



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**MONITOREO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD
UTILIZANDO UN DISPOSITIVO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:
JESÚS MANUEL PÉREZ TORREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO

EN CODIRECCIÓN DE:
DR. REYMUNDO RAMÍREZ BETANCOUR

CUNDUACÁN, TABASCO, MAYO 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Villahermosa, el día 02 de Abril del 2025, el que suscribe **Jesús Manuel Pérez Torrez**, alumno del Programa de **Ingeniería Mecánica Eléctrica**, con número de matrícula **182D23087**, 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 de Ingeniero Mecánico Electricista** y titulada "**Monitoreo y control de velocidad de un motor de cd utilizando un dispositivo de control lógico programable**" dirigida por 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 02 de Abril del 2025



Jesús Manuel Pérez Torrez

MONITOREO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD UTILIZANDO UN DISPOSITIVO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.coursehero.com Internet	256 palabras — 4%
2	www.sick.com Internet	101 palabras — 2%
3	www.slideshare.net Internet	86 palabras — 1%
4	www.scielo.org.mx Internet	84 palabras — 1%
5	jupiter.utm.mx Internet	61 palabras — 1%
6	jom.es Internet	40 palabras — 1%
7	pt.scribd.com Internet	32 palabras — < 1%
8	revistas.ujat.mx Internet	31 palabras — < 1%
9	handbook.usfx.bo Internet	28 palabras — < 1%
10	cathi.uacj.mx Internet	



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/0386/2025
FECHA: 31 de marzo de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. JESÚS MANUEL PÉREZ TORREZ
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. FREDY ALBERTO VALENZUELA MURILLO y el DR. REYMUNDO RAMÍREZ BETANCOUR, titulado:

"MONITOREO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD UTILIZANDO UN DISPOSITIVO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE".

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-372
DRA' DMFM/M' LHC

Consejo de
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD PARA 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



DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL
FECHA: 24 DE MARZO DE 2025
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/372/ID372/2025

PRESENTE.

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

"MONITOREO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD UTILIZANDO UN DISPOSITIVO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE"

Desarrollado por el C. JESÚS MANUEL PÉREZ TORREZ 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. LENIN RAMOS CANTÚ
Revisor

DR. FERMIN MARTÍNEZ SOLIS
Revisor

M.C. IVAN OLÁN BRITO
Revisor

**DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ
ESCOBAR**
Revisor

**DR. FREDY ALBERTO VALENZUELA
MURILLO**
Director de Trabajo Recepcional

DR. REYMUENDO RAMÍREZ BETANCOUR
Co-Director de Trabajo Recepcional

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 01 de Abril del 2025

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "**Monitoreo y control de velocidad de un motor de cd utilizando un dispositivo de control lógico programable**".

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; entiendo y acepto el alcance del artículo en mención, de que tengo el derecho al reconocimiento como autor de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedo el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

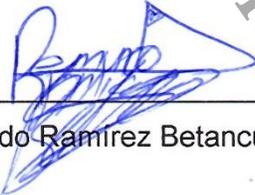
COLABORADORES



Jesús Manuel Pérez Torrez



Dr. Fredy Alberto Valenzuela Murillo



Dr. Reymundo Ramirez Betancur

TESTIGOS



Dr. Fermín Martínez Solís



Humberto Noverola Gamas

Dedicatoria

A MIS PADRES, A MI HERMANA Y A MIS
ABUELOS, QUIENES HAN SIDO EL PILAR Y
LA MOTIVACIÓN DE MI VIDA

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Agradecimientos

AGRADEZCO A DIOS POR TODAS LAS BENDICIONES RECIBIDAS DURANTE ESTE TIEMPO, ENCOMENDANDO A ÉL MI PORVENIR.

DOY LA GRACIAS A MI PAPÁ ANDRES Y MI MAMÁ LOLY, POR LOS CONSEJOS Y LAS HERRAMIENTAS QUE ME HAN BRINDADO PARA ENFRENTAR CADA RETO DE MI VIDA.

TAMBIÉN A MI HERMANA KARELI, POR AGUANTAR MIS BROMAS Y MOTIVARME A SER MEJOR, TODO PARA QUE PUEDA CONSENTIRLA; ASÍ COMO A MIS ABUELOS Y A MI FAMILIA, QUIENES ME HAN ALENTADO EN TODO MOMENTO Y A MÍ PERRITO ROCKY QUE EN LOS DIAS CANSADOS EL SIEMPRE QUIERE JUGAR.

DAR LAS GRACIAS A ESOS AMIGOS QUE ME BRINDARON SU APOYO INCONDICIONAL, POR EL TIEMPO QUE COMPARTIMOS EN LA UNIVERSIDAD, POR LOS MOMENTOS DE CONVIVENCIA, POR LAS PLÁTICAS MOTIVADORAS Y POR ESTAR PRESENTES DESDE EL PRIMER DÍA.

