Voltaje de entrada AVI

Tabla 4.6. Configuración VFD

Parámetro	Explicación	Configuración	Configuración actual
01.09	Tiempo de aceleración 1	0,1 a 600,0 / 0,01 a 600,0 sec	1
01.10	Tiempo de desaceleración 1	0,1 a 600,0	1
02.00	Fuente del primer comando de frecuencia maestra	1: 0 a +10V de AVI,	1
02.04	Control de la dirección del motor	1: Deshabilitar la operación en reversa	0
10.00	Selección del punto de ajuste del PID	2: 0 a +10 V desde AVI	2

4.6. Motor

El motor trifásico Transtecno MS6334 es un motor de inducción trifásico diseñado para aplicaciones industriales de potencia media. Su carcasa de fundición de aluminio cumple con la protección IP66, garantizando resistencia contra polvo y chorros de agua a alta presión. El dispositivo de la Fig. **4.20** está fabricado conforme a las normas IEC, presenta un eje de acero inoxidable con tolerancia H7 y cojinetes de bolas dimensionados para soportar cargas radiales y axiales [39].



Fig. 4.20. Motor

El ventilador axial es retirado para colocar un acople el cual conecta a un encoder, los tiempos de uso del motor no son prolongados, tampoco de alta demanda, por esta razón no es necesario el ventilador que viene acoplado en el eje.

El Motor Transtecno MS6334 consta de un estator laminado de acero al silicio con ranuras para alojar las bobinas de cobre esmaltado, estas dispuestas de manera que optimiza la energía y minimiza pérdidas por corrientes parásitas. El rotor está conformado por barras de aluminio inyectado en un núcleo cilíndrico, configurado en jaula de ardilla para ofrecer un arranque robusto y un torque uniforme.

Para su alimentación, el motor MS6334 se conecta en “Delta”, Esta disposición permite alcanzar el par nominal y la velocidad de diseño sin requerir transformadores externos o cajas de velocidad, se debe tomar en cuenta que la conexión delta consume mayor energía en comparación con la conexión estrella. Sin embargo, el variador de frecuencia está dimensionado con un criterio conservador y no tendrá problemas al arrancar el motor, por ello la conexión delta es especialmente ventajosa en el sistema donde se espera variaciones frecuentes de carga y se busca optimizar la eficiencia energética y la respuesta dinámica del motor [40].

4.7. Encoder

El encoder de la Fig. **4.21** es del modelo E38S6G5-600B-G24N lo que indica que es un sensor rotatorio de dos fases diseñado para aplicaciones industriales de posicionamiento y control de velocidad. Su eje sólido de 6 mm garantiza un acoplamiento mecánico robusto, mientras que su carcasa cilíndrica de 38 mm de diámetro proporciona protección contra vibraciones y polvo. En el interior, el estator integra un disco perforado de precisión y sensores ópticos de tipo "through-beam" que generan señales cuadradas desfasadas 90° (canales A y B), con una resolución de 600 impulsos por revolución. La electrónica de salida está basada en colector abierto NPN, lo que permite la integración con distintos niveles de tensión desde los 5 V hasta los 24 V [41]. En los sistemas de adquisición puede requerir resistencias pull-up externas, su esquemático se visualiza en la Fig. **4.22**.



Fig. 4.21. Encoder

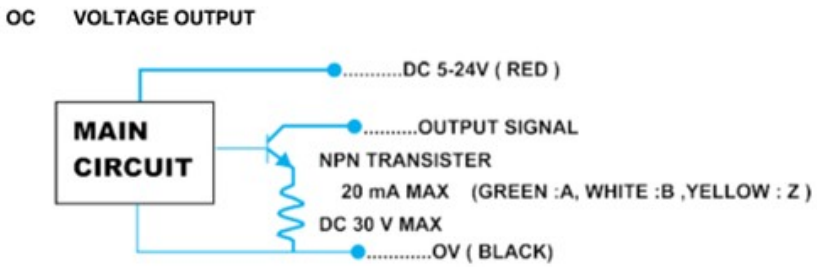


Fig. 4.22. Resistencias pull-up del encoder

4.7.1. Conexión del Encoder

La conexión eléctrica del E38S6G5-600B-G24N se efectúa mediante un cable de cuatro conductores más malla de tierra [41]. Sin embargo, si el Pull-up interno no está disponible en el microcontrolador, entonces necesita Pull-up con resistencias en el canal de salida A y B, es decir colocar una resistencia entre cable Verde y Rojo, Blanco y Rojo, en este caso se agrega una resistencia de 1kΩ para el canal A y B de señal considerando la tabla de conexiones mostrada en la Fig. **4.23**.

Color de cable	OC VP OP 3-CANALES	TTL / HTL 6-CANALES	CLAVIJA 9-PIN	SIGNIFICADO
ROJO	VCC	VCC	1	Tensión de alimentación
NEGRO	0 V	0 V	4	Puerto común
VERDE	A	A	5	Cable de señal
BLANCO	B	B	3	Cable de señal

Fig. 4.23. Conexiones encoder

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Implementación

5.1.1. Materiales de Construcción

La base del sistema de ensayos de lazos de control de motores trifásicos, debe ser de un material el cual no genere ningún efecto negativo o interferencia con el sistema, por ello se considera que el material debería ser de acero al carbono debido a las características descritas en la Tabla **5.1**.

Tabla 5.1. Especificaciones del Acero al Carbono [4]

Número	Propiedad	Detalle
1	Calidad	ASTM A36
2	Largo normal	34 cm
3	Espesores	2,5 mm
4	Acabado	Acero Negro

5.1.2. Chasis y Estructura

El chasis se construye con perfiles en C metálicos de acero negro ASTM A36 indicado en la Fig. **5.1**, garantizando rigidez y resistencia a vibraciones, con una longitud de 34 cm suficiente para montar y soportar el sistema, se recubre toda la superficie con esmalte negro mate para evitar la corrosión.



Fig. 5.1. Perfil en C - ASTM A36

Para la instalación del microcontrolador Arduino Mega 2560, fuente simétrica de alimentación, acondicionador de señal, pulsador de marcha del motor, todo esto se incorpora el cajetín plástico de la Fig. **5.2** con la norma IP65 (resistente al polvo y agua de baja presión).



Fig. 5.2. Cajetín de plástico

En la Fig. **5.3** se visualiza los remaches de 5mm que permiten que el variador de frecuencia Delta se sujete a los perfiles metálicos en C.



Fig. 5.3. Remache de 5mm

5.1.3. Selección de Materiales y Equipos

Tabla 5.2. Lista de Materiales y Equipos

Número	Descripción	Cantidad
1	Variador de Frecuencia VFD015E23A	1
2	Encoder Rotativo 600b-G24N	1
3	Amplificadores operacionales LM741CN	4
4	Microcontrolador Arduino Mega 2560	1
5	Pulsadores de 4 pines	5
6	Resistencias 1k Ω, 6.7kΩ, 220Ω, 3.3kΩ,10kΩ	7
7	Condesadores cerámicos 0.1 uF (104)	5
8	Diodos LED color rojo	5
9	Jumpers	n/d
10	Borneras	n/d
11	Baquelita	n/d
12	Fuente DC (5V -24V)	1
13	Fusibles o Breakers Trifásicos	n/d
14	Relevadores de protección	n/d
15	Motor trifásico (Transtecno MS6334 1/2HP)	1
16	Osciloscopio	1
17	Multímetro	1
18	Fuente simétrica ± 12	1
19	UNI-T Mini Tachometer	1
20	Masa de acero AISI 1018	1

5.1.4. Ensamblaje

Considerando las especificaciones de los puntos anteriores, se ensambla el prototipo del sistema de ensayos de sistemas de control en motores trifásicos. En la Fig. **5.4** se observa el ensamblaje. Mientras que en el Anexo C, se encuentra otra figura del ensamble.



Fig. 5.4. Ensamble Prototipo

5.2. Pruebas de funcionamiento

Se somete al sistema con los diferentes escalones y modos de operación. Y se analiza las gráficas que la interfaz en Python nos arroja, todos los resultados se tabulan en tablas.

5.2.1. Fase 1: Ensayos en modo de operación de lazo cerrado sin carga

En la Fig. **5.5** se observa la gráfica del ensayo a 500RPM sin carga, en la Fig. **5.6** a 1000RPM, en la Fig. **5.7** a 1200RPM y en la Fig. **5.8** a 1500RPM. Mientras que, en la Tabla **5.3** se observa la comparativa en cada ensayo del tiempo de subida, tiempo al pico, tiempo de asentamiento

y error en estado estacionario.

