



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC,
VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:
JOSÉ GUILLERMO MORALES CÓRDOVA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. REYMUNDO RAMÍREZ BETANCOUR

EN CODIRECCIÓN DE:
DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO

CUNDUACÁN, TABASCO, JUNIO DE 2025

Declaración de Autoridad y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 04 de Junio del año 2025, el que suscribe **José Guillermo Morales Córdova** alumno del programa de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** con número de matrícula **192D23036**, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título **Ingeniero Mecánico Electricista** y titulada **CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC, VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32** dirigida por el Dr. Reymundo Ramírez Betancour y el Dr. Fredy Alberto Valenzuela Murillo.

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 04 de Junio del 2025.

José Guillermo Morales Córdova

CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC, VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.coursehero.com Internet	101 palabras — 1%
2	fr.scribd.com Internet	88 palabras — 1%
3	docplayer.es Internet	42 palabras — 1%
4	hdl.handle.net Internet	41 palabras — 1%
5	pt.scribd.com Internet	38 palabras — < 1%
6	www.oalib.com Internet	37 palabras — < 1%
7	www.scribd.com Internet	33 palabras — < 1%
8	worldwidescience.org Internet	30 palabras — < 1%
9	cathi.uacj.mx Internet	28 palabras — < 1%
10	idoc.pub Internet	28 palabras — < 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0680/2025
FECHA: 27 de mayo de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. JOSÉ GUILLERMO MORALES CÓRDOVA

PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. REYMUNDO RAMÍREZ BETANCOUR y el DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO, titulado:

"CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC, VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32".

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA-377
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL
FECHA: 20 DE MAYO DE 2025
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/377/ID377/2025

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

**"CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC,
VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32"**

Desarrollado por el C. JOSÉ GUILLERMO MORALES CÓRDOVA de la Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

**M.C. JULIO CÉSAR RAMÍREZ
HERNÁNDEZ**
Revisor

DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR
Revisor

M.C. IVÁN OLÁN BRITO
Revisor

DR. LENIN RAMOS CANTÚ
Revisor

DR. HUMBERTO NOVEROLA GAMAS
Revisor

DR. REYMUENDO RAMÍREZ BETANCOUR
Director de Trabajo Recepcional

DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO
Co-Director de Trabajo Recepcional

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 04 de Junio del 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **CONTROLADOR INALÁMBRICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN PLC, VFD Y SISTEMA EMBEBIDO ESP32.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



José Guillermo Morales Córdova



Dr. Reymundo Ramírez Betancour



Dr. Fredy Alberto Valenzuela Murillo

TESTIGOS



Santama García Hdez.



Jose Mauricio Rodríguez Voborio

Dedicatoria

A MIS PADRES, POR SU AMOR Y APOYO INCONDICIONAL

A MIS HERMANOS, COMPAÑEROS DE VIDA Y LUCHA

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Mexico.

Agradecimientos

AGRADEZCO A DIOS POR DARME LA FUERZA
Y SABIDURÍA PARA ALCANZAR ESTA META.

A MI FAMILIA QUE HA SIDO UN PILAR
FUNDAMENTAL EN CADA PASO DE MI VIDA.

A MIS AMIGOS POR LOS MOMENTOS CONVIVIDOS Y
POR SER UN RECORDATORIO CONSTANTE DEL
EQUILIBRIO ENTRE LA VIDA PERSONAL Y EL TRABAJO.

AGRADEZCO AL DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO Y
AL DR. REYMUNDO RAMÍREZ BETANCOUR, CUYO
CONOCIMIENTO Y ORIENTACIÓN ME GUIARON DURANTE
TODO EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.

A LOS MAESTROS, POR COMPARTIR SU CONOCIMIENTO Y
VOCACIÓN, MIS MAS SINCERO RESPETO Y GRATITUD.

EXPRESO MI MÁS PROFUNDO AGRADECIMIENTO A LA
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO (UJAT)
POR PROPORCIONARME LOS MEDIOS CIENTÍFICOS Y
TECNOLÓGICOS QUE HICIERON POSIBLE EL
DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.

Índice de contenido

Índice de figuras.....	x
1. Capítulo I. Protocolo de investigación	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Marco Teórico.....	3
1.2.1 Motor de inducción trifásico.....	3
1.2.2 Controlador Lógico Programable	4
1.2.3 Variador de frecuencia.....	5
1.2.4 Microcontrolador ESP32.....	6
1.2.5 Sistemas de control.....	7
1.3 Justificación	7
1.4 Pregunta de investigación.....	8
1.5 Hipótesis.....	8
1.6 Objetivo General.....	9
1.6.1 Objetivos Específicos.....	9
1.7 Metodología.....	9
1.8 Bibliografía.....	11
2. Capítulo II. Artículo Científico	13
2.1 Introducción.....	14
2.2 Modelado del motor de inducción.....	16
2.3 Sistema de control propuesto.....	18
2.3.1 Control maestro.....	18
2.3.1.1 PLC.....	19
2.3.1.2 Interfaz de visualización HMI.....	20
2.3.1.3 ESP32-emisor	21

2.3.2 Control esclavo	22
2.3.2.1 Filtro digital	22
2.3.2.2 ESP32-receptor	24
2.4 Pruebas experimentales	25
2.4.1 Caso 1. Escalón	27
2.4.2 Caso 2. Rampa y escalón	28
2.4.3 Caso 3. Rampa y señal cuadrada	29
2.4.4 Desempeño del filtro digital	30
2.5 Conclusiones	31
2.6 Referencias.....	32
Apéndice A	34

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de figuras

Figura 1.1 Principio de funcionamiento de un motor de inducción (Enrica, 2024).....	3
Figura 1.2 PLC SIEMENS S7-1200 AC\DC\Rly.	5
Figura 1.3 VFD YASKAWA	6
Figura 1.4 ESP32 DOIT DEKIT	6
Figura 1.5 Lazo de control cerrado.	7
Figura 2.1 Sistema de control	18
Figura 2.2 Bloque preconstruido PID	19
Figura 2.3 Interfaz de visualización HMI	20
Figura 2.4 Diagrama de bloques de la programación para el ESP32 emisor	21
Figura 2.5 Diagrama de bloques del filtro digital	23
Figura 2.6 Diagrama electrónico reductor de voltaje	24
Figura 2.7 Diagrama de bloques de la programación para el ESP32 receptor	24
Figura 2.8 Sistema de control implementado	25
Figura 2.9 Control maestro.....	26
Figura 2.10 Control esclavo	27
Figura 2.11 Seguimiento de la velocidad medida para una referencia constante	27
Figura 2.12 Voltaje de control para una velocidad deseada de 1000 r.p.m.....	28
Figura 2.13 Control de la velocidad medida ante cambios escalonados en la velocidad deseada	28
Figura 2.14 Respuesta del controlador ante cambios escalonados en la velocidad deseada	29
Figura 2.15 Respuesta dinámica de la velocidad medida con cambios progresivos en la velocidad deseada	30
Figura 2.16 Respuesta del control PID ante incrementos escalonados de la velocidad deseada	30

Figura 2.17 Pulsos para medir la velocidad del motor: (a) señal de salida del encoder,
(b) señal de salida del filtro digital 31

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1. Capítulo I. Protocolo de investigación

1.1 Introducción

En los procesos industriales es muy importante contar con un control de la velocidad de motores eléctricos, que sea confiable, preciso y a la vez eficiente. Los motores eléctricos son muy utilizados para mover o impulsar mecanismos. La falta de un control de velocidad adecuado puede llevar a un consumo ineficiente de energía, fallas de operación o un rendimiento insatisfactorio del sistema.

En la actualidad es posible controlar la velocidad de un motor trifásico gracias al avance y desarrollo de la electrónica de potencia, la electrónica digital y la computación. Existen diferentes formas de controlar la velocidad de un motor, algunos de los cuáles se basan en pruebas de laboratorio para determinar los parámetros del motor, los cuáles son introducidos en un modelo matemático para el diseño de control. Este método es muy efectivo, sin embargo, requiere de mucho tiempo para su implementación, otros controles ocupan de una plataforma de procesamiento de señales digitales de alto desempeño (DSP), que cuentan con gran capacidad de memoria y cálculo para el procesamiento de las señales, por lo que el control tiene una velocidad de respuesta muy alta. Sin embargo, estas plataformas DSP de alto desempeño son muy costosas y requieren de un nivel elevado de programación.

En este contexto, como alternativa a los controladores basados en DSP, en años recientes se han reportado en la literatura diversos trabajos basados en controladores lógicos programables convencionales para el control de motores eléctricos con la finalidad de reducir costos y tiempo de implementación. En Rodríguez et al., (2024) se presenta un sistema de control que utiliza una red de comunicación Modbus y dispositivos industriales como controladores lógicos programables (PLC), para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico basado en la técnica de control proporcional (P) y proporcional-integral (PI). Otros tipos de controladores, como el que presentan en (Morales et al., 2023), emplean un control inteligente basado en un algoritmo de aprendizaje para análisis de datos multivariados (LAMDA) para controlar la

velocidad de un motor de inducción trifásico. Este controlador utiliza dispositivos PLC y variadores de frecuencia (VFD) que permite optimizar y mejorar el tiempo de respuesta en estado transitorio y estable frente a otros controladores tradicionales como PID, y control difuso aun cuando el sistema es sometido a perturbaciones. Otros controladores muestran una comunicación más eficiente, basada en el protocolo Profibus (Maestro/esclavo), entre el PLC y el VFD a través del módulo de comunicación CM1214RS232 para controlar y monitorear la velocidad de un motor de inducción (Seyfettin et al., 2022). Además, Tepe et al., (2019) implementaron un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) para analizar el comportamiento de la velocidad del motor de inducción con y sin perturbación para diferentes velocidades. En (Quezada et al., 2018) se presenta el monitoreo y control de la velocidad de un motor de inducción en tres modos (velocidades preestablecidas, lazo abierto y cerrado) empleando un PLC, interfaz hombre-maquina (HMI) y un VFD. Otros autores como Grijalva y Sanchez (2018) implementaron una red de control industrial basado en un sistema PLC-HMI-VFD utilizando tres tipos de comunicación (Profinet, Modbus, comunicación serial) y otros dispositivos no industriales para controlar y monitorear la velocidad de un motor de inducción en lazo abierto, todo esto con el fin comunicar diferentes dispositivos tanto industriales como no industriales.