FINALMENTE AGRADECER A MIS DIRECTORES DE TESIS, AL DR. FREDY Y AL DR. REYMUNDO, POR SU VALIOSA GUÍA Y APOYO EN LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO

Índice de contenido	
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	ix
Capítulo 1. Protocolo	1
1.1 Introducción	1
1.2 Marco teórico	2
1.3 Justificación	6
1.4 Pregunta de investigación	6
1.5 Hipótesis	6
1.6 Objetivo general	7
1.6.1 Objetivos específicos	7
1.7 Metodología	7
Capítulo 2. Artículo Científico	10
2.1 Introducción	12
2.2 Caracterización del motor de cd	14
2.3 Diseño del control	15
2.3.1 Sintonización del controlador	16
2.3.2 Programación del controlador	18
2.3.3 Implementación del prototipo	22
2.4 Resultados experimentales	23
2.4.1 Resultados de operación del motor sin carga	25
2.4.2 Resultados de operación del motor con carga	26
2.5 Conclusiones	26
2.6 Agradecimientos	27
2.7 Referencias	27
2.8 Semblanzas de los autores	28
Apéndice A	30

Índice de tablas

Tabla 2.1 Parámetros del motor de CD.....	15
Tabla 2.2 Datos de placa del motor.....	22
Tabla 2.3 Respuesta de control del motor sin carga	25
Tabla 2.4 Respuesta de control del motor con carga	26

Índice de figuras

Figura 1.1 Revoluciones industriales (GÓMEZ, 2017)	1
Figura 1.2 Motor de corriente directa industrial (Embobinados tecnicos, s.f.)	2
Figura 1.3 PLC	2
Figura 1.4 Polos de un motor DC (Sancho, 2024)	3
Figura 1.5 Pulsos de las señales A y B (Celera Motion, 2024)	5
Figura 1.6 Lazo de control cerrado	5
Figura 1.7 Lazo de control cerrado propuesto.....	8
Figura 2.1 Circuito equivalente del motor de CD de excitación independiente	14
Figura 2.2 Controlador PID en lazo cerrado de control	16
Figura 2.3 Panel de sintonización PID.	17
Figura 2.4 Subrutina de “arranque y paro”.	18
Figura 2.5 Subrutina de “medición de velocidad”.	19
Figura 2.6 Subrutina de programación de “Setpoint”.	19
Figura 2.7 Subrutina de “Control PID”.	20
Figura 2.8 Subrutinas de programación de “Tren de Pulsos” y “SP automático”.	20
Figura 2.9 Bloque de programación “PID_Compact”.....	21
Figura 2.10 Pantalla de monitoreo y control de HMI.	22
Figura 2.11 Prototipo de sistema de control.....	23
Figura 2.12 Velocidad del motor y señal de seguimiento de referencia.	24
Figura 2.13 Cambios en el par de carga aplicado al motor.	24
Figura 2.14 Corriente de armadura del motor.	25

Capítulo 1. Protocolo

1.1 Introducción

El mundo de la automatización industrial día con día evoluciona para lograr mejores procesos sistemáticos y eficientes. Esta evolución va de la mano con la ya conocida industria 4.0 (ver Figura 1.1), también llamada “la cuarta revolución industrial”, este nuevo concepto se basa en la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos industriales, tales como, el internet de las cosas (IOT), el big data, la inteligencia artificial, robótica, entre otras. Estos sistemas permiten aumentar la productividad, la calidad y la eficiencia en muchas aplicaciones industriales (Schume, 2020).



Figura 1.1 Revoluciones industriales (GÓMEZ, 2017)

Uno de los dispositivos que permite la automatización a gran escala, son los ya conocidos PLC (Programmable Logic Controller), surgieron a partir de la tercera revolución industrial y hasta el día de hoy es uno de los dispositivos más usados y confiables del mercado. Con la implementación de la industria 4.0, la automatización y los dispositivos inteligentes empiezan a coexistir, los PLC se vuelven parte de esta transición al ser un dispositivo que permite controlar diversos procesos de automatización tales como control de bandas transportadoras, control de brazos robóticos, alarmas, control de llenado de tanque, control de motores eléctricos, entre otros; todo esto usando un sistema de control que se ajuste a las necesidades del proceso.

Dentro de los procesos controlados por los PLCs, se encuentran los que trabajan con motores de CD (ver Figura 1.2), ya que pueden funcionar continuamente sin sobrecarga, además, son usados donde el trabajo demande un alto par de arranque. Algunas de las aplicaciones de este tipo de motores podemos encontrarlas en la construcción de trenes de laminación reversibles, en máquinas trefiladoras, en máquinas elevadoras y extractoras, entre otras (Chapman, 2012).



Figura 1.2 Motor de corriente directa industrial (Embobinados tecnicos, s.f.)

1.2 Marco teórico

Un controlador Lógico Programable **PLC** (*Programmable Logic Controller*, debido a sus siglas en inglés) es básicamente una computadora que se utiliza en la ingeniería de automatización para las industrias (ver Figura 1.3), es decir, para el control de la maquinaria de una fábrica o de situaciones mecánicas (Autycom,2018).



Figura 1.3 PLC

El PLC es un dispositivo electrónico programable, que se pueden adaptar a las necesidades de la compañía o fábrica, sobre todo en las líneas de producción. Existen diferentes proveedores que ayudan a programar cada uno de estos dispositivos, con el objetivo de que funcione correctamente y resuelvan problemas específicos en la industria.

Actualmente, los PLCs se usan para aplicaciones industriales, aunque ya existen aplicaciones de uso doméstico y comercial. Estos dispositivos son capaces de mantener el control de diversos procesos y actuadores, entre ellos los motores eléctricos de corriente alterna (CA) y de corriente directa (CD). En este sentido, existen diversas aplicaciones como en máquinas giratorias y afiladoras, instalaciones transportadoras y aspiradores (Harmonic Drive SE, 2024), que requieren regular la velocidad del motor de CD mediante dispositivos programables como el PLC. Así, el motor de CD sigue siendo muy utilizado en procesos industriales.