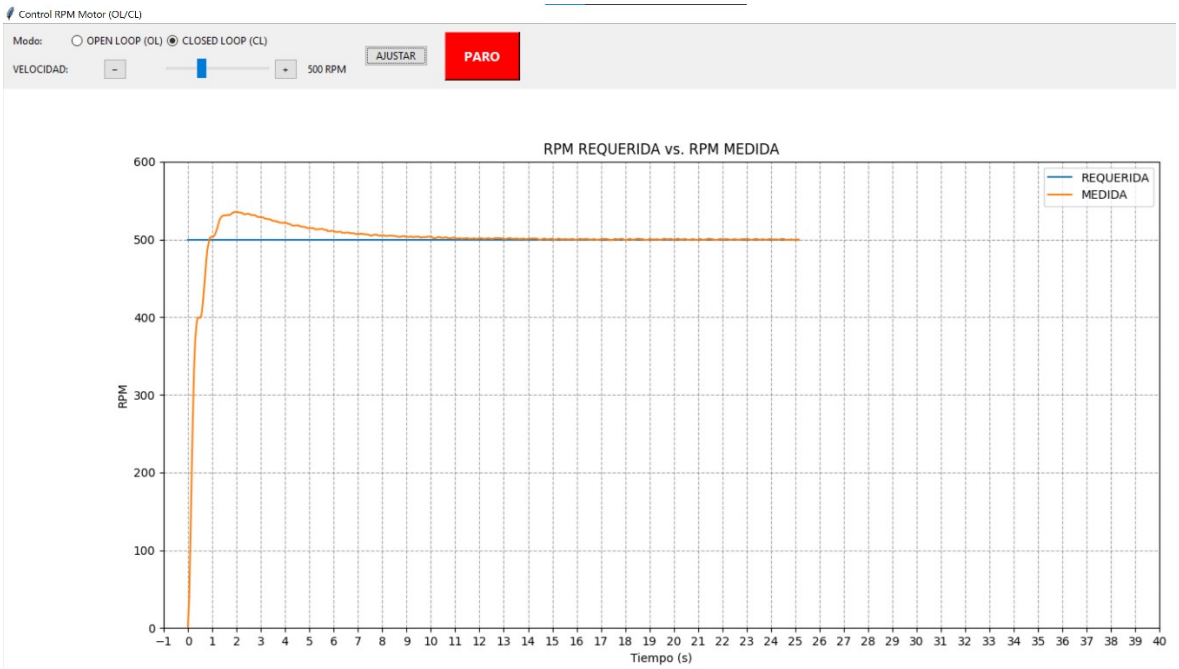


Fig. 5.5. Ensayo 1: Lazo cerrado 500 RPM sin carga

En la prueba realizada en lazo cerrado a 500 RPM sin carga, se examina el desempeño dinámico del sistema al comparar la velocidad de referencia con la velocidad real medida. Se identifica un tiempo de subida aproximado de 0.78 segundos, lo que demuestra una respuesta inicial eficiente. El sistema alcanza su valor máximo alrededor de los 2.52 segundos, momento en el que se presenta la mayor desviación respecto al punto de referencia. La estabilidad se logra cerca de los 10 segundos, lo que define el tiempo de asentamiento. Ante ello, el error en estado estacionario es prácticamente inexistente, lo que confirma que el controlador está correctamente sintonizado y garantiza una respuesta precisa sin errores.

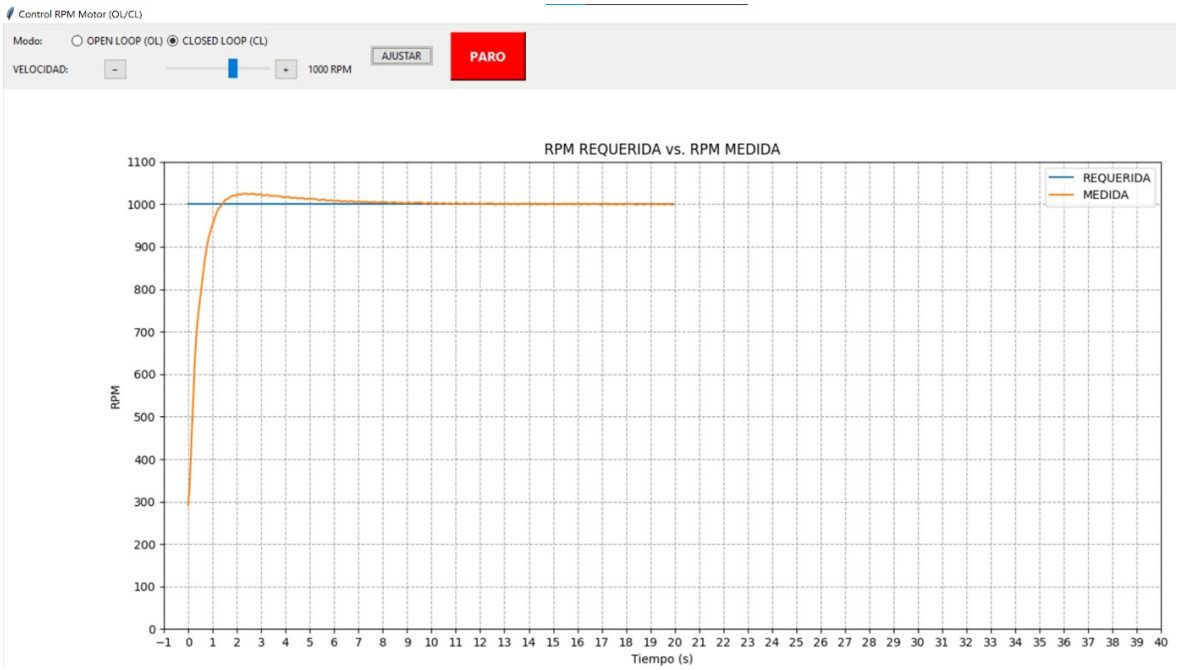


Fig. 5.6. Ensayo 2: Lazo cerrado 1000 RPM sin carga

Durante el ensayo realizado a 1000 RPM en lazo cerrado, se evalúa el comportamiento del sistema frente a una consigna determinada. La respuesta evidencia un tiempo de subida de aproximadamente 1.20 segundos, lo que indica una reacción eficiente ante el cambio de velocidad. La máxima desviación transitoria ocurre cerca de los 2.00 segundos, correspondiente al tiempo al pico. Posteriormente, la señal alcanza la estabilidad alrededor de los 7.30 segundos, definiendo el tiempo de asentamiento. Se observa que el sistema alcanza el valor deseado sin presentar errores en estado estacionario, lo cual demuestra una adecuada sintonización del controlador y un desempeño preciso en condiciones de régimen permanente.

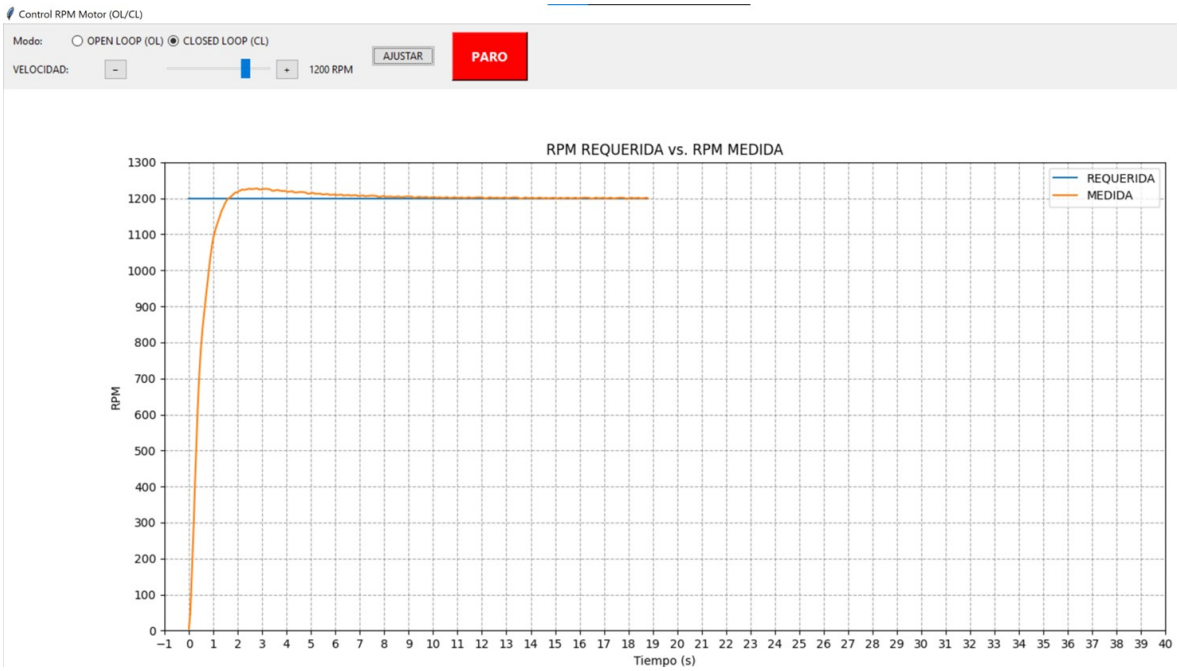


Fig. 5.7. Ensayo 3: Lazo cerrado 1200 RPM sin carga

Al ajustar a 1200 RPM se observa la respuesta dinámica del sistema de control en lazo cerrado, la señal de referencia (RPM requerida) con la señal medida (RPM obtenida). El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema. El tiempo al pico se alcanza alrededor de los 2.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 8.50 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es prácticamente nulo, lo que indica una excelente precisión del controlador y una sintonización adecuada para alcanzar el régimen permanente sin offset.