De acuerdo con los trabajos antes mencionados, existe diferentes procedimientos para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico utilizando el sistema PLC-VFD. Sin embargo, ninguno de los trabajos citados emplea un control de lazo cerrado de forma inalámbrica, lo cual es necesario para hacer más fácil la reubicación de los dispositivos, reducir los procedimientos de instrumentación, menor complejidad en el cableado, reducción de costos de instalación, una fácil integración a internet de las cosas (IoT), separar físicamente la parte de control de la parte de potencia y contar con un acceso remoto para monitorear las variables de control. En este sentido, en la presente investigación, se propone la implementación de un sistema de control de velocidad para un motor trifásico de bajo costo utilizando un PLC SIEMENS, un VFD YASKAWA, y dispositivos embebidos (ESP32) para la comunicación inalámbrica. De esta manera, el controlador propuesto puede ser aplicable en procesos industriales utilizando componentes convencionales, lo cual permitirá reducir el tiempo y costos de

implementación, además permite la comunicación inalámbrica a distancia entre dispositivos digitales.

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Motor de inducción trifásico

El motor de inducción es una máquina eléctrica capaz de transformar la energía eléctrica en mecánica, cuando se le aplica un voltaje trifásico al estator de un motor de inducción trifásico se genera un campo magnético giratorio, este induce una corriente eléctrica en el rotor que a su vez produce un campo magnético giratorio (ver Figura 1). La interacción entre estos dos campos genera un par mecánico en el eje del motor lo cual provoca que la flecha gire (Telcom, 2023).

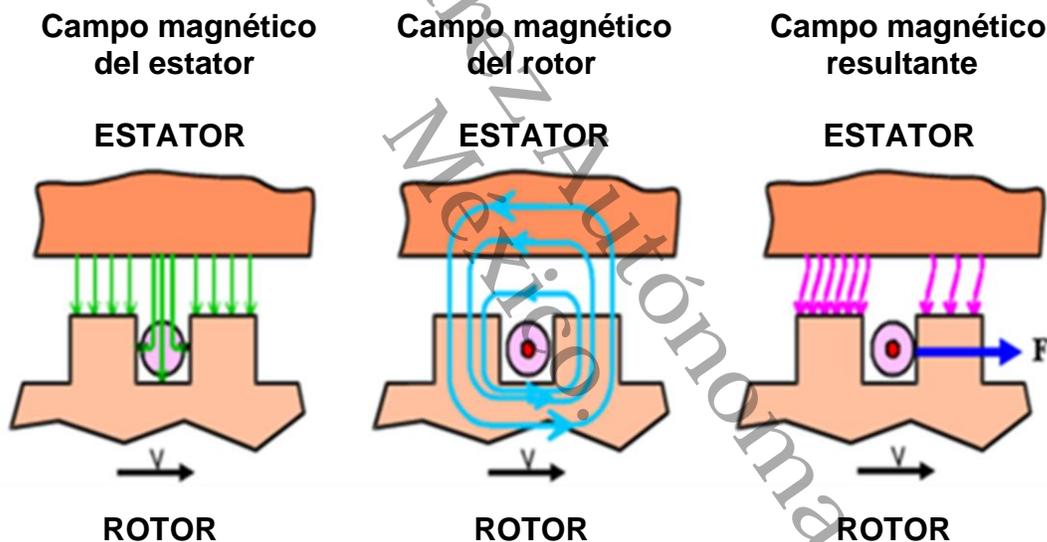


Figura 1.1 Principio de funcionamiento de un motor de inducción (Enrica, 2024).

El modelo de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla se representa mediante un conjunto de ecuaciones dinámicas. En términos de vectores espaciales (Salazar y Aros, 2018), con marco de referencia fijo en el estator estas ecuaciones son:

$$\begin{aligned}
 \vec{V}_s &= \frac{d\vec{\lambda}_s}{ds} + R_s \vec{i}_s + j\omega_e \vec{\lambda}_s & \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} &= T_e - T_l \\
 \vec{V}_r &= \frac{d\vec{\lambda}_r}{dr} + R_r \vec{i}_r + j(\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_r & T_e &= \frac{3}{2} p R_e \{ \vec{\lambda}_s \vec{i}_s \} \\
 \vec{\lambda}_s &= L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r & \vec{\lambda}_r &= L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde:

\vec{V}_s Voltaje estator	\vec{V}_r Voltaje rotor	L_m Inductancia mutua
$\vec{\lambda}_s$ Flujo estator	$\vec{\lambda}_r$ Flujo rotor	T_e Torque electromagnético
R_s Resistencia estator	R_r Resistencia rotor	T_l Torque de carga
\vec{i}_s Corriente estator	\vec{i}_r Corriente rotor	p Pares de polos
ω_e Velocidad estator	ω_r Velocidad rotor	J Inercia de rotor
L_e Inductancia estator	L_r Inductancia rotor	

1.2.2 Controlador Lógico Programable

El Controlador Lógico Programable (PLC, Programmable Logic Controller) son computadoras industriales que se utilizan para controlar procesos industriales mediante puertos de entradas y salidas para accionar actuadores o para recibir señales eléctricas provenientes de sensores (ver Figura 2). Al igual que una computadora puede procesar información realizando operaciones lógicas y matemáticas, puede almacenar programas y datos por medio de entradas y salidas para comunicarse con otros dispositivos. El PLC se programa para realizar tareas específicas que ayudan a controlar un proceso industrial (Perera, 2020).

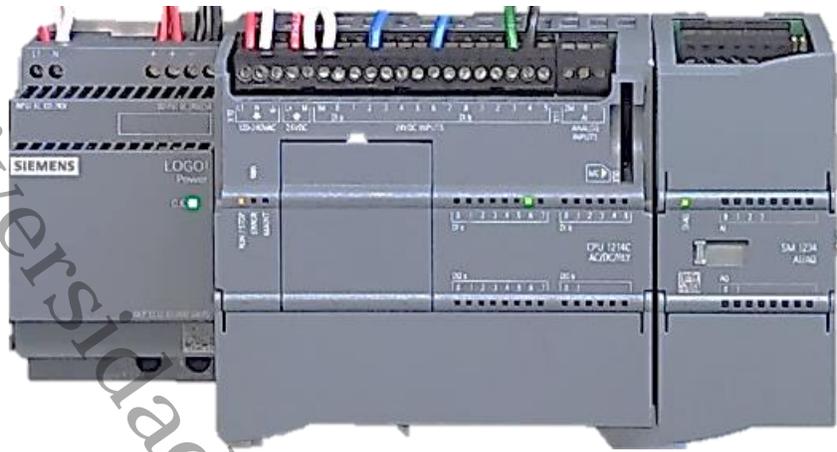


Figura 1.2 PLC SIEMENS S7-1200 AC\DC\RTly.

1.2.3 Variador de frecuencia

El variador de frecuencia (VFD, Variable Frequency Drive), es un dispositivo que permite ajustar la frecuencia de la energía que se suministra a un motor de inducción (ver Figura 3). La variación de la frecuencia de alimentación del motor produce una variación de la velocidad del campo magnético giratorio del estator. Así mismo, una variación en la velocidad del campo giratorio produce cambios en la velocidad mecánica del rotor. La variación de la velocidad del campo giratorio se relaciona con la frecuencia eléctrica por medio de la ecuación:

$$n_s = \frac{120 f_e}{P}$$

donde f_e es la frecuencia eléctrica de la fuente de alimentación del motor en ciclos por segundo (Hz); n_s es la velocidad del campo giratorio en revoluciones por minuto (rpm) y P , es el número de polos magnéticos del motor.

El funcionamiento del variador se puede describir en dos etapas principales: en la primera etapa, el voltaje de entrada de CA del VFD es convertido en un voltaje de corriente directa CD por medio de un puente rectificador de onda completa; mientras que en una segunda etapa, la energía de salida es regulada a través de un inversor de potencia que es activado por una señal de modulación de ancho de pulso (PWM)

(Peterson, 2023). Esto permite modificar la frecuencia y el voltaje de alimentación del motor.



Figura 1.3 VFD YASKAWA

1.2.4 Microcontrolador ESP32

El módulo ESP32, es un microcontrolador de bajo costo y de bajo consumo que integra una conexión Wi-Fi y Bluetooth, además de interfaces para conectarse a varios periféricos. Este módulo cuenta con 25 entradas/salidas digitales y 12 entradas además de 2 salidas analógicas (ver Figura 4). El ESP32 fue desarrollado por la empresa Espressif Systems (Beningo, 2020) y se ha vuelto muy popular en años recientes por su fácil adaptación al internet de las cosas (IoT), comunicación entre varios dispositivos ESP32, y fácil programación, entre otras.