El principio de funcionamiento de los motores eléctricos de CD, se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactuando con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje (Gajardo, 2020). Este electroimán se denomina “rotor” y su eje permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor, tal como se muestra en la Figura 1.4.

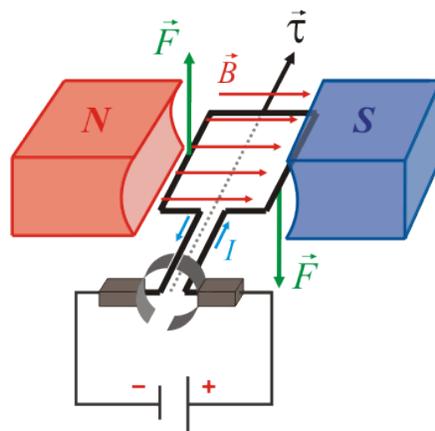


Figura 1.4 Polos de un motor DC (Sancho, 2024)

Cuando la corriente circula por la bobina del electroimán giratorio, se produce un campo magnético que interactúa con el campo magnético del imán permanente. Si los polos del imán y del electroimán están alineados, se genera una fuerza de rechazo y un torque magnético. Este torque sobrepasa la inercia del rotor, provocando que gire en una dirección u otra, según la conexión de la bobina a la fuente de alimentación. El modelo matemático que representa el comportamiento dinámico de las variables del motor está dado por (MORA, 2003):

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{K_e}{L_a}\omega - \frac{R_a}{L_a}i_a + \frac{1}{L_a}V_a \quad (1.1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\beta}{J}\omega - \frac{K_m}{J}i_a + \frac{1}{J}\tau_c \quad (1.2)$$

Donde:

V_a = Voltaje de armadura

i_a = Corriente de armadura

K_e = Constante eléctrica

R_a = Resistencia de armadura

L_a = Inductancia de armadura

τ_c = Par de carga

ω = Velocidad angular del rotor

J = Momento de inercia

β = Coeficiente de rozamiento viscoso

K_m = Constante torque

Para la mayoría de las aplicaciones de control de velocidad del motor de CD en lazo cerrado se requiere medir la velocidad del rotor. Así, para controlar la velocidad del motor mediante el PLC es necesario el uso de sensores como los encoders incrementales.

Los encoders incrementales proporcionan información sobre la posición, el ángulo y las revoluciones, tal como se muestra en la Figura 1.5. El número de pulsos por vuelta que el encoder transfiere al controlador determina la posición, el ángulo y las revoluciones. El control calcula la posición actual contando estos pulsos, y gracias al gran número de variantes, los encoders incrementales se pueden adaptar de forma óptima a las aplicaciones de la automatización industrial, logística y de procesos (SICK, 2023). Los encoders incrementales ofrecen información sobre el sentido de la marcha y la velocidad

de los sistemas de transporte sin conductor. Para ello, estos encoders pueden montarse directamente en el motor, en un eje o en una rueda rotativa.

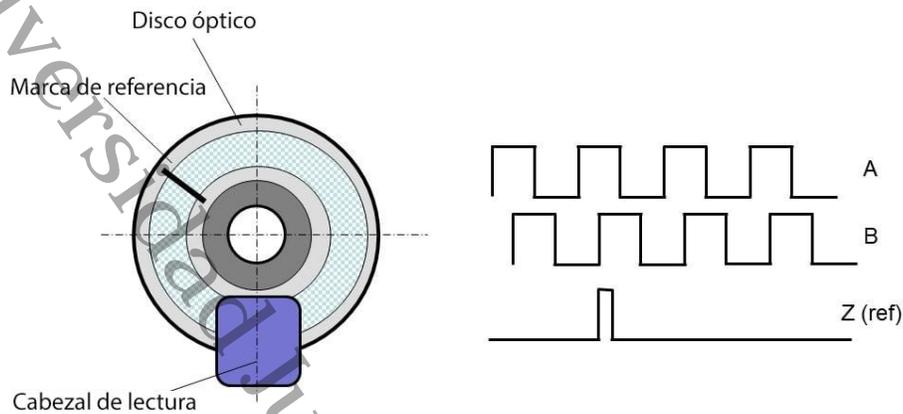


Figura 1.5 Pulsos de las señales A y B (Celera Motion, 2024)

El encoder en sistemas de control de velocidad de lazo cerrado proporciona retroalimentación precisa sobre la posición y velocidad del motor. Convierte el movimiento en señales eléctricas que el controlador utiliza para ajustar la velocidad del motor y mantenerla en el valor deseado. En la Figura 1.6 se muestra un esquema de un lazo cerrado típico, el cual es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones industriales. Un sistema de control de lazo cerrado, también conocido como sistema de control de realimentación, utiliza una señal de retroalimentación para comparar el resultado deseado con el resultado actual y ajustar el proceso en consecuencia. Esto permite una mayor precisión y estabilidad en comparación con los sistemas de control de lazo abierto (CA, 2019).