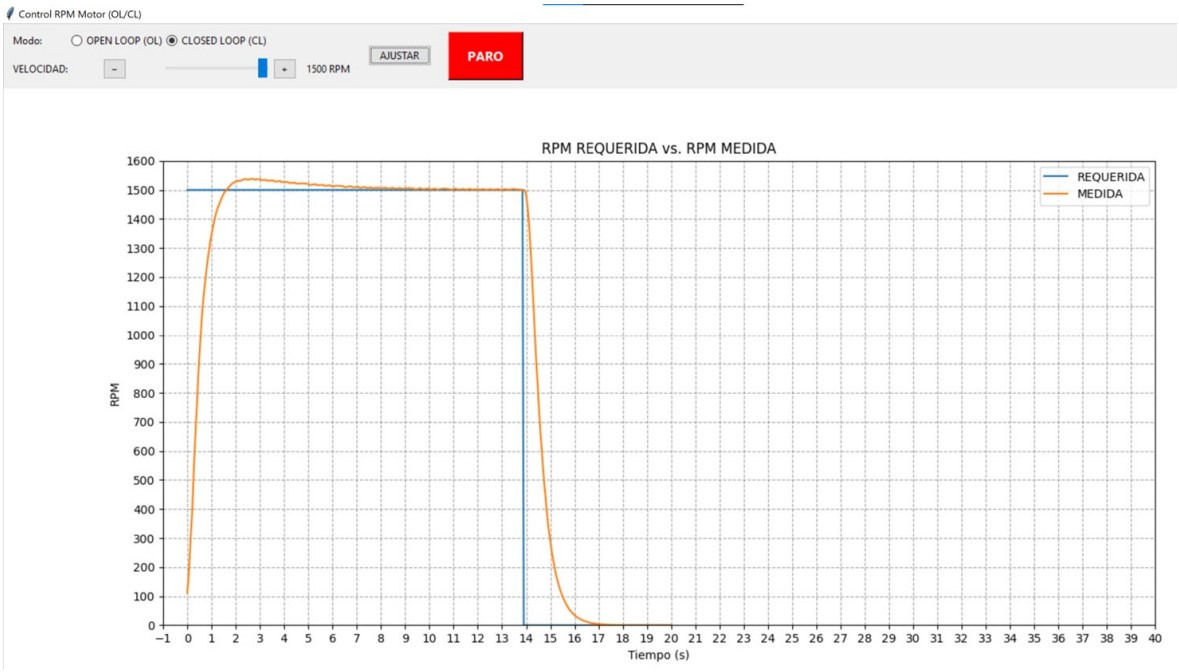


Fig. 5.8. Ensayo 4: Lazo cerrado 1500 RPM sin carga

En el ensayo realizado a 1500 RPM bajo configuración de lazo cerrado, se evalúa la respuesta dinámica del sistema mediante la comparación entre la señal de referencia y la velocidad real obtenida. El sistema presenta un tiempo de subida de aproximadamente 0.78 segundos, lo que refleja una respuesta inicial rápida ante la consigna. El tiempo al pico se registra alrededor de los 2.52 segundos, punto en el que se evidencia la mayor desviación transitoria. La señal alcanza la estabilidad en un tiempo aproximado de 10 segundos, lo que define el tiempo de asentamiento. Finalmente, el error en estado estacionario es prácticamente nulo, lo que demuestra la efectividad del controlador y su correcta sintonización para mantener el valor deseado.

Tabla 5.3. Lazo cerrado - Sin Carga

Ensayo	Tiempo de subida (Tr)[s]	Tiempo al pico (Tp)[s]	Tiempo de asentamiento (Ts)[s]	Error en estado estacionario (Ess)[s]
1	0,78	2,52	10,00	1,00
2	1,20	2,00	7,30	1,00
3	1,50	2,00	8,50	2,00
4	1,20	2,20	8,50	2,00

5.2.2. Fase 2: Ensayos en modo de operación de lazo abierto sin carga

El ensayo de la fase 2 se encarga de realizar la prueba de funcionamiento en lazo abierto sin carga en el motor, y se obtienen las siguientes gráficas indicadas en la Fig. **5.9** - **5.12** En la Tabla **5.4** se visualiza la comparativa de los 4 ensayos de lazo abierto sin carga.

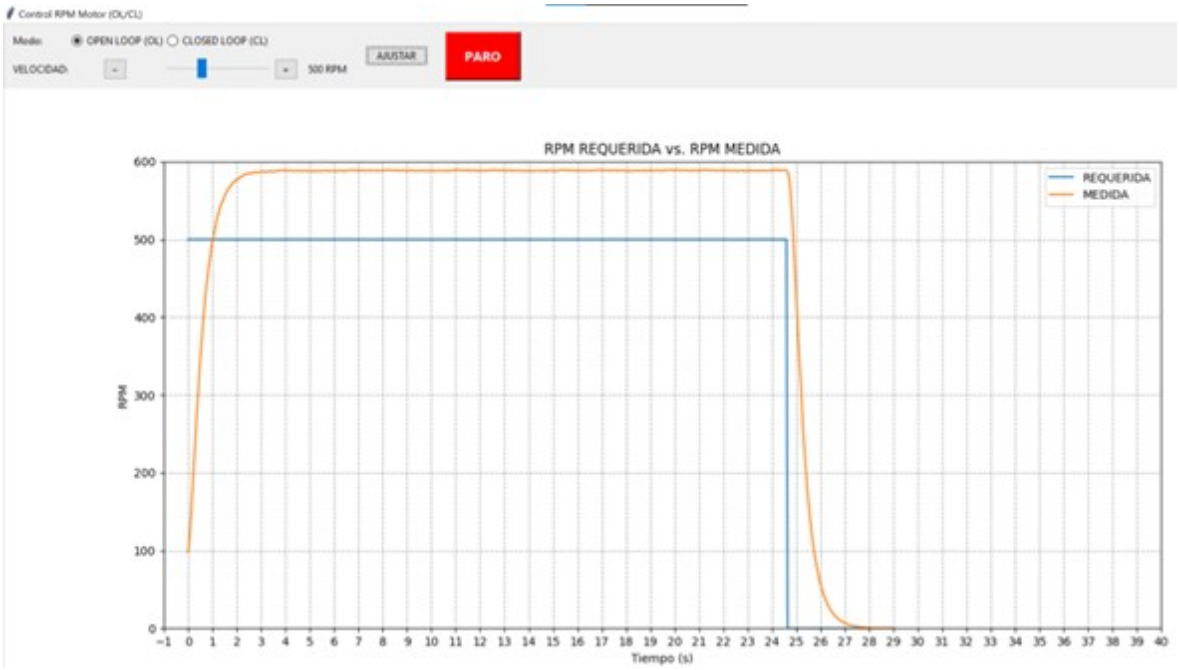


Fig. 5.9. Lazo abierto 500 RPM sin carga

En el ensayo 1 correspondiente a la fase 2 a 500 RPM, se analiza la respuesta dinámica del sistema operando en lazo abierto. Se compara la señal de referencia con la velocidad real obtenida, observándose un tiempo de subida cercano a 1.50 segundos, lo cual indica una respuesta relativamente rápida. El sistema alcanza su valor máximo en aproximadamente 3.00 segundos, momento que también marca el tiempo de asentamiento, ya que no se observan oscilaciones posteriores. Sin embargo, se registra un error en estado estacionario de 90 RPM, equivalente a un 5.62 % respecto a la consigna, lo que evidencia la presencia de un offset característico del modo de operación en lazo abierto, donde no se dispone de retroalimentación para corregir desviaciones.

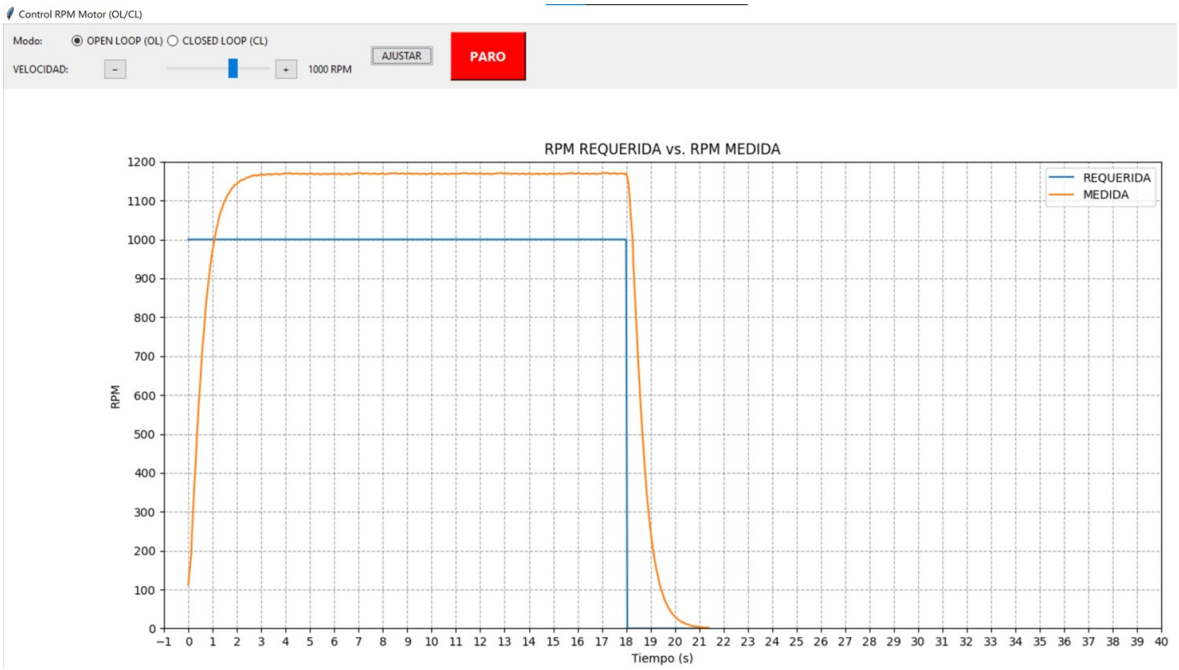


Fig. 5.10. Lazo abierto 1000 RPM sin carga

En el segundo ensayo de la fase 2, se evalúa el comportamiento del sistema operando en lazo abierto, analizando la relación entre la velocidad de referencia y la velocidad real alcanzada. El sistema presenta un tiempo de subida de aproximadamente 1.50 segundos, lo que refleja una respuesta inicial eficiente. La velocidad máxima se alcanza a los 3.00 segundos, momento que también corresponde al tiempo de estabilización de la señal. Sin embargo, se registra un error en estado estacionario de 180 RPM, equivalente a un 11.52 % con respecto al valor deseado. Este resultado pone en evidencia una de las principales limitaciones del lazo abierto: la imposibilidad de corregir automáticamente las desviaciones, lo que genera un offset significativo en la respuesta final.