Figura 1.4 ESP32 DOIT DEKIT

1.2.5 Sistemas de control

Dentro de los sistemas de control convencionales existen dos tipos de implementación fundamentales; control en lazo abierto y control en lazo cerrado. El método de control en lazo abierto puede o no tener un sensor que mida la variable de salida del sistema, en esta técnica, la variable de control es independiente de la medición continua de dicha variable. En el control de lazo cerrado se requiere una señal de retroalimentación basada en la medición continua de la variable de control, lo cual permite hacer correcciones instantáneas de las desviaciones de la salida del sistema de forma automática (ver Figura 5). Estos controladores de lazo cerrado se pueden implementar por medio de tarjetas electrónicas de adquisición y control, las cuales se programan para leer en tiempo real los datos proporcionados por el sensor y actuar con base en una ley de control para establecer la variable de salida de acuerdo al valor de referencia deseado (Vidal, 2023).

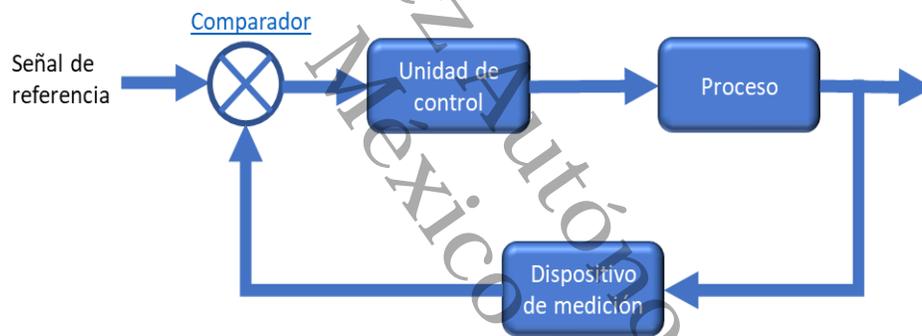


Figura 1.5 Lazo de control cerrado.

1.3 Justificación

En los sistemas industriales actuales la logística de operación tiene un papel muy importante, ya que busca reducir costos por medio de la optimización de los recursos materiales y económicos. Por lo que es de gran interés diseñar e implementar sistemas de control eficientes, flexibles, seguros y económicos. Una de las innovaciones más prometedoras en este contexto es la comunicación inalámbrica, ya que permite una mayor flexibilidad para mover diferentes dispositivos sin la necesidad de emplear cables a larga distancia. Esto hace menos complejo el cableado, lo cual se traduce en una reducción del costo de instalación; además la reubicación de equipos también permite separar la etapa de control y de potencia. De esta manera, se disminuyen los riesgos

que pueden tener los equipos y el personal encargado, también, permite monitorear y controlar las variables medidas en un sistema de manera remota.

En este protocolo de investigación se propone implementar una comunicación inalámbrica para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico empleando un PLC, un VFD convencional intercomunicado a través de un sistema embebido ESP32. Este controlador permitirá regular la velocidad de un motor de inducción utilizando comunicación inalámbrica con uso de dispositivos convencionales que son ampliamente utilizados en la industria, su costo es relativamente bajo y son de fácil disponibilidad en el mercado.

1.4 Pregunta de investigación

¿Se podrá controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico mediante un controlador PID a distancia, es decir, separar físicamente la parte de control (PLC-ESP32_Emisor) de la parte de potencia (ESP32_receptor-VDF-Motor) por medio de una red inalámbrica? ¿Qué tan rápido responderá el sistema PLC-VFD utilizando controlador PID cuando se le aplica una carga al motor de inducción? ¿En cuánto tiempo se alcanzará el estado estable?

1.5 Hipótesis

La separación física de la parte de control y potencia mediante una red inalámbrica es una solución factible y eficiente para controlar la velocidad de un motor de inducción por el avance de la tecnología en la comunicación inalámbrica permitiendo una transmisión de datos segura y confiable.

La velocidad de respuesta del control PID se determina a partir de la capacidad de procesamiento de memoria y cálculo de los dispositivos que componen el sistema de control, así como de la optimización de los algoritmos de programación para responder de manera rápida ante los cambios en las condiciones de carga del motor.

El tiempo de establecimiento de la variable de control depende en gran medida de la aplicación de una ley de control adecuada que permita responder rápidamente ante

perturbaciones externas o internas del sistema, alcanzado el estado estable en el menor tiempo posible.

1.6 Objetivo General

Implementar un control inalámbrico de velocidad de un motor de inducción trifásico utilizando un variador de frecuencia y un PLC para procesos industriales, cuya instalación sea modular y de bajo costo.

1.6.1 Objetivos Específicos

1. Desarrollar un esquema de control de velocidad de un motor de inducción trifásico utilizando un PLC, un VFD y un sistema embebido para comunicación inalámbrica.
2. Implementar el controlador propuesto utilizando software de programación Tia Portal, software de programación para ESP32, y los dispositivos PLC, VDF y sistema embebido para transmisión y recepción de datos en forma inalámbrica.
3. Analizar la eficiencia de tiempo de respuesta y de establecimiento del sistema de control de velocidad mediante la realización de pruebas experimentales para determinar la factibilidad del sistema.

1.7 Metodología

1) Revisión bibliográfica

En esta sección se busca recopilar información de trabajos realizados por otros autores, relacionados con el tema del sistema de control de velocidad de un motor de inducción trifásico. Se buscarán trabajos o artículos que involucren el diseño de control a partir de controladores lógicos programables (PLC) y variador de frecuencia (VDF).

2) Dispositivos del sistema

En este apartado se realizará una investigación bibliográfica de los principales componentes como lo son el PLC, VDF y ESP32, además del software de programación Tia Portal y ESP32 para conocer cada parte, funcionamiento y característica de los dispositivos, mediante la revisión del manual del fabricante.

3) Acondicionador de señal

La construcción e implementación de tarjetas de circuito impreso para el acondicionamiento de señales, ya que el ESP32 funciona con 3.3 voltios y el variador de frecuencia requiere de 10 voltios. Para estos se utilizará un circuito operacional en su configuración de amplificador, además para realizar las lecturas del encoder se empleará un circuito integrado buzzer para reducir el voltaje de 5 a 3.3.

4) Algoritmos de programación

Se realizará la implementación de algoritmos de programación tanto para el PLC y el ESP32. Para el PLC empleará el software Tia Portal v15 y la programación tipo escalera, mientras que el ESP32 se programará en el lenguaje Arduino basado en las librerías preestablecidas por el software.

5) Integración de los dispositivos

En esta etapa se realizará la integración de los componentes para formar el prototipo del sistema de control, para ello se utilizarán diferentes cables para conectar los dispositivos. Por un lado, el PLC y ESP32, el otro ESP32 se conectará al VDF-motor. El sistema embebido servirá como transmisor y receptor de datos para mantener la comunicación entre la etapa de potencia y la de control, por último, se realizarán pruebas del sistema.

6) Análisis de resultados

De los resultados obtenidos, se realizará un análisis crítico de las ventajas y desventajas del sistema de control implementado.

7) Conclusiones del proyecto

Con el conjunto de resultados obtenidos, se establecerán las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuro.

1.8 Bibliografía

Tepe, Cengiz & Eminoglu, Ilyas & Demir, Mehmet. (2019). EXPERIMENTAL SETUP FOR AC MOTOR SPEED CONTROL. *Journal of Scientific Perspectives*. Volume 3, Issue 3, pp. 177-188. DOI: <https://doi.org/10.26900/jsp.3.018>.

Quezada-Quezada, J. C., Flores-García, E., González-Cadena, M., Bautista-López, J., (2018). Sistema HMI-PLC-ADF- Motor CA para control de velocidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volumen 4, p.p. 1-15. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/ij.25940732e.2018.19n4.038>

Seyfettin Vadi, Ramazan Bayindir, Yigit Toplar, Ilhami Colak. (2022). Induction motor control system with a Programmable Logic Controller (PLC) and Profibus communication for industrial plants — An experimental setup, *ISA Transactions*, Volume 122, Pages 459-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.019>

Rodríguez, Martín & Jara, Ricardo & Baes, Mario & López Álvarez, Yadira & Orozco-Soto, Santos. (2024). Closed-loop Speed Control for a Three-Phase Alternating-Current Motor using a Modbus Network. *Revista Politécnica*. 54. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.33333/rp.vol54n1.03>

Guerrero Grijalva, K. N. (2018). Módulo de red de control industrial mediante profinet modbus ethernet-serial y comunicación RS-485 [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8045>

Morales, Luis & Fabara, Paúl & Pozo, David. (2023). An Intelligent Controller Based on LAMDA for Speed Control of a Three-Phase Inductor Motor. *Emerging Science Journal*. Volume 7. 676-690. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-03-01>

Salazar Heise, Fernando & Aros, Nelson. (2018). PI-FUZZY and PI Algorithm in MRAS. *IEEE International Conference on Automation/XXIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ICA-ACCA)*. Volumen 0. 1-4. DOI: [10.1109/ICA-ACCA.2018.8609854](https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609854)

TELCOM. (2023). Definición y principio de funcionamiento del motor de inducción trifásico. <https://telcomplus.org/principio-de-funcionamiento-del-motor-de-induccion-trifasico/>

Enrica. (2023). ¿Cómo funcionan los motores de corriente alterna y continua?. <https://brandcars.es/como-funcionan-los-motores-de-corriente-alterna-y-continua/>

Perera, Adrián. (2020). PLC, qué son y como funcionan. <https://automatismosmundo.com/plc-todo-lo-que-necesitas-saber/>

Peterson, David. (2023). ¿Qué es un variador de frecuencia (VFD)?. <https://control.com/technical-articles/what-is-a-variable-frequency-drive-vfd/>

Beningo, Jacobo. (2020). Cómo seleccionar y usar el módulo ESP32 con Wi-Fi/Bluetooth adecuado para una aplicación de IoT industrial. <https://www.digikey.com.mx/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module>

Vidal, Sebastian. (2023). Sistemas de control ¿Qué es? tipos, función y más. <https://tecnobits.com/sistemas-de-control-que-es-tipos-funcion-y-mas/>

2. Capítulo II. Artículo Científico

Nombre del artículo:

Control inalámbrico de velocidad del motor asíncrono utilizando el controlador lógico programable

Autores:

Morales-Córdova, J. G.^a, Ramírez-Betancour, R. ^a, Valenzuela-Murillo, F. A. ^a, Morfin-Garduño, O. A.^b

^a División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 86690, Tabasco, México.