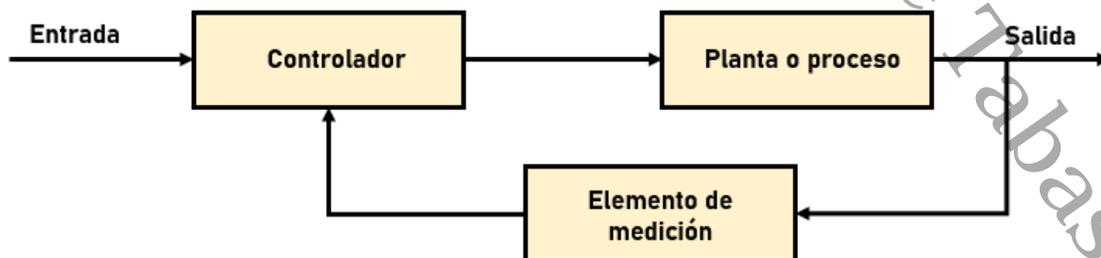


Figura 1.6 Lazo de control cerrado

1.3 Justificación

El mundo de la automatización industrial día con día va en crecimiento pues su futuro es realmente prometedor para el desarrollo de las grandes empresas, su objetivo es aumentar la producción y dirigir a la empresa hacia una mayor producción en virtud de las grandes facilidades que representa y lo mucho que agilizará los procesos (JOM, 2018). Así, las empresas tienen la necesidad de contar con sistemas de control robustos, confiables, eficientes y económicos para el desarrollo de productos industriales. Los PLCs son uno de los dispositivos más utilizados en la automatización industrial, en conjunto con los motores eléctricos de CD y los sensores permiten conocer diversos parámetros de manera óptima y efectiva. En este sentido, es necesario diseñar estrategias de control eficientes de los motores de CD a través de PLC, sensores de velocidad y dispositivos de comunicación Hombre-Máquina. Así, este control permitirá, de forma sencilla, que el operador del proceso industrial visualice la variable de control y realice el ajuste necesario de los parámetros requeridos.

1.4 Pregunta de investigación

¿La implementación de un controlador PID en plataforma de control lógico programable (PLC), permitirá un mejor desempeño y monitoreo de las variables de control y parámetros de motores de CD?

1.5 Hipótesis

Un controlador automático de velocidad basado en PID, e implementado en un dispositivo programable PLC Simatic S7 1200, será capaz de mejorar el desempeño, monitoreo, diagnóstico y protección de motores eléctricos de CD.

1.6 Objetivo general

Diseñar un sistema de control de velocidad de un motor de CD mediante el uso de controladores lógicos programables (PLC) para aplicaciones industriales en el área de automatización.

1.6.1 Objetivos específicos

- Revisión de documentos relacionados con el diseño de sistemas de control de velocidad de un motor de CD para aplicaciones industriales
- Establecer el diseño de sistemas de control mediante el uso del software para PLC TIA PORTAL V15
- Simular e implementar el sistema de control usando un modelo físico de PLC.
- Analizar los resultados obtenidos en la implementación para determinar la confiabilidad del modelo desarrollado

1.7 Metodología

1) Revisión bibliográfica:

En esta sección se busca recopilar información de trabajos realizados por otros autores, relacionados con el tema seleccionado. Se buscarán trabajos o artículos que involucren el diseño de control a partir de controladores lógicos programables (PLC), y en especial los que cuenten con sensores para el control y medición de diversos parámetros.

2) Diseño del sistema de control:

En el mundo de la automatización existen dos tipos de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. En este trabajo se utilizará un sistema de lazo cerrado integrado por un encoder, PLC, una computadora y

tarjetas de acondicionamiento de señales y el motor de CD, tal como se muestra en la Figura 1.7.

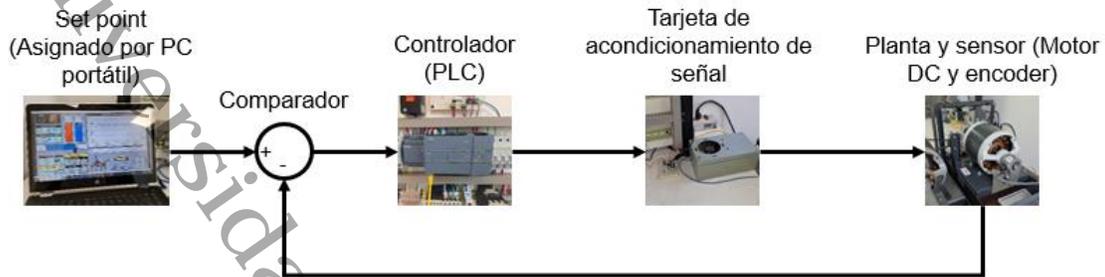


Figura 1.7 Lazo de control cerrado propuesto

3) Familiarización con software TIA PORTAL V15:

Para el diseño de control, se trabajará mediante la programación del PLC. Por ello, se establecerá un tiempo definido para el reconocimiento del programa encargado de ello (Figura 1.8), así como, también se revisarán manuales y videos para una mejor familiarización.