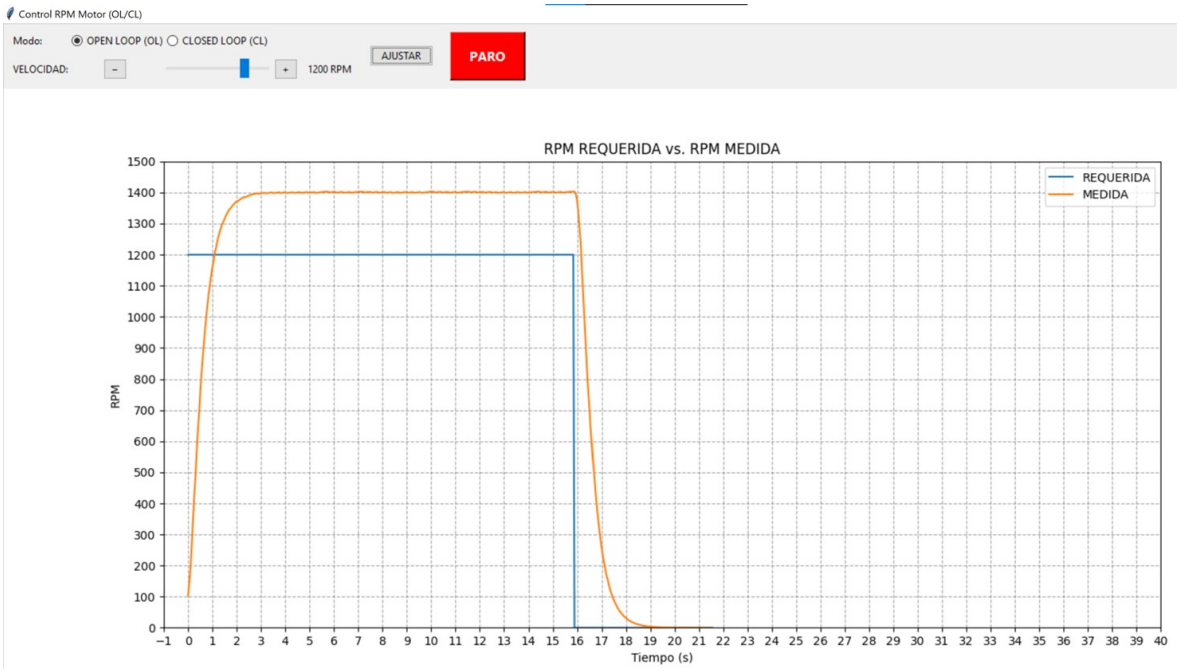


Fig. 5.11. Lazo abierto 1200 RPM sin carga

En el ensayo 3 de la fase 2 se observa la respuesta dinámica del sistema de control, en este caso en lazo abierto, la señal de referencia (RPM requerida) con la señal medida (RPM obtenida). El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema. El tiempo al pico se alcanza alrededor de los 3.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 3.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es de 200 RPM, esto significa un 12.50 % de offset debido al modo de operación en lazo abierto.

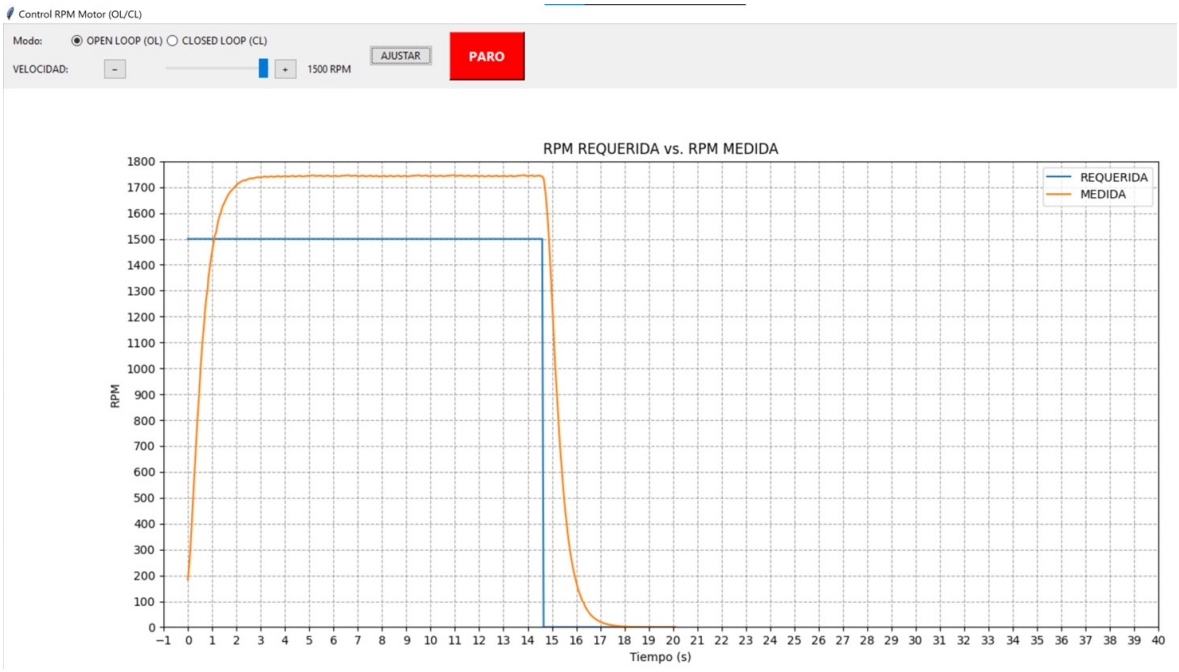


Fig. 5.12. Lazo abierto 1500 RPM sin carga

En el ensayo 4 de la fase 2, correspondiente al modo de operación en lazo abierto, se analiza la respuesta dinámica del sistema a partir de la comparación entre la velocidad de referencia y la velocidad obtenida. El tiempo de subida se estima en 1.50 segundos, lo que refleja una respuesta rápida frente a la consigna establecida. La velocidad máxima se alcanza a los 3.00 segundos, instante que también marca el tiempo de asentamiento, dado que no se evidencian oscilaciones posteriores. No obstante, se registra un error en estado estacionario de 250 RPM, equivalente al 15.62 % respecto a la referencia. Este resultado reafirma la desventaja del lazo abierto, donde la ausencia de retroalimentación impide compensar las desviaciones, generando un offset considerable en la salida del sistema.

Tabla 5.4. Lazo abierto - Sin Carga

Ensayo	Tiempo de subida (Tr)[s]	Tiempo al pico (Tp)[s]	Tiempo de asentamiento (Ts)[s]	Error en estado estacionario (Ess)[RPM]
1	1,50	3,00	3,00	90
2	1,50	3,00	3,00	180
3	1,50	3,00	3,00	200
4	1,50	3,00	3,00	250

5.2.3. Fase 3: Ensayos en modo de operación de lazo cerrado con carga

En la Fig. **5.13** se observa la gráfica del ensayo a 500RPM sin carga, en la Fig. **5.14** a 1000RPM, en la Fig. **5.15** a 1200RPM y en la Fig. **5.16** a 1500RPM. Mientras que, en la Tabla **5.5** se observa la comparativa en cada ensayo del tiempo de subida, tiempo al pico, tiempo de asentamiento y error en estado estacionario.

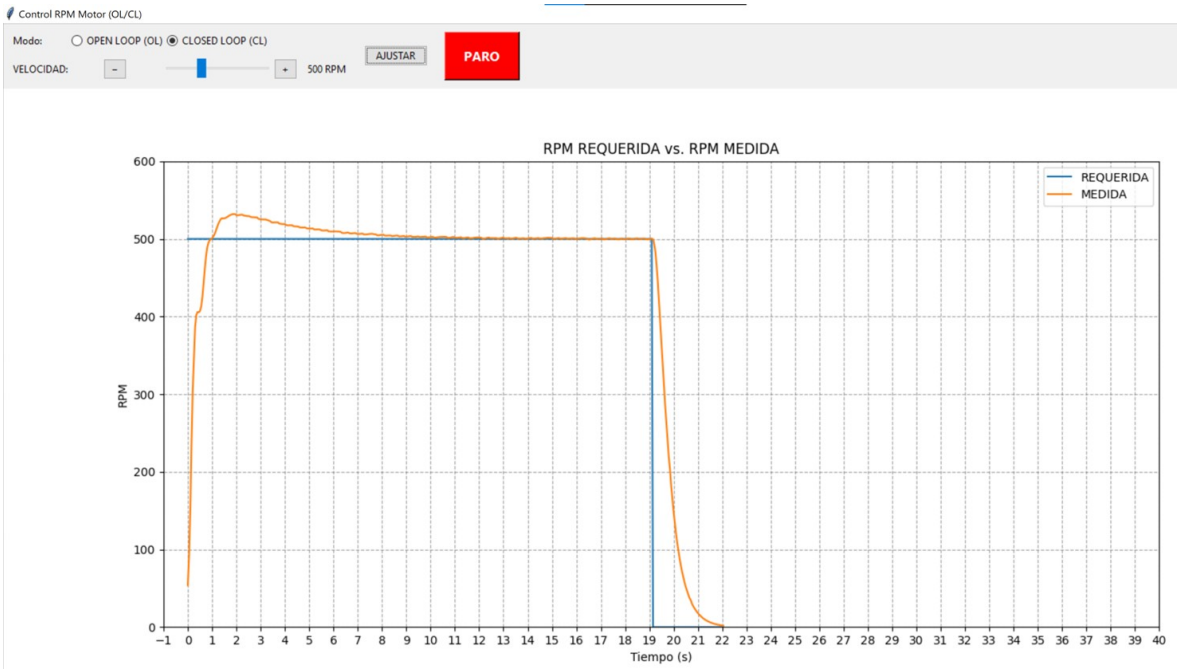


Fig. 5.13. Lazo cerrado 500 RPM con carga

En el primer ensayo de la fase 3, con el sistema operando en lazo cerrado, se evalúa la respuesta dinámica mediante la comparación entre la señal de referencia y la velocidad real obtenida. El tiempo de subida se estima en 0.80 segundos, lo que evidencia una respuesta ágil por parte del sistema. La máxima desviación transitoria se presenta alrededor de los 2.00 segundos, coincidiendo con el tiempo al pico. La señal se estabiliza aproximadamente a los 9.50 segundos, definiendo el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es prácticamente despreciable, con un valor de apenas 0.12 %, lo que demuestra una excelente precisión en el control y una correcta sintonización del sistema, capaz de alcanzar el régimen permanente con un offset mínimo.