^b Departamento de Eléctrica y Computación del Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. 32310, Chihuahua, México.

Resumen:

En el presente artículo se propone un control inalámbrico en lazo cerrado para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico, en donde se separa físicamente la etapa de control de la etapa de potencia para evitar la complejidad del cableado y altos costos de instalación. El sistema se compone principalmente de un control maestro y un control esclavo, ambos controles se comunican de forma bidireccional a través de dispositivos embebidos con comunicación inalámbrica. El control maestro recibe el valor de la medición de la velocidad y aplica la ley de control Proporcional-Integral-Derivativo para calcular el voltaje de control; mientras que el control esclavo mide la velocidad del motor y aplica el voltaje regulado al motor a través de un variador de frecuencia. El sistema de control propuesto se implementó en un prototipo en el laboratorio en donde se realizaron diversas pruebas experimentales para validar su correcto funcionamiento. Los resultados obtenidos muestran un buen desempeño del sistema de control de velocidad propuesto con el seguimiento de pulsos de la velocidad de referencia en donde se presentaron sobre impulsos y tiempos de restablecimiento muy aceptables.

Palabras clave: Motor asíncrono, controlador inalámbrico, controlador lógico programable, variador de frecuencia, dispositivo embebido.

Wireless velocity control of asynchronous motor using programmable logic controller

2.1 Introducción

Los motores trifásicos de inducción son muy utilizados para mover e impulsar mecanismos en diversos procesos industriales, por lo cual es muy importante contar con un control de velocidad del motor que sea confiable, preciso y eficiente (Vadi et al., 2022). La operación del motor de inducción sin control de velocidad puede llevar a un consumo ineficiente de energía. En la actualidad es posible controlar la velocidad de un motor trifásico gracias al avance y desarrollo de la electrónica de potencia, la electrónica digital y el procesamiento de datos.

Existen diversas técnicas de control sofisticadas y precisas para controlar la velocidad, las cuáles se basan en el modelo matemático detallado del motor. Así, para un funcionamiento efectivo de estos controles se debe determinar adecuadamente los parámetros eléctricos y mecánicos de motor. Sin embargo, la implementación de estas técnicas de control tiene un alto costo computacional. Estas dificultades han impulsado el uso de plataformas de procesamiento de señales digitales de alto desempeño (HPDS), que cuentan con gran capacidad de memoria y cálculo de procesamiento de las señales (Morfin et al., 2023). Sin embargo, estas plataformas como es el caso el kit dSPACE son muy costosas y requieren de un nivel elevado de programación. En este contexto, como alternativa a los controladores basados en dSPACE, en años recientes se han desarrollado diversos trabajos basados en controladores lógicos programables (PLC) para el control de motores eléctricos con la finalidad de reducir costos y tiempo de implementación. El PLC es un dispositivo altamente utilizado en el control de diversos procesos industriales por su robustez, procesamiento de datos, simulación y fácil programación (Rivero-Contreras et al., 2024), (De las Morenas et al., 2015), (De la Cruz et al., 2010).

El PLC se ha utilizado para regular la velocidad del motor en lazo de control abierto y cerrado. En lazo abierto, una comunicación eficiente basada en el protocolo Profibus

(Maestro/esclavo) entre el PLC y el variador de frecuencia (VFD), a través del módulo de comunicación CM1214RS232, se utiliza para controlar y monitorear la velocidad de un motor de inducción desde una interfaz de computadora (Vadi et al., 2022). De igual forma, se ha utilizado la interfaz hombre-máquina (HMI) en un sistema PLC-HMI-VFD para controlar y monitorear la velocidad de un motor de inducción, donde el VDF realiza las mediciones de los parámetros del motor y calcula la velocidad sin utilizar un encoder. Este sistema utiliza diferentes tipos de comunicación (Profinet, Modbus y comunicación serial) para comunicar todos los dispositivos. La visualización y comunicación de estos controladores resulta eficiente; sin embargo, no realizan un control de la velocidad de manera automática y no responden a perturbaciones externas (Guerrero y Mosquera, 2018).

Por otro lado, en el control de lazo cerrado se utiliza el encoder para monitorear la velocidad y un sistema PLC-VFD para regular la alimentación al motor de inducción. En (Quezada-Quezada et al., 2018) se presenta un procedimiento para el monitoreo y control de la velocidad del motor en lazo cerrado desde una HMI. El control se realiza por medio de la acción proporcional, integral y derivativo (PID), los resultados mostrados son puntuales, por lo que se requiere observar la respuesta en el dominio del tiempo para valorar su funcionamiento. En ese sentido, en (Demir et al., 2019) se implementa un controlador de PID para regular la velocidad del motor de inducción en presencia de perturbación y cambios en la velocidad de referencia. Los resultados muestran un comportamiento correcto, pero el tiempo de establecimiento es muy alto y se incrementa a medida que la velocidad de referencia aumenta. Una mejor respuesta del control de velocidad se logra utilizando una red de comunicación Modbus y dispositivos industriales PLC con las acciones de control proporcional (P) y proporcional-integral (PI) (Rodríguez et al., 2024). El controlador mantiene una alta precisión en el seguimiento de la velocidad con tiempos de respuesta adecuados. Sin embargo, el uso de dos PLCs, como solución a la interferencia en la lectura del sensor de velocidad (encoder) y la ejecución del sistema de control, incrementa el costo y hace más compleja la conexión de cables entre los dispositivos industriales. Otro controlador de velocidad de un motor de inducción trifásico se basa en un algoritmo de aprendizaje para análisis de datos multivariados (LAMDA) (Morales et al., 2023). Este controlador utiliza dispositivos PLC y variadores de

frecuencia (VFD) para optimizar y reducir el tiempo de respuesta en estado transitorio y estable, siendo efectivo en situaciones con cambio de referencia y perturbaciones. Sin embargo, el proceso de identificación de las relaciones entre las entradas y salidas del sistema (etapa de identificación) puede requerir de un adecuado y demandante entrenamiento del algoritmo de inteligencia artificial.

En el mejor conocimiento de los autores, los trabajos reportados para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico utilizando el sistema PLC-VFD requieren de conexiones físicas, ninguno emplea un control de lazo cerrado de forma inalámbrica. Este tipo de control es necesario para hacer más fácil la reubicación de los dispositivos, reducir los procedimientos de instrumentación, menor complejidad en el cableado, reducción de costos de instalación, una fácil integración a internet de las cosas (IoT) y contar con un acceso remoto para monitorear las variables de control. Así, en este artículo se propone la implementación de un sistema de control de velocidad para un motor trifásico de bajo costo utilizando un PLC SIEMENS, un VFD YASKAWA, y dispositivos embebidos (ESP32) para la comunicación inalámbrica. Para el monitoreo de las variables y el accionamiento del sistema de control se implementa una interfaz de visualización HMI. Asimismo, se diseña un filtro digital para eliminar la interferencia o ruido del sensor de velocidad utilizado. De esta manera, el controlador propuesto puede ser aplicable en procesos industriales utilizando componentes convencionales, lo cual permitirá reducir el tiempo y costos de implementación, además permite la comunicación inalámbrica a distancia entre dispositivos digitales.

2.2 Modelado del motor de inducción

El comportamiento de la máquina de inducción de jaula de ardilla en el marco de referencia ortogonal asociado al estator, permite relacionar las distintas variables eléctricas y magnéticas del sistema de una forma más simple, lo cual facilita el análisis dinámico de la máquina. Al emplear vectores espaciales, se obtiene una representación más simple del modelo del motor de inducción, como sigue (Salazar-Heise y Aros-Oñate, 2018):

$$\vec{V}_s = \frac{d\vec{\lambda}_s}{ds} + R_s \vec{i}_s + j\omega_e \vec{\lambda}_s \quad (1)$$

$$\vec{V}_r = \frac{d\vec{\lambda}_r}{dr} + R_r \vec{i}_r + j(\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (2)$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s \quad (4)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_l \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p R_e \{ \vec{\lambda}_s \vec{i}_s \} \quad (6)$$

donde los voltajes del estator y del rotor se representan como \vec{V}_s y \vec{V}_r , respectivamente, mientras que los flujos magnéticos correspondientes son $\vec{\lambda}_s$ para el estator y $\vec{\lambda}_r$ para el rotor. Las corrientes que circulan por el estator y el rotor se expresan como \vec{i}_s y \vec{i}_r y las velocidades angulares del estator y del rotor están representadas por ω_e y ω_r . Las resistencias del estator y del rotor se denotan como R_s y R_r , respectivamente. Las inductancias propias del estator y el rotor se denotan como L_s y L_r , mientras que la inductancia mutua entre ambos devanados es L_m . Finalmente, el par electromagnético producido por la maquina se representa como T_e y el par de carga o par mecánico aplicado al sistema, se denota como T_l .