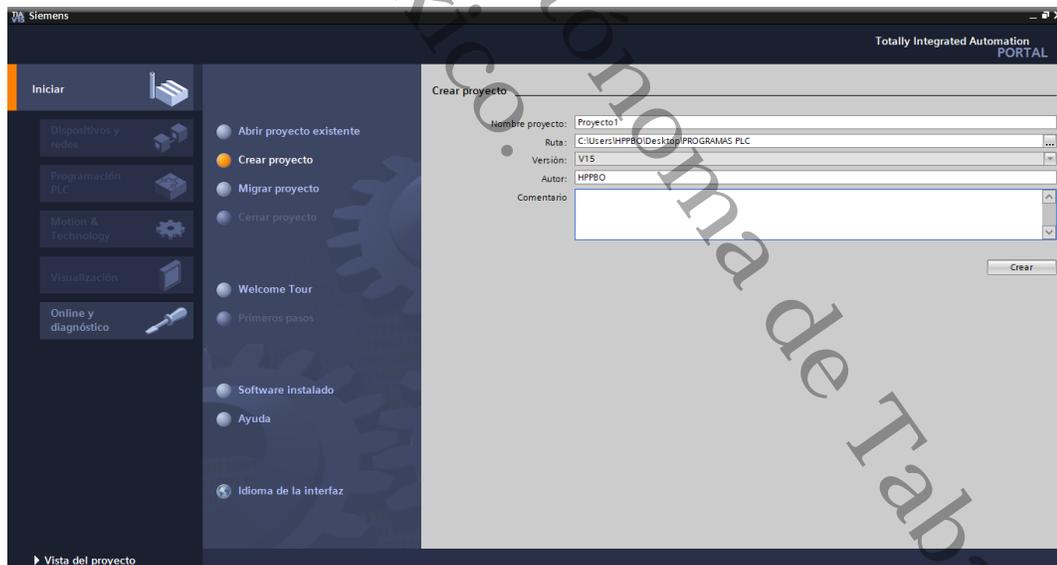


Figura 1.8 Pantalla de inicio de TIA PORTAL V15

En esta parte, se realizará la programación del PLC a partir de los parámetros deseados, y para evitar accidentes o dañar el equipo, se harán simulaciones del

funcionamiento de nuestro sistema de control, antes de ser cargado al equipo físico de PLC.

4) Implementación al equipo físico PLC:

Para iniciar con las pruebas reales y obtener los resultados, se cargará el programa realizado en TIA PORTAL V15, y así validar el funcionamiento correcto del diseño de control antes realizado.

5) Análisis de resultados:

Derivado de los resultados obtenidos, se procederá a un análisis crítico, de las ventajas del sistema de control elegido, así como también del uso de los dispositivos PLCs aplicados al control y medición de motores eléctricos.

6) Conclusiones del trabajo:

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

Capítulo 2. Artículo Científico

Nombre del artículo:

Monitoreo y control de la velocidad del motor de CD utilizando un controlador lógico programable

Autores:

Pérez-Torrez Jesús Manuel¹; Valenzuela-Murillo Fredy Alberto¹; Ramírez-Betancour Reymundo¹; Martínez-Solis Fermín¹; Morfin-Garduño Onofre Amador²

Resumen:

Los controladores lógicos programables (PLC), son ampliamente utilizados en controles industriales por sus características de robustez, confiabilidad, bajo costo y flexibilidad de integración con tecnologías actuales de la industria 4.0. En este sentido, en el presente trabajo se propone un controlador basado en PLC Siemens y software de programación TIA PORTAL. El objetivo de este controlador es regular la velocidad de un motor de corriente directa (CD) utilizando una ley de control PID retroalimentado, cuya sintonización se realiza con métodos experimentales de respuesta al escalón y con uso de la herramienta de sintonización fina propias del PLC. El monitoreo de variables se muestra en una pantalla HMI virtual, mientras que el registro de datos en tiempo real y el manejo de la etapa de potencia se realiza a través de una tarjeta de adquisición y control basada en un microcontrolador Atmega 328P. La validación del controlador se efectúa con pruebas experimentales de laboratorio en condiciones de seguimiento de referencia de velocidad variable y con perturbaciones simultáneas en el par de carga. Los resultados de las pruebas muestran un desempeño estable con buena precisión y respuesta rápida ante perturbaciones. Por lo que un controlador como el que se propone puede ser adecuado para su utilización en sistemas de control industrial que requieren alto par con velocidad variable.

Palabras clave: PLC, Control de velocidad, motor de CD, PID, HMI.

Institución de autor(es):

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México, División Académica de Ingeniería y Arquitectura.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, Departamento de Eléctrica y Computación del Instituto de Ingeniería y Tecnología

Enviado a: Revista Ingeniería Investigación y Tecnología (IIT)

Nombre de la editorial: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

Fecha de envió: 11 de Febrero del 2025

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

2.1 Introducción

La tendencia moderna de los procesos de fabricación inteligente reúne diferentes tecnologías avanzadas que están cambiando los esquemas tradicionales de control y automatización (Nair, Kumar, & Sreenath, 2021). El procesamiento de datos en tiempo real, los sistemas de comunicación y el desarrollo integrado de software son las principales tecnologías que han permitido intercomunicar máquinas eléctricas, ordenadores y sensores avanzados, logrando importantes mejoras en la producción y calidad de los procesos en la industria. Existe una amplia variedad de controladores de alto rendimiento que se utilizan en la industria. Sin embargo, en muchas aplicaciones, los controladores lógicos programables (PLC) se han vuelto preferibles debido a su confiabilidad y capacidad para controlar varios procesos simultáneamente, reduciendo los costos de producción y mantenimiento, entre otros. En ese sentido, la combinación de dispositivos PLC, así como motores eléctricos y diferentes actuadores industriales permiten nuevas estrategias para lograr de manera eficiente procesos de automatización y control.