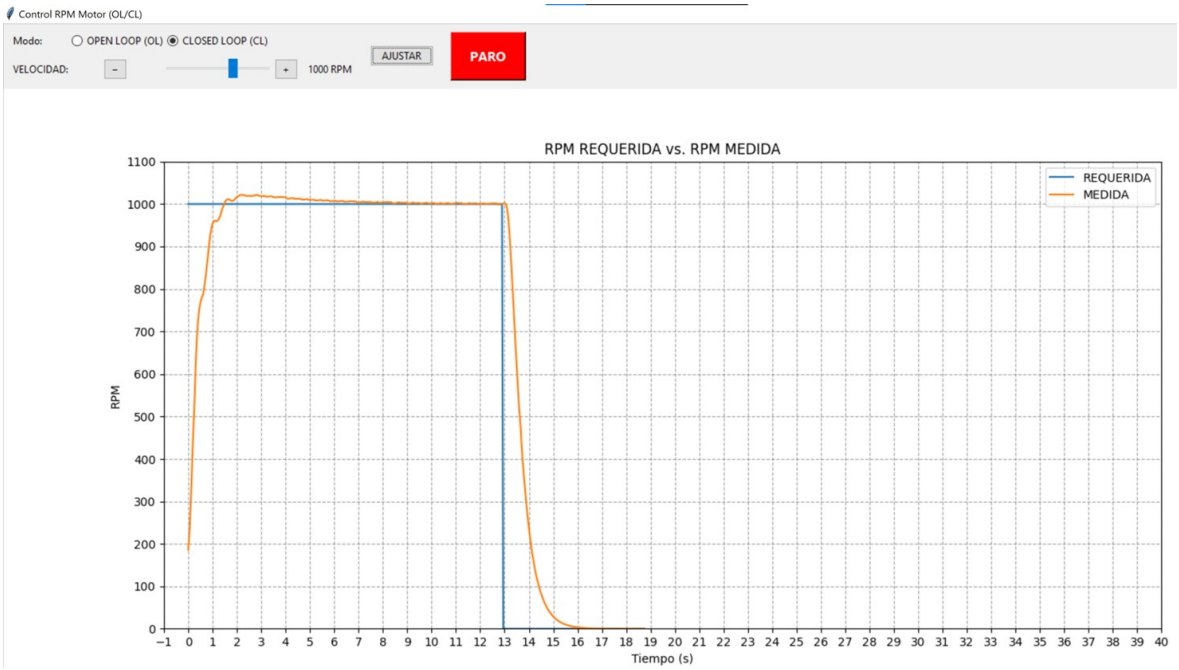


Fig. 5.14. Lazo cerrado 1000 RPM con carga

En el ensayo a 1000 RPM se observa la respuesta dinámica del sistema de control, en lazo cerrado, la señal de referencia con la señal medida. El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1 segundo, evidenciando una respuesta rápida del sistema. El tiempo al pico se alcanza alrededor de los 2.20 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 7.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es prácticamente nulo con un 0.12 %, lo que indica una excelente precisión del controlador y una sintonización adecuada para alcanzar el régimen permanente con un offset muy bajo.

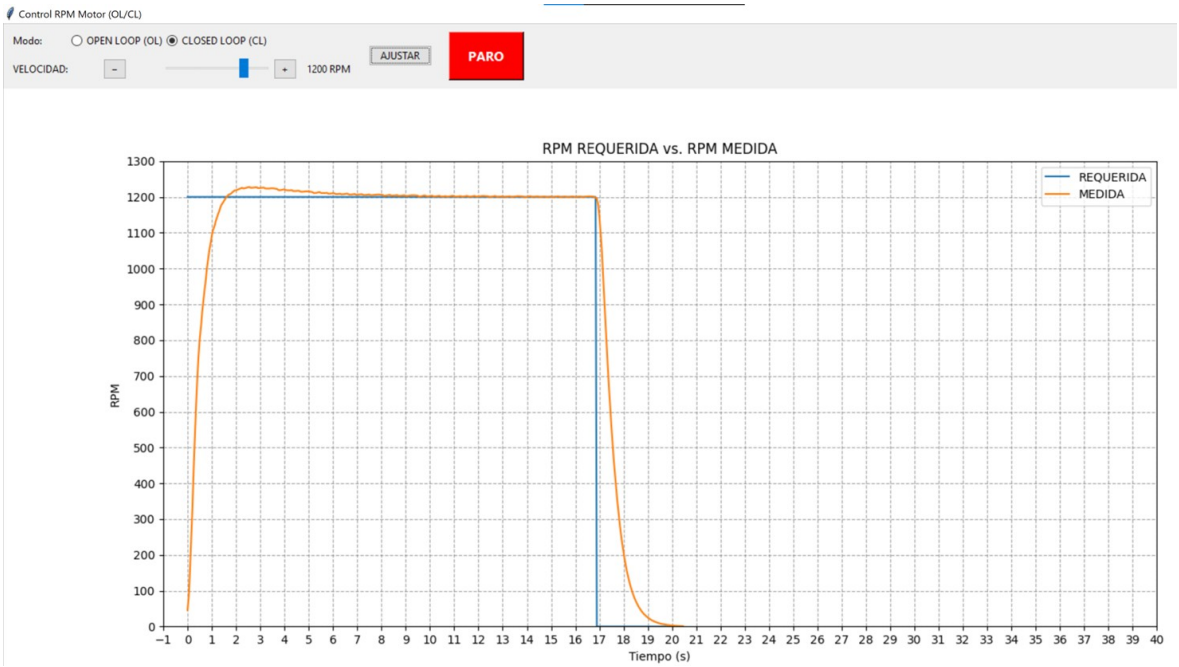


Fig. 5.15. Lazo cerrado 1200 RPM con carga

En el ensayo 3 a 1200 RPM se observa la respuesta dinámica del sistema de control, con base en la señal de referencia con la señal medida. El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.30 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema. Mientras que, el tiempo al pico se alcanza alrededor de los 2.50 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 7.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento y el error en estado estacionario es prácticamente nulo con un 0.12 %, lo que indica una excelente precisión del controlador y una sintonización adecuada para alcanzar el régimen permanente con un offset muy bajo.

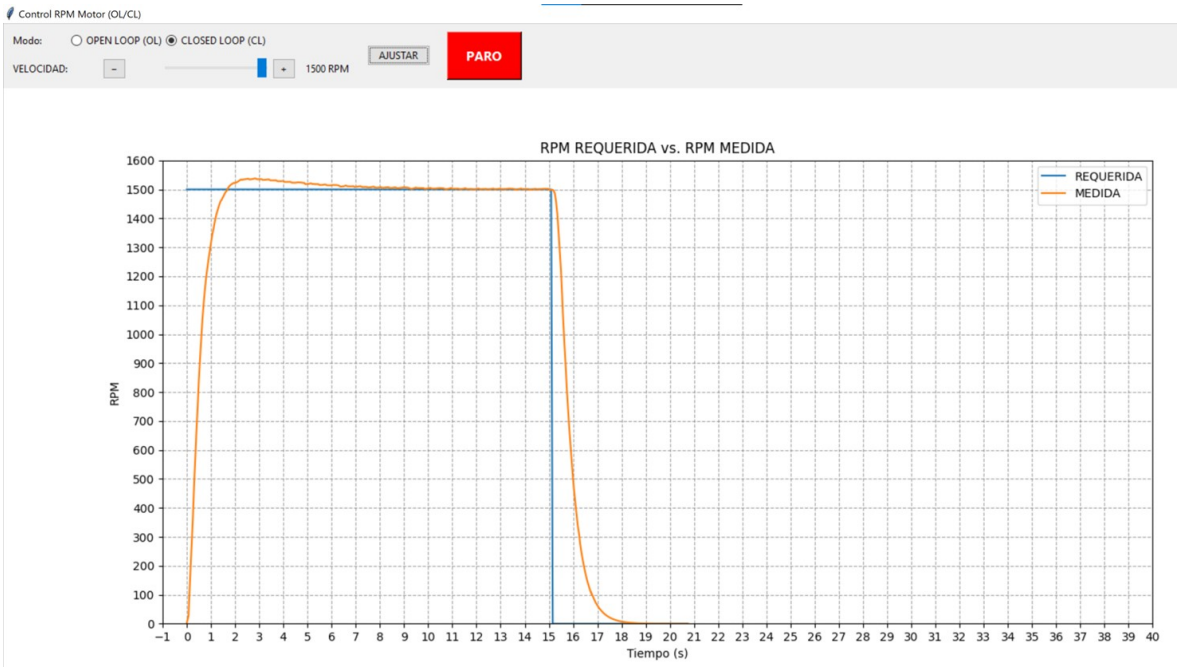


Fig. 5.16. Lazo cerrado 1500 RPM con carga

El ensayo de 1500 RPM se observa la respuesta dinámica del sistema de control, en este caso en lazo cerrado, la señal de referencia con la señal medida. El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.30 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema y el tiempo al pico se alcanza alrededor de los 2.50 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. Además, la señal se estabiliza en los 8.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es prácticamente nulo con un 0.12 %, lo que indica una excelente precisión del controlador y una sintonización adecuada para alcanzar el régimen permanente con un offset muy bajo.