La variación de la frecuencia del voltaje de alimentación al motor produce un cambio de la velocidad del campo magnético giratorio del estator. En ese sentido, una variación en la velocidad del campo giratorio produce cambios en la velocidad mecánica del rotor. Así, la velocidad del campo giratorio se relaciona directamente con la frecuencia eléctrica de la siguiente manera:

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (7)$$

donde f_e es la frecuencia eléctrica de la fuente de alimentación del motor en ciclos por segundo (Hz), n_s es la velocidad del campo magnético giratorio del estator en revoluciones por minuto (r.p.m) y P es el número de polos magnéticos.

De esta manera, el funcionamiento de un motor de inducción se basa en la relación directa entre la frecuencia de eléctrica y la velocidad del campo magnético giratorio del estator. Dado que la velocidad del rotor sigue al campo magnético del estator, modificar la frecuencia eléctrica de la fuente permite ajustar la velocidad mecánica del motor. Este principio es la base del control de velocidad en motores de inducción por medio de un variador de frecuencia (VFD) (Chapman, 2012).

2.3 Sistema de control propuesto

El esquema del control propuesto para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico se muestra en la Figura 2.1, el cual se divide en dos partes principales: control maestro y control esclavo. La conexión entre ambos controladores se realiza por medio de una comunicación inalámbrica bluetooth. De esta manera, el PLC puede ubicarse en un lugar seguro sin utilizar cables, libre de ruido y de fácil acceso para el operador.

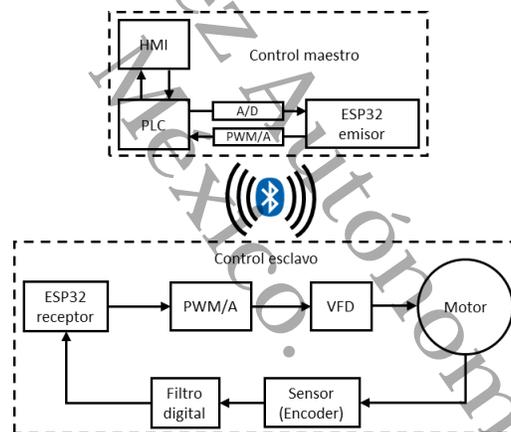


Figura 2.1 Sistema de control

2.3.1 Control maestro

El control maestro se encarga de supervisar y determinar la señal de control para regular la velocidad del motor de inducción. El control maestro, actúa como el cerebro central que envía y recibe datos del control esclavo. Este control está compuesto por una interfaz de visualización HMI, un PLC Siemens S7-1200 AC/DC/Rly con CPU 1214C, una fuente de alimentación 6EP1331-1SH03, un módulo de entradas y salida analógicas GES7234-4HE32-0XB0, y un dispositivo emisor embebido ESP32 DEVKIT V1.

2.3.1.1 PLC

La acción de control PID se ejecuta en el PLC utilizando un bloque preconstruido llamado "PID_Compact" como se muestra en la Figura 2.2.

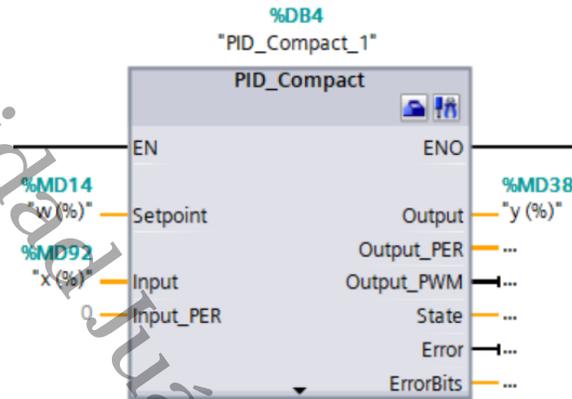


Figura 2.2 Bloque preconstruido PID

La variable "w (%)" representa la velocidad de referencia en porcentaje (%), la cual proviene de la interfaz HMI y se expresa en revoluciones por minuto (r.p.m). Es necesario realizar un escalamiento y normalización, donde 0% corresponde a 0 r.p.m y un 100% equivale a 1917 r.p.m, que corresponde a la velocidad en condiciones de operación sin carga. Por otro lado, la medición de velocidad del motor se ingresa al PLC a través del módulo entradas analógicas y posteriormente se normaliza y se escala, considerando la escala de velocidad de 0 a 1917 r.p.m, para obtener una velocidad en porcentaje ("x (%)"). A partir de la diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad medida se define el argumento del algoritmo de control PID, el cual se expresa en el dominio de Laplace como sigue:

$$y = K_p \left[(b * w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c * w - x) \right] \quad (8)$$

donde y es el valor de salida del algoritmo PID, el valor de referencia se denota como w y el valor medido del sistema es x . Los parámetros de controlador que ajustan la respuesta a los cambios en la tasa de error son: K_p es la ganancia proporcional, el término T_I corresponde al tiempo integral y T_D es el tiempo derivativo. Por otro lado, el PLC permite ponderar el impacto de las acciones de control proporcional y derivativa mediante las constantes a , b y c . El coeficiente a genera un retardo en la acción derivada,

b es la ponderación de la acción proporcional (P) y c es un factor que pondera la acción derivativa (D). Dichos factores de ponderación son especificados en un valor igual a 1 ($a = b = c = 1$).

Finalmente, la salida del controlador (y) en porcentaje se normaliza y escala para ser acondicionada como entrada al módulo del convertidor de digital/analógico (ADC).

2.3.1.2 Interfaz de visualización HMI

A través de la interfaz HMI se visualiza el desempeño de sistema de control de velocidad del motor de inducción. Mediante el software de Tia Portal v18 se realiza la visualización en la interfaz HMI, en la Figura 2.3 se identifica cada parte que la componen.



Figura 2.3 Interfaz de visualización HMI

En la parte izquierda de la interfaz HMI, se registra el valor de la velocidad de referencia y se muestra la velocidad medida del motor, ambas se presentan en revoluciones por minuto (r.p.m) y en porcentaje (%). También se muestra la señal de control en porcentaje (%). Además, se cuenta con una visualización grafica para observar el comportamiento dinámico del seguimiento de la velocidad medida respecto a la velocidad de referencia. Finalmente, se cuenta con un deslizador para asignar un valor de la velocidad de referencia y un indicador para visualizar la velocidad del motor. Así, el valor de la velocidad de referencia se puede ajustar de dos modos: manual y automático. El modo referencia automática consiste en iniciar los valores de revoluciones desde un mínimo y

alcanzar un máximo en un determinado tiempo, esto en forma de rampa. Después la referencia puede cambiar de un valor a otro en forma de señal cuadrada.

La señal de referencia especificada en la HMI llega como porcentaje a la entrada del controlador PID. El bloque PID, preestablecido en las librerías de Tia Portal, aplica la ley de control y obtiene un valor de la salida de control que se envía al ESP32-emisor por medio de una señal analógica.

Finalmente, en la esquina inferior derecha de la interfaz de visualización HMI se encuentra la sección de "adquisición de datos". Esta sección permite almacenar los valores de las variables involucradas en la pantalla en formato xlsx asignando un nombre y tiempo de muestreo para cada prueba realizada.

2.3.1.3 ESP32-emisor

El dispositivo embebido ESP32-emisor tiene la función principal de comunicarse con el ESP32-receptor para recibir el valor de la velocidad medida del motor y posteriormente enviarle la señal de control. En la Figura 2.4 se observa la lógica de programación utilizada para realizar la comunicación del ESP32-emisor.

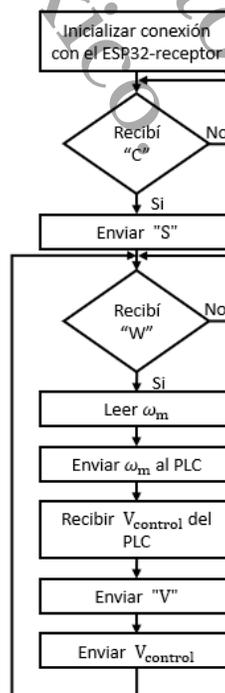


Figura 2.4 Diagrama de bloques de la programación para el ESP32 emisor

Al iniciar, el ESP32-emisor realiza la conexión inalámbrica con el ESP32-receptor. Después que la conexión se haya establecido, el emisor espera hasta que reciba el carácter "C" y consecutivamente se envía el carácter "S". Esta secuencia de caracteres sirve para garantizar la sincronización y comunicación entre los dispositivos embebidos. Posteriormente, se espera que llegue el carácter "W" para leer el valor de la velocidad medida del motor; el cual es enviado al PLC a través de un convertidor de modulación de ancho de pulso (PWM) a voltaje. A continuación, utilizando un convertidor de analógico a digital (A/D) externo se recibe el voltaje de control, determinado por la acción de control PID, proveniente del PLC. Para enviar este valor de voltaje de control al ESP32-receptor, primero se envía el carácter "V" y después el valor correspondiente. Una vez que el valor del voltaje de control se ha enviado, el ESP32-emisor regresa a esperar el carácter "W".

2.3.2 Control esclavo

La parte del control esclavo realiza las funciones de los elementos primarios y finales de control, determinando la velocidad del motor de inducción y regulando su voltaje de alimentación.