Una de las máquinas eléctricas más utilizadas por diferentes industrias son los motores de corriente directa (CD). Este tipo de motor proporciona un alto par de arranque y se utiliza principalmente cuando se requieren variaciones en un amplio rango de velocidad, (Chapman, 2012). En (Hamoodi, Hamoodi, & Hameed, 2022), se presenta un controlador de voltaje de armadura para un motor de CD con excitación separada. Este controlador está implementado en un dispositivo PLC Siemens LOGO 230RC. La variación de voltaje de la armadura se realiza mediante el PLC en lazo abierto (sin retroalimentación), a través de un conjunto de 4 resistencias cada una con valor de 100Ω conectadas en serie con la armadura. Esto permite regular la velocidad, corriente y potencia eléctrica del motor en 4 etapas. Otro control se presenta en (Sarma & Bordoloi, 2017) donde se propone un sistema de control para un motor PMDC de 12 V (motor CD de imán permanente). Este controlador presenta dos dispositivos alternativos de control: un PLC 224 XPSi de tecnología Siemens S7-200 y un microcontrolador PIC 16F887. En ambos esquemas de control se utiliza la ley de control PID y la velocidad del motor se mide a

través de un sensor óptico. Las pruebas realizadas consideran diferentes casos de estudio con y sin retroalimentación, donde se demuestra que el PLC es una plataforma de control adecuada para regular la velocidad de motores eléctricos, los resultados se obtienen a partir de registros de osciloscopios.

En (Freitas, Marquezan, de Oliveira, Gamboa, & Hernandez, 2024), se presenta un controlador de velocidad para un motor CD de 5HP. Este controlador está basado en la técnica de control difuso implementada en un dispositivo PLC, RSL0-gix 5000 con tecnología Allen-Bradley, en el cual los parámetros de control se optimizan mediante el software de programación Matlab. Los resultados reportados muestran un comportamiento satisfactorio para el seguimiento de referencia constante con carga fija. En el trabajo de Portillo et al (Portillo & Ordoñez, 2020), se informa la implementación de un controlador difuso basado en un PLC Siemens S7-1200 para controlar la frecuencia entregada por un convertidor de frecuencia a un motor trifásico. Los resultados de este controlador muestran una respuesta dinámica con sobre impulso y oscilaciones mayores a las establecidas en las especificaciones del control de estabilidad, las cuales son más notorias durante el arranque del motor. En (Quezada, Flores, González, & Bautista, 2018), se presenta el control de velocidad para motores de CA basado en un sistema de control PLC, pantalla de interfaz hombre-máquina (HMI) y variador de frecuencia (VFD). Los resultados de este controlador se muestran en el mismo entorno HMI, la adquisición en tiempo real de la variable de control no se informa para fines de análisis de la respuesta y el rendimiento del controlador, como precisión, velocidad de respuesta, sobre impulso y robustez ante perturbaciones externas.

En el presente trabajo, se utiliza un dispositivo PLC 1214C AC/DC/Rly de tecnología Siemens para implementar un controlador de velocidad retroalimentado aplicable a motores CD con fuente de voltaje de campo independiente. La ley de control aplicada en este sistema, se basa en la técnica de control PID tradicional. La señal de realimentación de la variable de control proviene de un sensor de posición mecánico que es adquirida en tiempo real y es procesada a través del PLC. Para monitorear las variables y señales de control se utiliza una pantalla virtual HMI y tarjetas de adquisición para registro de

datos en tiempo real. Los resultados de las pruebas experimentales demuestran buena precisión, estabilidad ante perturbaciones externas, y rapidez de convergencia.

2.2 Caracterización del motor de cd

El motor de corriente directa es una máquina rotativa que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. La ventaja principal de este motor es la facilidad para controlar con precisión la velocidad y el par, esto lo hace preferible en muchas aplicaciones industriales que demandan alto torque con velocidad variable. Este motor está constituido fundamentalmente por dos elementos principales; el estator, que es la parte fija o estática de la máquina y el rotor que es la parte móvil o giratoria. Este motor puede ser alimentado por dos fuentes de voltaje independientes, una de las cuáles es utilizada para alimentar el circuito del rotor, conocido como inducido o armadura. La segunda fuente es utilizada para alimentar el circuito de campo del estator, también llamado devanado de campo o inductor.

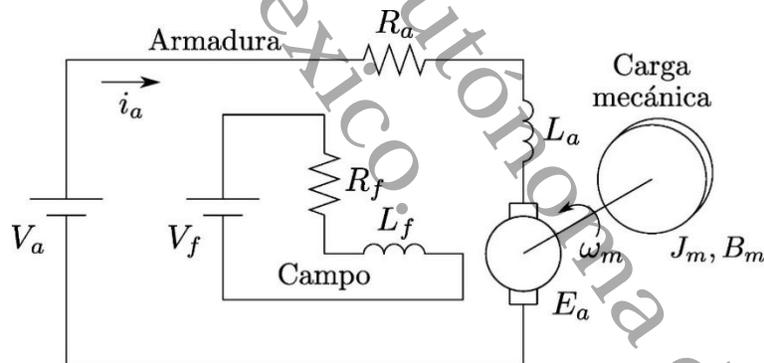


Figura 2.1 Circuito equivalente del motor de CD de excitación independiente

Las ecuaciones eléctricas y mecánicas que definen el comportamiento dinámico de este motor se obtienen a partir de la aplicación de las leyes de la mecánica de movimiento del rotor y de la ley de voltajes de Kirchhoff aplicada a los circuitos del estator y del rotor (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002). Considerando que el circuito de campo es alimentado por una fuente de voltaje de valor constante, el conjunto de ecuaciones dinámicas resultante es:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B_m}{J_m}\omega_m - \frac{k_e}{J_m}i_a + \frac{1}{J_m}T_c \quad (2.1)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{k_e}{L_a}\omega - \frac{R_a}{L_a}i_a + \frac{1}{L_a}V_a \quad (2.2)$$