Tabla 5.5. Lazo cerrado - Con Carga

Ensayo	Tiempo de subida (Tr)[s]	Tiempo al pico (Tp)[s]	Tiempo de asentamiento (Ts)[s]	Error en estado estacionario (Ess)[s]
1	0,80	2,00	9,50	2,00
2	1,00	2,20	7,00	2,00
3	1,30	2,50	7,00	2,00
4	1,30	2,50	8,00	2,00

5.2.4. Fase 4: Ensayos en modo de operación de lazo abierto con carga

El ensayo de la fase 4 se encarga de realizar la prueba de funcionamiento en lazo abierto con carga en el motor, y se obtienen las siguientes gráficas indicadas en la Fig. **5.17** - **5.20**. En la Tabla **5.6** se visualiza la comparativa de los 4 ensayos de lazo abierto con carga.

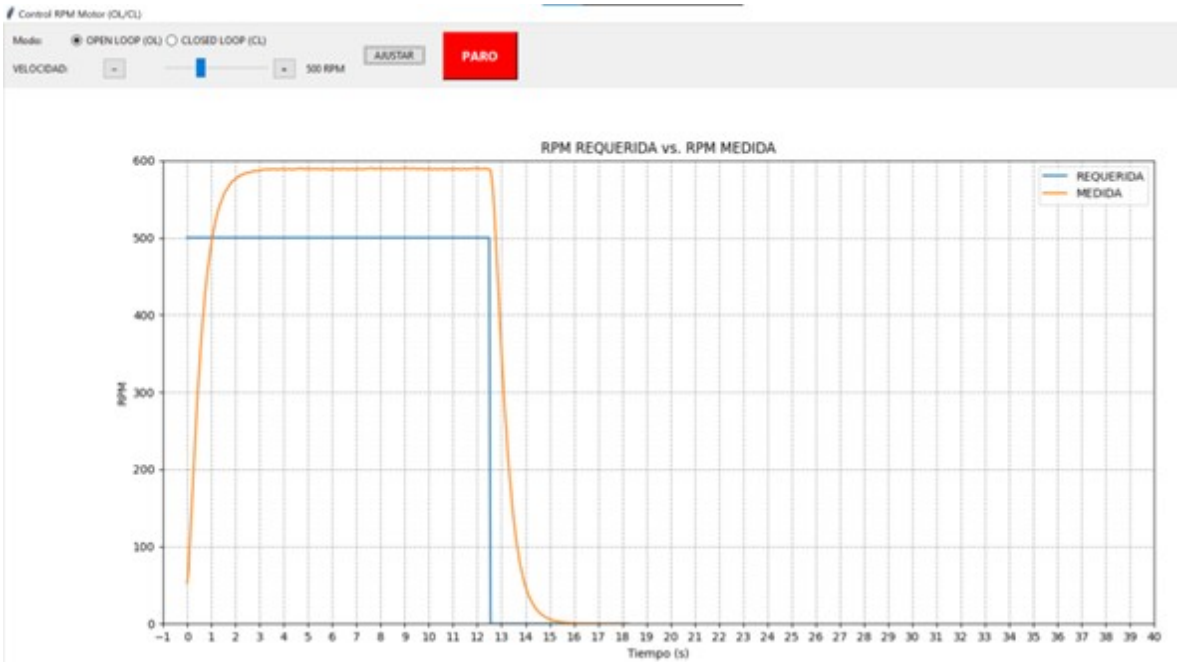


Fig. 5.17. Lazo abierto 500 RPM con carga

En el ensayo a 500 RPM se observa la respuesta dinámica del sistema de control de lazo abierto considerando las RPM requeridas con las RPM obtenidas. El tiempo de subida se estima en 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema. El tiempo al pico se alcanza alrededor de los 3.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria y la señal se estabiliza en los 3.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es de 90 RPM, esto significa un 5.62 % de offset debido al modo de operación en lazo abierto.

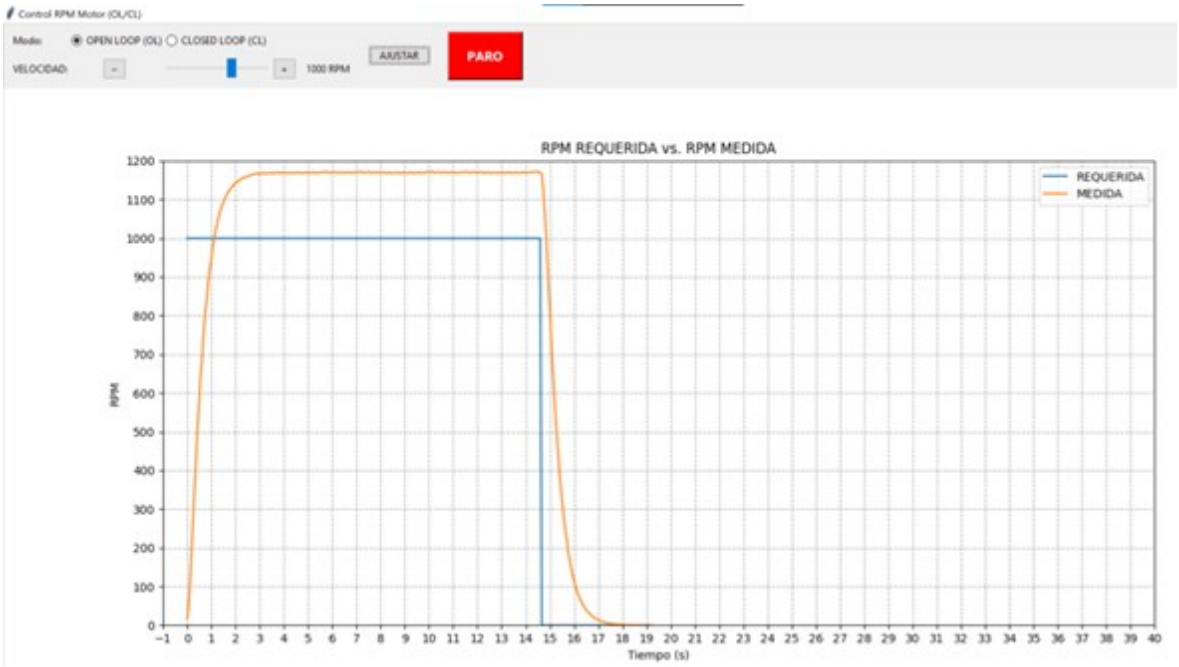


Fig. 5.18. Lazo abierto 1000RPM con carga

En el ensayo 2 de la fase 4 se observa la respuesta dinámica del sistema de control. El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema y el tiempo al pico se alcanza alrededor de los 3.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 3.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es de 180 RPM, esto significa un 11.52 % de offset debido al modo de operación en lazo abierto.

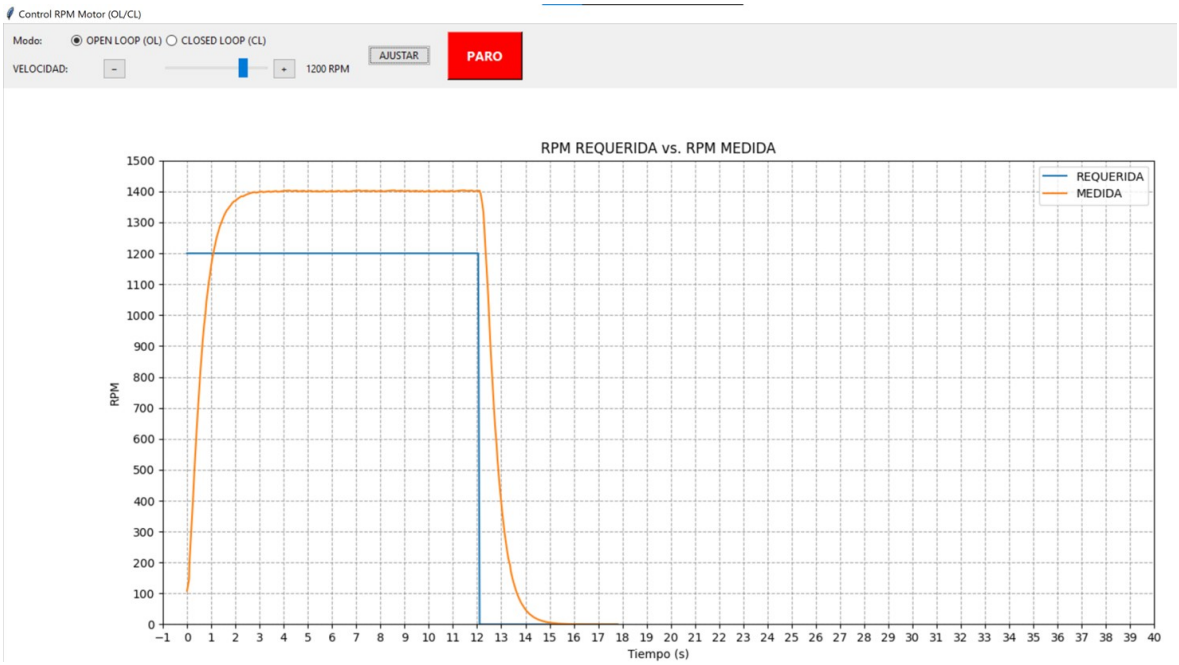


Fig. 5.19. Lazo abierto 1200RPM con carga

En el ensayo 3 de la fase 4 se observa la respuesta dinámica del sistema en lazo abierto, donde el tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema y el tiempo al pico se alcanza alrededor de los 3.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 3.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es de 200 RPM, esto significa un 12.50 % de offset debido al modo de operación en lazo abierto.