El control esclavo se compone de un variador de frecuencia YASKAWA-V1000 que alimenta a un motor inducción tipo jaula de ardilla, un encoder incremental (sensor de velocidad) de 1024 pulsos/revoluciones conectado al eje del motor y un dispositivo embebido ESP32-receptor. El accionamiento del variador de frecuencia y la lectura de los pulsos del encoder se realizan a través del ESP32-receptor y tarjetas de acondicionamiento de señales. Asimismo, se diseña un filtro digital para evitar que el ruido proveniente del encoder genere falsos conteos de pulsos y provoque mediciones de velocidad del motor erróneas.

2.3.2.1 Filtro digital

Para asegurar que las lecturas de los pulsos del encoder sean correctas, se implementa un filtro digital que permite eliminar cualquier pico de voltaje que no correspondan a un pulso del encoder. Así, se garantiza que los flancos de subida y bajada pertenezcan a la señal cuadrada (pulsos) que genera la velocidad del motor.

El filtro digital se implementa en un dispositivo embebido ESP32 dedicado exclusivamente a esta tarea, cuya lógica de programación se muestra en la Figura 2.5. El proceso comienza con la recepción de los pulsos del encoder en un pin de entrada, cuyo estado se refleja en el pin de salida. Si se presenta un cambio de estado en la entrada, la salida espera un tiempo (aproximadamente 2 μ s) antes de confirmar el nuevo estado. Si después de transcurrir el tiempo de espera el cambio en la entrada se mantiene, la salida realiza el cambio de estado; en caso contrario la salida permanece sin cambio de estado. Así se evita que los cambios instantáneos de voltaje (ruido) afecten la medición de velocidad del motor. El retardo de tiempo, generado por el filtro digital, no perjudica la medición de velocidad del motor ya que la cantidad de pulso no cambia.



Figura 2.5 Diagrama de bloques del filtro digital

Por otro lado, el encoder y el dispositivo embebido ESP32 operan a diferentes niveles de voltaje. El encoder funciona con un voltaje de alimentación de 5 V, entonces los pulsos que se generan cuando gira el eje del motor son de igual magnitud de voltaje; mientras que el voltaje de operación del ESP32 es de 3.3 V. Así, se implementa un circuito electrónico para el acondicionamiento del nivel de voltaje a 3.3 V, tal como se muestra en la Figura 2.6. Se utiliza un circuito integrado buzer SN74LS07N alimentado con 3.3 V para reducir el voltaje de los pulsos del encoder al nivel de voltaje de entrada del ESP32.

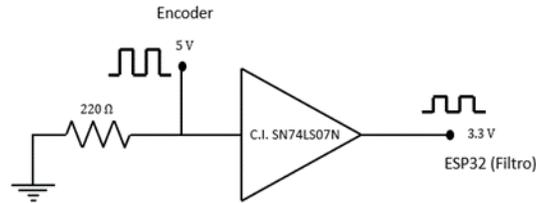


Figura 2.6 Diagrama electrónico reductor de voltaje

2.3.2.2 ESP32-receptor

El ESP32-receptor envía de forma inalámbrica la velocidad medida del motor al ESP32-emisor y recibe la señal de control proveniente del ESP32-emisor. En la Figura 2.7 se observa la lógica de programación utilizada para realizar la comunicación ESP32-receptor.

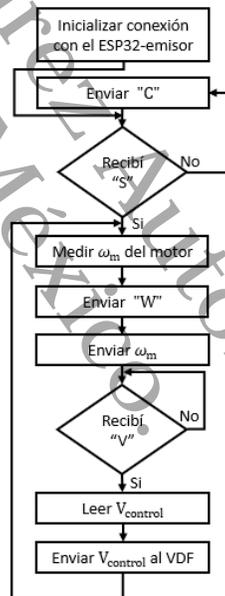


Figura 2.7 Diagrama de bloques de la programación para el ESP32 receptor

El ESP32-receptor inicia la conexión inalámbrica con el ESP32-emisor. Después que la conexión se haya establecido, el receptor envía el carácter “C” y permanece en espera hasta que reciba el carácter “S”. Consecutivamente, la velocidad del motor se mide a través del filtro digital. Para enviar este valor de velocidad al ESP32-emisor, primero se envía el carácter “W” y después el valor correspondiente. Posteriormente, se espera a llegue el carácter “V” para leer el valor del voltaje de control; el cual es enviado al VFD a

través de un convertido de PWM a voltaje. Una vez que el valor del voltaje de control se envió, el ESP32-receptor repite el ciclo desde la medición de la velocidad del motor.

2.4 Pruebas experimentales

El sistema de control de velocidad propuesto aplicado al motor de inducción se implementó en el laboratorio para validar su funcionamiento. En la Figura 2.8 se puede observar el control maestro y el control esclavo. Es importante señalar que no existe ninguna conexión física entre los dos controles, ya que la comunicación inalámbrica entre los dos dispositivos embebidos ESP32 permite enviar y recibir información entre las dos partes.



Figura 2.8 Sistema de control implementado

El control maestro (ver Figura 2.9) se compone de: un PLC (1) Siemens S7-1200 AC/DC/Rly CPU 1214C; una Pantalla HMI (2) de visualización TP1500 Comfort; y un dispositivo embebido ESP32 DEVKIT V1 emisor (3) con sus convertidores de PWM/V LC-LM358-PWM2V y ADC ADS1115. El PLC cuenta con una fuente de alimentación 6EP1331-1SH03 y un módulo de entradas y salida analógicas GES7234-4HE32-0XB0.

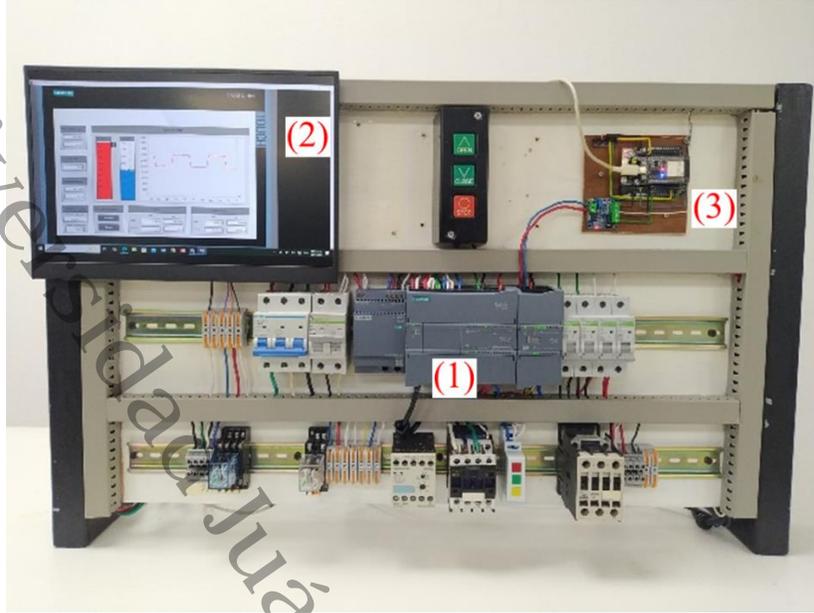


Figura 2.9 Control maestro

Por otro lado, la Figura 2.10 muestra los elementos que forman parte del control esclavo: un dispositivo embebido ESP32 DEVKIT V1 receptor (1) con un convertidor de PWM/DAC LC-LM358-PWM2V, un filtro digital (2) basado en el ESP32 DEVKIT V1, un variador de frecuencia (4) Yaskawa V1000 modelo CIMR-VU2A0004FAA conectado a una fuente de alimentación (3) de corriente alterna trifásica Lab-Volt, un motor de inducción trifásica (5) de 0.25 HP a 1750 RPM equipado con un encoder incremental de 1024 pulsos por revolución y un dinamómetro (6) Lab-Volt de 200 W para aplicar el par mecánico al motor.

Para validar el correcto funcionamiento del sistema de control propuesto se realizan tres casos de estudios, en los cuales las ganancias del bloque PID preconstruido se ajustan a los siguientes valores: $K_p = 0.255$, $T_I = 0.1 s$ y $T_D = 0.1 s$. Asimismo, se muestra el desempeño del filtro digital propuesto para eliminar el ruido de la señal del encoder.

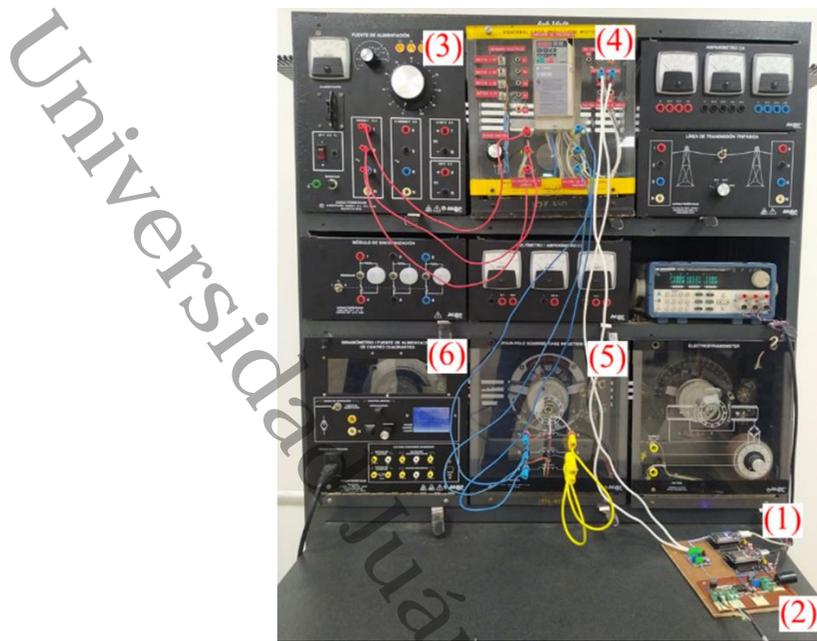


Figura 2.10 Control esclavo

2.4.1 Caso 1. Escalón

En el primer escenario de estudio, se considera una velocidad deseada de 1000 r.p.m para observar el comportamiento del controlador. Dicho escalón en la señal de referencia se aplica a los 3 s, tal como se muestra en la Figura 2.11. Adicionalmente, como una perturbación externa se aplica un par mecánico de 0.6 N·m a los 14 s con una duración de 11 s.