En este modelo, i_a y ω son las variables de estado y corresponden a la corriente de armadura, y la velocidad del rotor respectivamente. Los parámetros eléctricos de la resistencia del inducido y de la inductancia propia del devanado del inducido son respectivamente R_a y L_a . La constante de inercia del rotor y el coeficiente de fricción viscosa se representan por J y β respectivamente. k_e es una constante que depende de los parámetros de construcción de la máquina y es llamado constante de la máquina. La validación de este modelo se realiza mediante pruebas experimentales de laboratorio utilizando un motor de CD Lab Volt. Los parámetros de este motor se obtuvieron a partir de la prueba de resistencia óhmica, la prueba de operación sin carga y la prueba de operación con carga. Estas pruebas se realizaron con base en los procedimientos descritos en (Alcocer Lazaro, y otros, 2022). Los resultados de las pruebas de caracterización del motor se describen en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Parámetros del motor de CD.

Parámetro	Valor	Unidades
R_a	8.32	Ω
L_a	0.0813	H
K_e	0.549	V/rad/s
J_e	0.0099	Kg-m ²
β	0.00083	Kg/s

2.3 Diseño del control

El controlador de velocidad del motor de CD se diseña con base en la técnica de control PID tradicional y su implementación se realiza a través de un controlador lógico programable de tecnología Siemens S71200, 1214C, AC/DC/Rly. Una de las ventajas principales de la técnica de control PID es su facilidad de implementación y su

versatilidad para ser utilizado en gran cantidad de aplicaciones, por lo que se emplea de forma general en la mayoría de sistemas de control (Ogata, 2010), (Ramírez, y otros, 2018). Otra ventaja importante de esta técnica es que puede ser aplicada en determinados casos donde se desconoce el modelo matemático de la planta, o resulta muy complejo utilizar métodos analíticos. La ley de control PID tradicional expresada en el dominio del tiempo está dada por la ecuación siguiente (Ogata, 2010).

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), la variable $e(t)$ es la función de error actuante, la cual es formulada con la diferencia entre la variable de control medida continuamente en el tiempo y el valor de referencia deseado. El valor $u(t)$ representa el voltaje calculado por la ley de control PID que es utilizado para alimentar la planta de control con el objetivo de que la velocidad del motor alcance la referencia en el valor deseado preestablecido. La función de transferencia que representa la ley de control PID en el dominio de Laplace es:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (2.4)$$

Donde K_p es el parámetro que efectúa la acción proporcional de control. T_i es un factor que actúa sobre la acción integral llamado tiempo integral, y T_d representa el factor de la acción derivativa. La relación entrada-salida de la función de transferencia en lazo cerrado de control es representado en forma de bloques en la siguiente Figura 2.2:

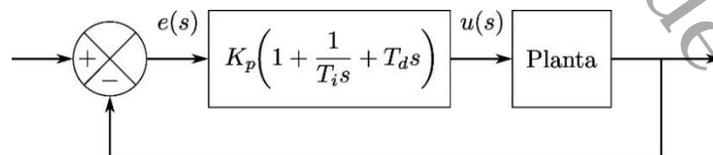


Figura 2.2 Controlador PID en lazo cerrado de control

2.3.1 Sintonización del controlador

La determinación de los parámetros del controlador se puede realizar aplicando algunos de los métodos analíticos convencionales o por medio de pruebas experimentales. Los

métodos analíticos convencionales incluyen la ubicación de polos y el análisis de la respuesta en frecuencia. Por otra parte, los métodos experimentales más comunes se basan en la respuesta al escalón unitario, o en la técnica de oscilaciones sostenidas, ambos casos se aplican de manera general en combinación con las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010).

En este trabajo, la sintonización del controlador PID se realiza en dos etapas, en una primera etapa, se obtienen los parámetros iniciales del controlador aplicando el método de la respuesta al escalón y la tabla de Sintonización de Ziegler Nichols. En una segunda etapa, para obtener una sintonización fina, se utiliza la herramienta de auto sintonización del software de programación TIA PORTAL V15 a través del bloque de función preconstruido llamado "PID Compact". El uso de esta herramienta de auto sintonización (Figura 2.3), requiere de parámetros de configuración, los cuales incluyen; los parámetros iniciales del controlador PID, el tiempo de muestreo y el modo de ajuste. El cálculo inicial de los parámetros del controlador provee una estimación cercana y un funcionamiento estable, sin embargo, un ajuste fino permitirá resultados más adecuados que darán una respuesta más precisa y un desempeño más estable y eficiente del control.