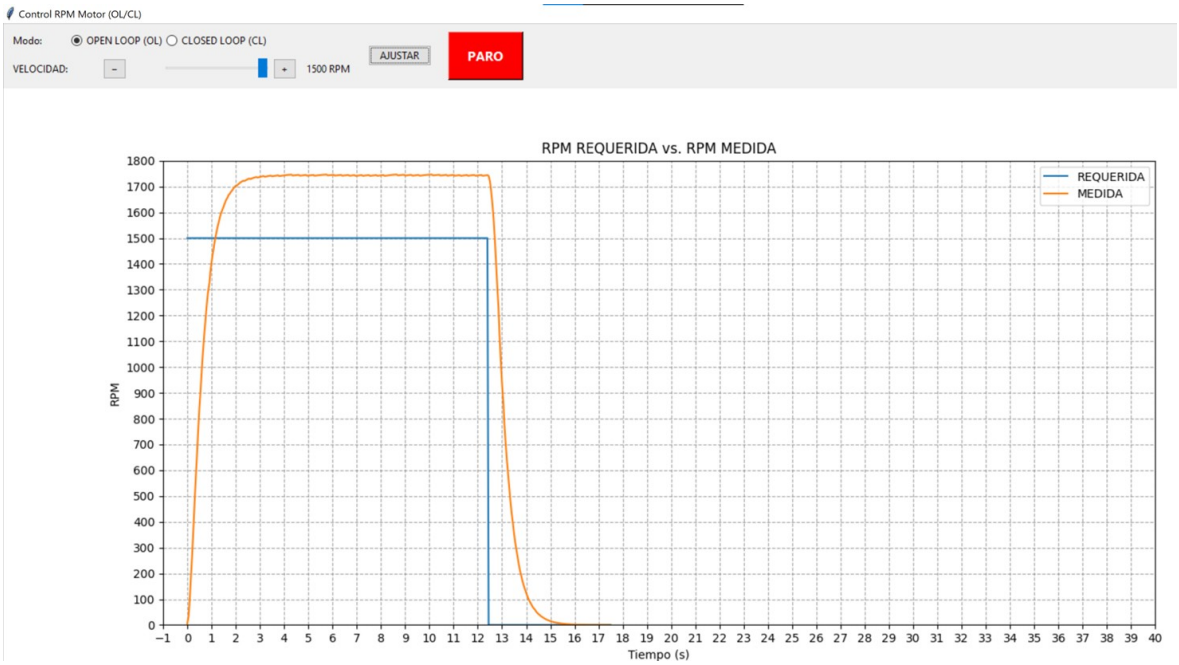


Fig. 5.20. Lazo abierto 1500RPM con carga

En el ensayo 4 de la fase 4 se observa la respuesta dinámica del sistema de control, en este caso en lazo abierto, la señal de referencia con la señal medida. El tiempo de subida se estima en aproximadamente 1.50 segundos, evidenciando una respuesta rápida del sistema. El tiempo al pico se alcanza alrededor de los 3.00 segundos, coincidiendo con la máxima desviación transitoria. La señal se estabiliza en los 3.00 segundos, marcando el tiempo de asentamiento. El error en estado estacionario es de 250 RPM, esto significa un 15.62 % de offset debido al modo de operación en lazo abierto.

Tabla 5.6. Lazo abierto - Con Carga

Ensayo	Tiempo de subida (Tr)[s]	Tiempo al pico (Tp)[s]	Tiempo de asentamiento (Ts)[s]	Error en estado estacionario (Ess)[RPM]
1	1,50	3,00	3,00	90
2	1,50	3,00	3,00	180
3	1,50	3,00	3,00	200
4	1,50	3,00	3,00	250

5.2.5. Análisis de los ensayos

En las fases 1 y 3 referentes al lazo cerrado, el sistema muestra un tiempo de subida que oscila entre 0,78 s y 1,50 s, un tiempo al pico entre 2,00 s y 2,52 s y un tiempo de asentamiento en el rango de 7,00 s a 10,00 s. El error en estado estacionario se mantiene muy bajo, entre 1 y 2 unidades, lo que indica una alta precisión del controlador. La introducción de carga incrementa ligeramente el tiempo de subida y de asentamiento y duplica el error estacionario de 1 a 2.

En las fases 2 y 4 referentes al lazo abierto, los ensayos presentan un tiempo de subida constante de 1,50 s, un tiempo al pico de 3,00 s con un tiempo de asentamiento de 3,00 s, sin variación apreciable ante la carga. Sin embargo, el error en estado estacionario crece de manera lineal, alcanzando desde 90 RPM hasta 250 RPM, lo cual evidencia la ausencia de corrección por falta de retroalimentación y la dependencia directa del valor de referencia.

El control en lazo cerrado garantiza una regulación precisa con errores casi nulos, aunque

a costa de mayores tiempos de asentamiento y una ligera variabilidad en el pico transitorio. El lazo abierto ofrece respuestas temporales más rápidas y consistentes, pero carece de capacidad de corrección, resultando en errores estacionarios significativos que aumentan con la referencia.

5.3. Análisis de Funcionamiento

La implementación presentada integra una interfaz gráfica desarrollada en Python con control dinámico sobre un sistema físico basado en Arduino, mostrando en tiempo real la velocidad del motor. El código emplea una estructura organizada en torno a la biblioteca tkinter para la interacción de HMI, la aplicación incluye modos de operación como lazo abierto y lazo cerrado, así como un filtro IIR que suaviza las mediciones de RPM en la gráfica. Este diseño modular favorece la integración de controladores más avanzados y puede escalarse fácilmente para incluir modelos más complejos. El Predictor de Smith es especialmente útil cuando el sistema controlado que presenta retardo muerto, en casos donde el sensor entrega la información de velocidad con desfase o el actuador introduce latencia. El Predictor de Smith permite compensar ese retardo mediante un modelo interno del sistema sin retardo, mejorando así la estabilidad y capacidad de respuesta del controlador. En aplicaciones reales, este enfoque resulta muy util en procesos térmicos industriales (como hornos de resistencia), líneas de producción con transporte de material, control de nivel en tanques conectados por tuberías, o en telecomunicaciones donde los retardos de red afectan la retroalimentación. Su integración en plataformas embebidas de bajo costo como Arduino abre oportunidades didácticas y prototípicas de alto valor técnico.

5.4. Fichas Técnicas

5.4.1. Laboratorio 1

El laboratorio 1 permite identificar y conectar el sistema de ensayo de lazos de control de motores trifásicos. En la Fig. **5.21** del Anexo B, se encuentra en código QR que permite acceder al archivo del laboratorio.

5.4.2. Laboratorio 2

En el laboratorio 2 se busca analizar y verificar los modos de operación del sistema de ensayo de lazos de control de motores trifásicos. En el Anexo B, la Fig. **5.23**.

CONCLUSIONES

Se desarrolla un sistema funcional y didáctico para realizar ensayos de lazos de control de motores trifásicos, el cual integra adecuadamente un microcontrolador, un variador de frecuencia y una interfaz gráfica. Esta plataforma permite visualizar, controlar y evaluar el comportamiento del sistema bajo distintos modos de operación, constituyéndose en una herramienta valiosa para la formación práctica en control automático.

El análisis de sistemas en lazo cerrado mediante dispositivos programables evidencia mejoras significativas en la precisión y estabilidad del control, particularmente con la implementación del predictor de Smith. El uso de microcontroladores permite gestionar de forma eficiente la retroalimentación del sistema, ajustando las variables de control en tiempo real y optimizando el rendimiento ante perturbaciones y condiciones variables de operación.

El sistema diseñado permite operar un motor trifásico en lazo abierto y cerrado, con selección de modo y velocidad (70–1600 RPM) desde una interfaz gráfica realizada en Python. Mediante el predictor de Smith, el sistema busca compensar la diferencia entre velocidad deseada y real, logrando una respuesta estable y precisa, ya que la señal medida se ajusta eficazmente a la referencia.

La implementación del sistema en condiciones reales demuestra su fiabilidad en lazo cerrado, con y sin carga. Las pruebas de laboratorio realizadas validan la capacidad del sistema para mantener un control estable, eficiente y seguro del motor trifásico, cumpliendo con los parámetros establecidos. Esto confirma su potencial para ser utilizado como un recurso educativo práctico en el ámbito de la ingeniería de control.

RECOMENDACIONES

Se debería reducir la interferencia electromagnética (EMI) en el sistema de interconexión entre el microcontrolador y el variador de frecuencia, por ello se recomienda el uso de filtros pasa-bajos, blindaje adecuado de cables y una correcta distribución de planos de tierra para minimizar el acoplamiento de ruido eléctrico entre las diferentes etapas del sistema.

Es recomendable elegir un microcontrolador con suficiente capacidad de procesamiento y compatibilidad con protocolos industriales como Modbus, CAN o SPI, optimizando la comunicación con el variador de frecuencia y garantizando una integración eficiente en sistemas de automatización más exigentes y de mayor capacidad.

Se deben realizar pruebas de funcionamiento en diferentes condiciones de carga y perturbaciones externas diferentes a las ya realizadas y evaluar el desempeño del control en lazo abierto y cerrado. Esto permitirá identificar posibles mejoras en la estabilidad, tiempo de respuesta y precisión del sistema de control.