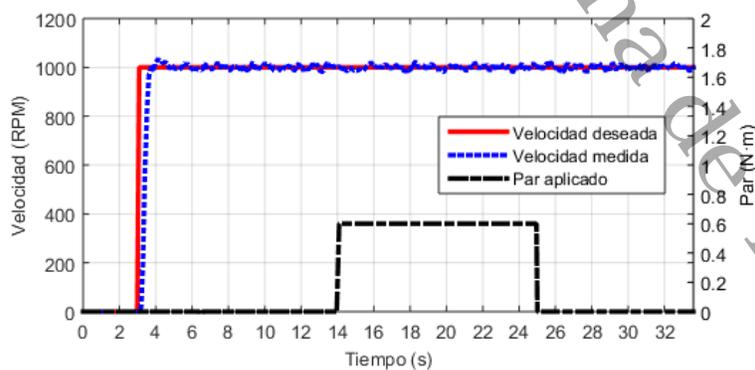


Figura 2.11 Seguimiento de la velocidad medida para una referencia constante

Al ocurrir el cambio en la señal de referencia, el controlador ejecuta la acción de control para obtener un voltaje de control que permita regular la velocidad del motor. Se puede

observar que la velocidad del motor sigue la señal de referencia con un tiempo de establecimiento de 2 s aproximadamente y un sobre impulso de 3.4 % (ver Figura 2.11). Asimismo, la velocidad del motor no se ve afectada por el cambio de par mecánico aplicado. Esto se debe a que el controlador modifica el voltaje de control para mantener la velocidad en el valor de referencia. En la Figura 2.12 se muestra la evolución del voltaje de control determinado por el controlador PID. Se aprecia que el valor de voltaje se incrementa durante la aplicación del par mecánico al motor, de 14 s a 25 s.

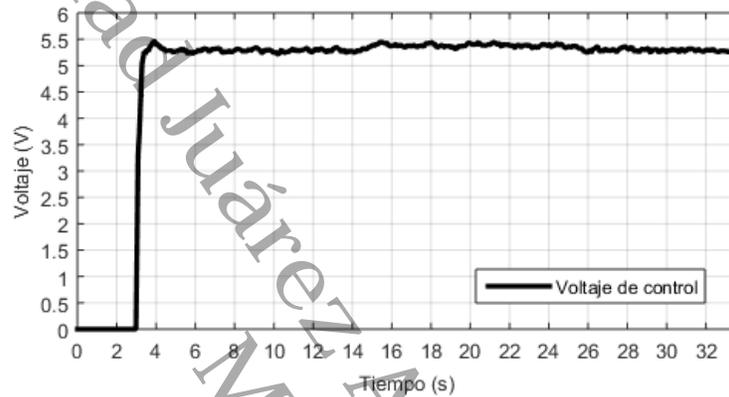


Figura 2.12 Voltaje de control para una velocidad deseada de 1000 r.p.m

2.4.2 Caso 2. Rampa y escalón

Para este caso de estudio, la velocidad deseada cambia a los 5 s. Se aplica una forma escalonada de 0 a 800 r.p.m durante 8 s y posteriormente se agrega un escalón de 600 r.p.m alcanzando las 1400 r.p.m a los 13 s, tal como se muestra en la Figura 2.13. Asimismo, se aplica un par mecánico al motor a los 17 s con una duración de 11s.

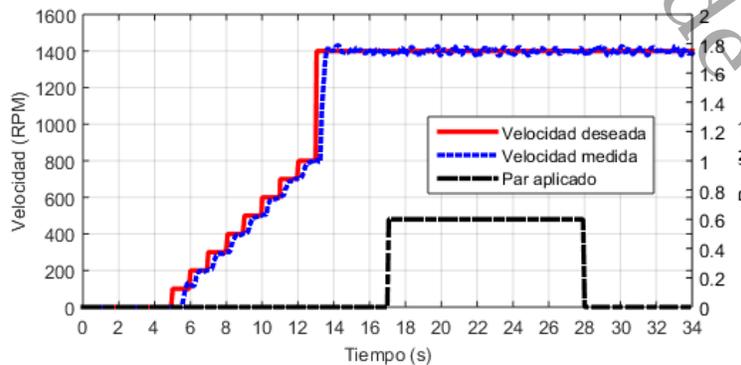


Figura 2.13 Control de la velocidad medida ante cambios escalonados en la velocidad deseada

En la Figura 2.13, se aprecia que el controlador responde a los cambios de la velocidad de referencia tanto en la rampa escalonada como en el escalón. Así, la velocidad del motor sigue muy de cerca la velocidad de referencia en todo momento y no se ve afectada por el cambio de par mecánico aplicado al motor. La respuesta de la velocidad se estabiliza con un sobre impulso de 2.27% y un tiempo de establecimiento de 2 s aproximadamente. En ese sentido, la respuesta del controlador PID se muestra en la Figura 2.14. Se aprecia que el voltaje de control responde ante los cambios de la velocidad de referencia y ante la perturbación del par mecánico.

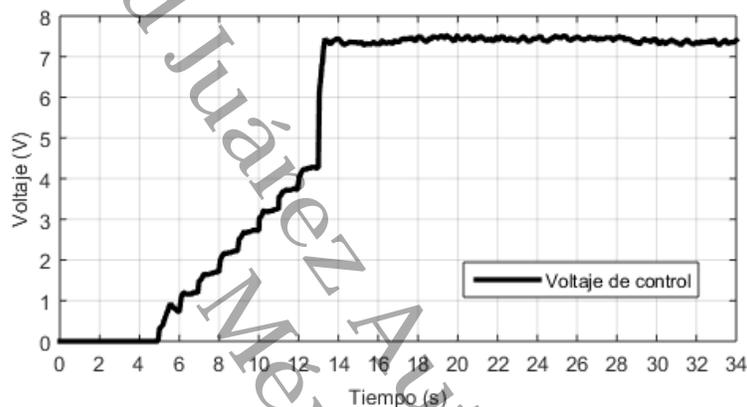


Figura 2.14 Respuesta del controlador ante cambios escalonados en la velocidad deseada

2.4.3 Caso 3. Rampa y señal cuadrada

En este caso de estudio se muestra el comportamiento del controlador propuesto en condiciones de operación nominales del motor. Para esto, la velocidad de referencia inicia el cambio de su valor a los 5 s, y se incrementa en forma escalonada de 0 a 1400 r.p.m en 9 s para evitar que el motor arranque de repentinamente. Posteriormente, a partir de los 24 s, la velocidad de referencia cambia en forma de una señal cuadrada con un periodo de 20 s; cuyos valores máximo y mínimo son 1800 r.p.m y 1400 r.p.m, respectivamente. Asimismo, en un tiempo igual a 28 s se aplica el par mecánico nominal de 0.9 N·m con una duración de 30 s.

El controlador sigue el cambio de la velocidad de referencia, como se muestra en la Figura 2.15. Se puede apreciar que a pesar de que se aplica el par nominal, la velocidad

del motor se mantiene muy cercana a la señal de referencia cuadrada. Así, el controlador logra regular la velocidad del motor en condiciones de operación nominal. En ese sentido, la Figura 2.16 muestra el comportamiento dinámico de la respuesta del controlador. Se puede apreciar que el voltaje de control cambia de acuerdo con la señal de referencia y su valor se incrementa cuando el par mecánico se aplica al motor.