REFERENCIAS

[1] M. A. C. Alemán and W. H. O. Tupacyupanqui, *Introducción al Análisis e Implementación de Sistemas de Control Automático*. Quito: Editorial Universitaria Abya-Yala, 1 ed., 2017. Accedido el 20 de diciembre de 2024.

[2] J. A. Herrera-Cuartas, J. Peláez-Restrepo, and N. A. Correa-Rojas, "Análisis del predictor de smith modificado," *Tecno Lógicas*, pp. 339–352, oct 2013.

[3] M. Hill, "Motores eléctricos," 2010. En línea. Disponible: https://spain-s3.mhem2.magento.prod.mheducation.com/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf, Consultado: jul. 2025.

[4] Metalhierro Manta-Ecuador, "Angulo negro." `https://metalhierro.com/producto/108-angulo-negro`, 2025. Accedido el 15 de marzo de 2025.

[5] T. A. Shifat and J. W. Hur, "An effective stator fault diagnosis framework of bldc motor based on vibration and current signals," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106968–106981, 2020.

[6] B. B. García and S. A. A. Álvarez, *De la brújula al motor eléctrico: historia, aplicaciones y experimentos sobre la teoría electromagnética*. Universidad Nacional Autónoma de México.

[7] S. Amosedinakaran, M. M. R. Paul, S. Kannan, M. Geetha, P. Anitha, and A. Bhuvanesh, "Performance analysis of battery e-vehicle system using open loop and closed loop application," *Measurement: Sensors*, vol. 31, p. 100963, Feb. 2024.

[8] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "On-line diagnosis of three-phase closed loop induction motor drives using an eigenvalue -vector approach," in *Proceedings of the*

International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 689–693, 2007.

[9] T. L. Chern, J. Chang, and G. K. Chang, "Dsp-based integral variable structure model following control for brushless dc motor drivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 53–63, 1997.

[10] I. S. Sadek and O. Yürekli, "Optimal open/closed-loop control for systems with distributed parameter," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 332, no. 1, pp. 5–19, 1995.

[11] F. Reverter, "Interfacing sensors to microcontrollers: a direct approach," in *Smart Sensors and MEMS: Intelligent Sensing Devices and Microsystems for Industrial Applications: Second Edition*, pp. 23–55, 2018.

[12] A. T. De Titulación Previo and D. T. De, "Diseño e implementación de un sistema de control vectorial por orientación de campo con realimentación de velocidad para un motor trifásico de inducción." `http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20148`, 2019. Consultado: el 13 de mayo de 2024.

[13] J. A. C. Gualotuña, "Diseño e implementación de controladores difusos basados en los métodos de inferencia de mamdani y takagi-sugeno en el plc modicon m580 para control de velocidad de un motor trifásico de inducción." `http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23349`, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2024.

[14] J. A. Hidalgo-Lopez, J. A. Sanchez-Duran, and O. Oballe-Peinado, "Method to reduce quantization error in direct interface circuits for resistive sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 23, pp. 13910–13918, 2020.

[15] J. A. Hidalgo-Lopez, O. Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, J. C. Tejero-Calado, and F. Vidal-Verdu, "Wide range calibration method for direct interface circuits and

application to resistive force sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 22956–22966, 2021.

[16] C. M. A. Aguinsaca, "Diseño e implementación de un controlador difuso lamda en el plc modicon m580 para el control de velocidad de un motor trifásico de inducción." http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23322, 2022. Consultado: el 14 de mayo de 2024.

[17] C. D. G. Misnaza, "Diseño y simulación del control por orientación de campo foc para un motor síncrono de imanes permanentes tipo blac." http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21220, 2020. Consultado: el 14 de mayo de 2024.

[18] Y. Tipsuwan, P. Sanposh, and N. Techajaroonjit, "Overview and control strategies of autonomous sailboats—a survey," *Ocean Engineering*, vol. 281, Aug. 2023.

[19] P. X. C. Delgado and P. A. P. Espinoza, "Diseño e implementación de un sistema pid para el control de nivel de un tanque desarrollado con el plc siemens s7-200: Trabajo de graduación previo a la obtención del título de ingeniero electrónico," 2009.

[20] A. Hughes, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types, and Applications*. Oxford, UK: Newnes, 4 ed., 2013.

[21] F. Anjum and N. Sharma, "Speed control of induction motor using hybrid pid fuzzy controller," *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 576, 2008. Accedido el 20 de junio de 2025.

[22] J. E. Traister, *Electric Motor Control Systems and Methods*. New York: Fairmont Press, 3 ed., 2011.

[23] A. Israr, "(pdf) principio de funcionamiento del variador de frecuencia (vfd)." https://www.researchgate.net/publication/355427260_Working_Principle_of_Variable_Frequency_Drive_VFD, 2025. Accedido el 12 de mayo de 2025.

[24] LibreTexts Español, "9.2: Control de p, i, d, pi, pd y pid." https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenieria_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Controles_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID, oct 2022. Accedido el 20 de junio de 2025.

[25] J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, "Dead-time compensators: A survey," *Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 407–428, 2008.

[26] C. Grimholt, "Should we forget the smith predictor," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 769–774, 2018.

[27] F. E. U. Reis, K. P. Santos, B. C. Torrico, P. P. Praça, R. P. T. Bascope, and T. R. F. Neto, "Filtered smith predictor applied to a boost converter for minimizing the effect of non-minimal phase and rejection of disturbances," in *Proc. Conf. on Control and Modeling (CCM)*, pp. 5–10, 2017.

[28] L. Gómez, *Comparación del desempeño de un Predictor de Smith frente a un PID convencional en la planta de fabricación de kumis del PIAI*. PhD thesis, Universidad del Cauca, 2022.

[29] M. Fernández, "Integracion de sistemas de automatizaciÓn industrial."

https://blogsaverroes.juntadeandalucia.es/depaelca/files/2019/12/Unidad-5-VARIADOR-FRECUENCIA.pdf, sep 2019. Accedido el 18 de mayo de 2025.

[30] M. Rashid, *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications*. Oxford: Academic Press, 4 ed., 2014.

[31] M. Banzi and M. Shiloh, *Getting Started with Arduino*. Sebastopol, CA, USA: Maker Media, 3 ed., 2014.

[32] J. Boxall, *Arduino Workshop: A Hands-On Introduction with 65 Projects*. San Francisco, CA, USA: No Starch Press, 2013.

[33] Arduino, "Software." https://www.arduino.cc/en/software/, 2025. Accedido el 15 de enero de 2025.

[34] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 3 ed., 1995.

[35] D. Patranabis, *Instrumentation and Control Systems*. New Delhi, India: McGraw-Hill, 2 ed., 2013.

[36] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 7 ed., 2015.

[37] D. Electronics, "Delta vfd-el vfd007el21a," jul 2025. Consultado: jul. 2025.

[38] D. Electronics, *VFD-EL Serie Manual del Usuario*. ManualsLib, 2019.

[39] Transtecno, *Transtecno TS 6334 Installation, Use and Maintenance Instruction*. ManualsLib, 2019.

[40] Electropreguntas, “Conexión delta en motores: Aspectos esenciales a considerar,” 2025. En línea. Disponible: https://electropreguntas.com/todo-sobre-la-conexion-delta-de-motores/, Consultado: jul. 2025.

[41] Sharvielectronics, “E38s6g5-600b-g24n photoelectric incremental rotary encoder,” 2025. En línea. Disponible: https://sharvielectronics.com/product/e38s6g5-600b-g24n-photoelectric-incremental-rotary-encoder/, Consultado: jul. 2025.

ANEXOS

Anexo A: Programación en Arduino y Python



Fig. 5.21. Código QR de GitHub

Anexo B: Prácticas de Laboratorio



Fig. 5.22. Código QR del Laboratorio 1



Fig. 5.23. Código QR del Laboratorio 2

Anexo C: Ensamble

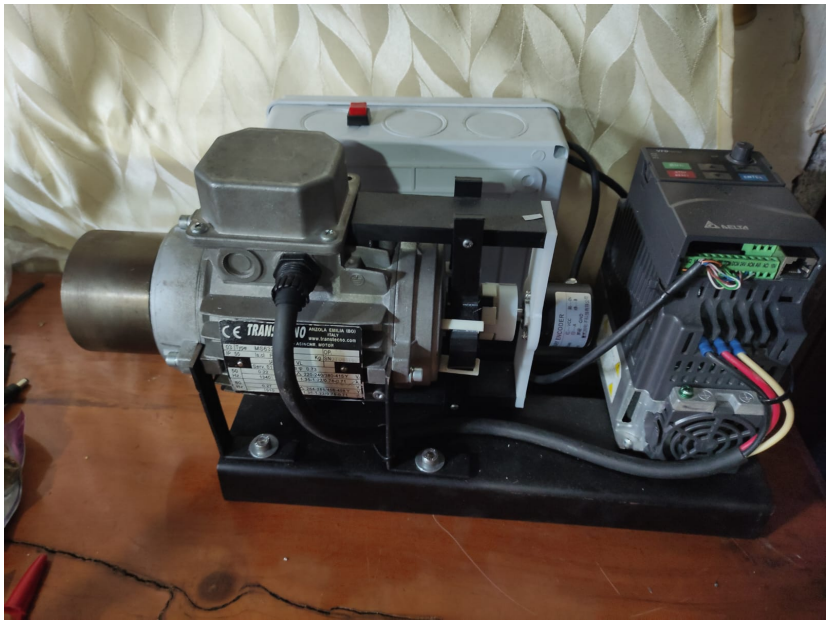


Fig. 5.24. Prototipo