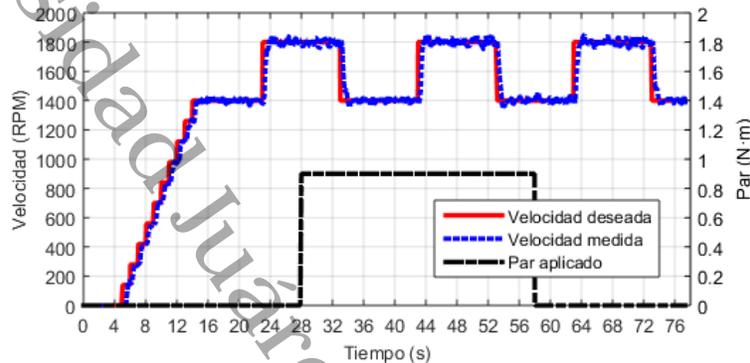


Figura 2.15 Respuesta dinámica de la velocidad medida con cambios progresivos en la velocidad deseada

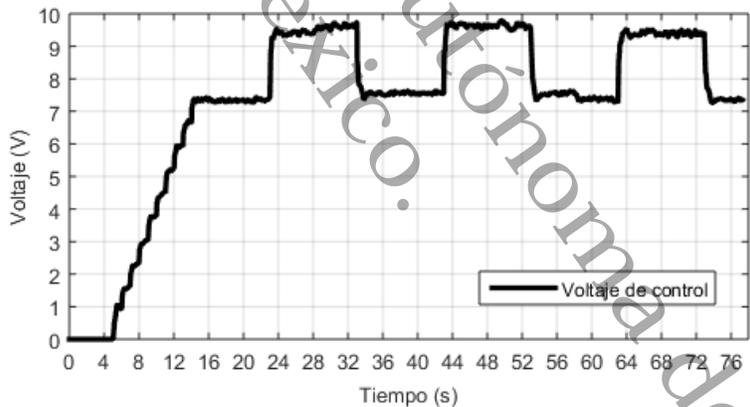


Figura 2.16 Respuesta del control PID ante incrementos escalonados de la velocidad deseada

2.4.4 Desempeño del filtro digital

La medición de la velocidad del motor se realiza a través de la señal de pulsos que proporciona el encoder K58-J6E1024BQ15. Sin embargo, tal como se puede apreciar en la Figura 2.17a, dicha señal contiene picos de voltaje tanto en los flacos de subida como de bajada. Estos cambios instantáneos de voltaje, con magnitudes consideradas como

un estado lógico alto, provocan errores en la medición de la velocidad ya que el ESP32 calcula la velocidad dependiendo del número de flacos de subida. Así, dado que este ruido se repite de forma aleatoria, la velocidad calculada directamente de esta señal presenta muchas oscilaciones y valores erróneos.

El ruido de la señal del encoder es eliminado a través del filtro digital. La Figura 2.17b muestra la señal de salida del filtro, se puede apreciar que esta señal no presenta cambios instantáneos de voltaje que puedan perjudicar el conteo de pulso. Asimismo, se observa que la señal de salida del filtro se atrasa con respecto a la señal del encoder. Dicho retraso depende del tiempo de espera que se asigne al filtro, para este caso es de $2 \mu\text{s}$.

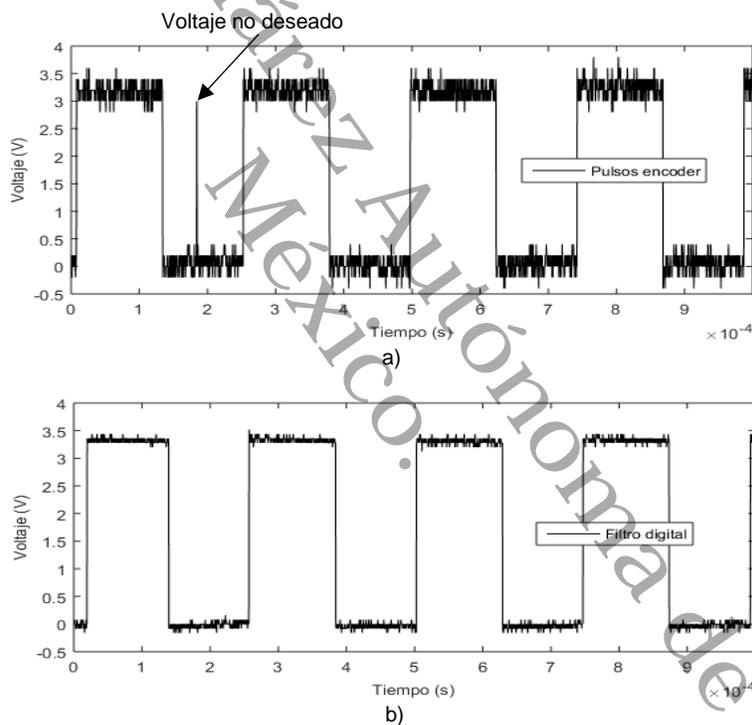


Figura 2.17 Pulsos para medir la velocidad del motor: (a) señal de salida del encoder, (b) señal de salida del filtro digital

2.5 Conclusiones

En este trabajo se presenta un sistema de control para regular la velocidad del eje de un motor de inducción trifásico en lazo cerrado basado en la técnica de control Proporcional-Integral-Derivativo. La comunicación del controlador y el variador de frecuencia se realiza

a través de comunicación inalámbrica. El desempeño y robustez del sistema de control se evaluó con diferentes pruebas experimentales de laboratorio. El control propuesto responde adecuadamente ante cambios súbitos de la velocidad de referencia cuando el motor está detenido o se encuentra en operación. Asimismo, la respuesta del controlador muestra robustez ante perturbaciones externas, como la aplicación de par de carga al motor. En ese sentido, el controlador permite mantener la velocidad en cualquier valor deseado dentro del rango de operación del motor.

Los resultados obtenidos son satisfactorios ya que, a pesar de no haber una conexión física entre el control maestro y control esclavo, el sistema de control es capaz de llevar la velocidad medida del eje del motor a un valor deseado con un tiempo de restablecimiento de 2 s aproximadamente y un sobre impulso menor al 3.4%.

Finalmente, la implementación de la presente propuesta se realizó utilizando dispositivos de uso industrial (PLC, HMI y VFD) y dispositivos embebidos de bajo costo como el ESP32.

2.6 Referencias

1. Chapman, S. J., 2012. Maquinas eléctricas. McGraw Hill., México.
2. De la Cruz, F., Díaz-Granados, M., Zerpa, S., Giménez, D., 2010. Web-LABAI: Laboratorio Remoto de Automatización Industrial. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 7(1), 101–106, DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70013-3.
3. De las Morenas, J., García, A., Martínez, F., García, P., 2015. Implementación del Control en Planta de un Centro de Distribución Automatizado mediante Agentes Físicos y RFID. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 12, 25-35, DOI: 10.1016/j.riai.2014.11.002.
4. Demir, M. C., Tepe, C., Eminoğlu, İ., 2019. Configuración experimental para el control de velocidad del motor de ca mediante el uso de PLC. Revista de Perspectivas Científicas, 3(3), 177–188, DOI: 10.26900/jsp.3.018.

5. Guerrero, K., Mosquera, W., 2018. Módulo de red de control industrial mediante profinet modbus ethernet-serial y comunicación RS-485. Visitado en noviembre de 2024. URL: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8045>
6. Morales, L. A., Fabara, P., Pozo, D. F., 2023. An Intelligent Controller Based on LAMDA for Speed Control of a Three-Phase Inductor Motor. *Emerging Science Journal* 7, 676-690, DOI: 10.28991/ESJ-2023-07-03-01.
7. Morfín, O. A., Ruiz-Cruz, R., Valenzuela, F. A., Ramirez-Betancour, R., Castañeda C. E., Ornelas-Tellez, F., 2023. Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the induction motor velocity. *ISA Transactions* 140, 472-482, DOI: 10.1016/j.isatra.2023.06.009.
8. Quezada-Quezada, J. C., Flores-García, E., González-Cadena, M., Bautista-López, J., 2018. Sistema HMI-PLC-ADF-Motor CA para control de velocidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19 (04), 1-15, DOI: 10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.040.
9. Rivero-Contreras, R. E., Merino, A., Zamarreño, J. M., Vilas, C., Tadeo, F., 2024. Un entorno virtual con controladores lógicos programables: aplicación en evaluación de estrategias de control. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial* 22(1), 69-80, DOI: 10.4995/riai.2024.20881.
10. Rodríguez, M., Jara, R., Baes, M., López, Y., Orozco, S., 2024. Control de Velocidad en Malla Cerrada para un Motor de Corriente Alterna Trifásico utilizando una Red Modbus. *Revista Politécnica* 54(1), 25–32, DOI: 10.33333/rp.vol54n1.03.
11. Salazar-Heise, F., Aros-Oñate N., 2018. PI-FUZZY and PI Algorithm in MRAS. *IEEE International Conference on Automation/XXIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ICA-ACCA)* 0, 1-4, DOI: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609854.
12. Vadi, S., Bayindir, R., Toplar, Y., Colak, I., 2022. Induction motor control system with a Programmable Logic Controller (PLC) and Profibus communication for industrial plants — An experimental setup. *ISA Transactions* 122, 459-471, DOI: 10.1016/j.isatra.2021.04.019.

Apéndice A

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	“Controlador inalámbrico del motor de inducción basado en PLC, VFD y sistema embebido ESP32”
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	José Guillermo Morales Córdova
ORCID:	0009-0005-1560-9171
Resumen de la Tesis:	<p>En el presente artículo se propone un control inalámbrico en lazo cerrado para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico, en donde se separa físicamente la etapa de control de la etapa de potencia para evitar la complejidad del cableado y altos costos de instalación. El sistema se compone principalmente de un control maestro y un control esclavo, ambos controles se comunican de forma bidireccional a través de dispositivos embebidos con comunicación inalámbrica. El control maestro recibe el valor de la</p>

	<p>medición de la velocidad y aplica la ley de control Proporcional-Integral-Derivativo para calcular el voltaje de control; mientras que el control esclavo mide la velocidad del motor y aplica el voltaje regulado al motor a través de un variador de frecuencia. El sistema de control propuesto se implementó en un prototipo en el laboratorio en donde se realizaron diversas pruebas experimentales para validar su correcto funcionamiento. Los resultados obtenidos muestran un buen desempeño del sistema de control de velocidad propuesto con el seguimiento de pulsos de la velocidad de referencia en donde se presentaron sobre impulsos y tiempos de restablecimiento muy aceptables.</p>
<p>Palabras claves de la Tesis:</p>	<p>Motor asíncrono, controlador inalámbrico, controlador lógico programable, variador de frecuencia, dispositivo embebido.</p>
<p>Referencias citadas:</p>	<p>Página 11 y 32</p>