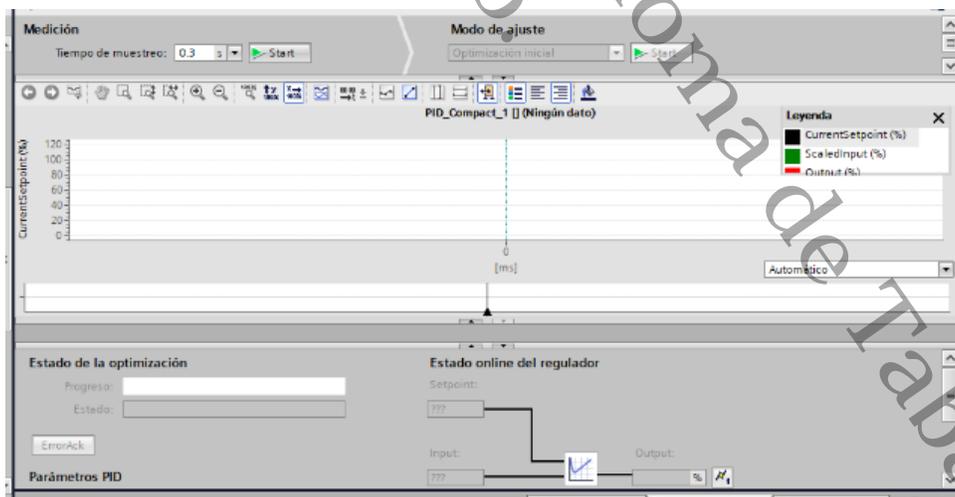


Figura 2.3 Panel de sintonización PID.

Los valores iniciales de configuración del bloque "PID Compact" obtenidos a partir del método de la respuesta al escalón y la tabla de Sintonización de Ziegler Nichols son:

$K_p = 12.13$; $T_i = 0.09$; $T_d = 0.02$. El modo de ajuste de configuración seleccionado es: “optimización fina”. Los parámetros finales del controlador PID que cumplen de manera satisfactoria con las especificaciones de control requeridas y que fueron obtenidos con la herramienta de ajuste de optimización fina son: $K_p = 0.9$; $T_i = 0.5$; $T_d = 0.1$.

2.3.2 Programación del controlador

Tia Portal es un software de programación para PLCs de tecnología SIEMENS. Este software genera las rutinas necesarias para controlar las variables físicas del sistema de control. La estructura del programa de control consta de diferentes subrutinas que actúan a través de bloques de funciones (FB). Las subrutinas programadas para el sistema de control son: “arranque y paro”, “medición de velocidad”, “Control PID”, “Set point” (punto de ajuste), “Tren de Pulsos” y “SP automático” (SIEMENS, 2025).

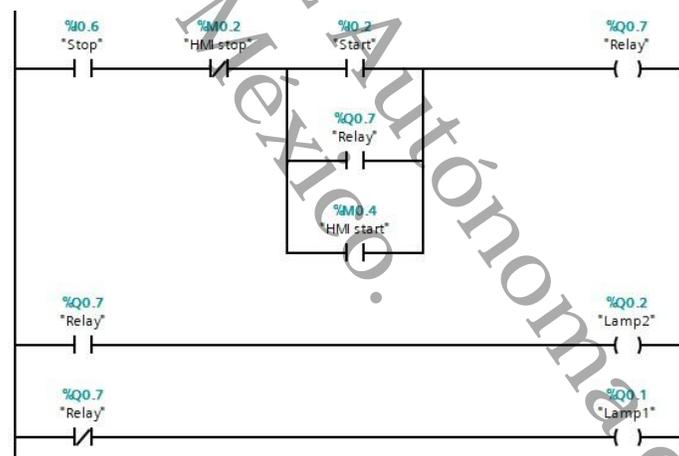


Figura 2.4 Subrutina de “arranque y paro”.

La Figura 2.4 muestra una subrutina de programación para el arranque y paro del motor que actúa de manera manual, con el objetivo de interrumpir operaciones y en caso de emergencia proteger el sistema contra posibles fallas. Además, se muestra la lógica de programación de las luces piloto, la cual proporciona información visual sobre el estado de funcionamiento del motor. El bloque de función (FB) denominado “Lectura de velocidad del motor” (Figura 2.5), realiza la función de capturar los pulsos generados por el encoder incremental y calcular la velocidad del motor, expresando el resultado en revoluciones por minuto (RPM) y en valor porcentual (%).

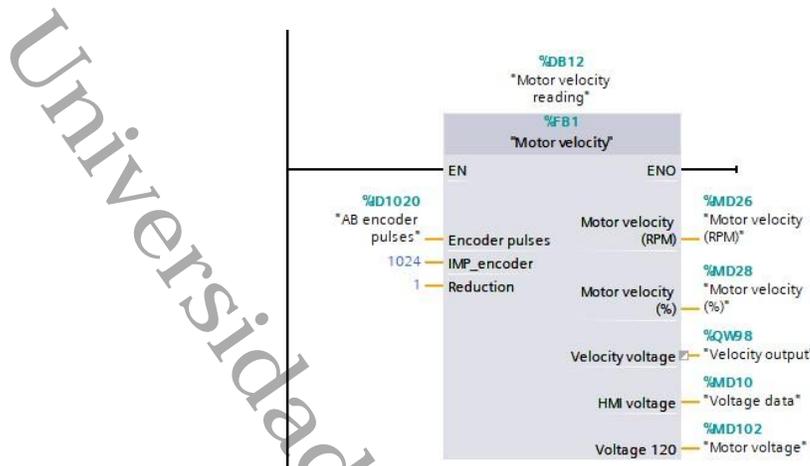


Figura 2.5 Subrutina de "medición de velocidad".

En esta subrutina se programa con dos salidas adicionales, una salida para registrar el voltaje de control del motor y la otra para monitorear dicho voltaje en una pantalla HMI virtual. En esta pantalla HMI se monitorea también la velocidad de referencia y la velocidad real del motor.

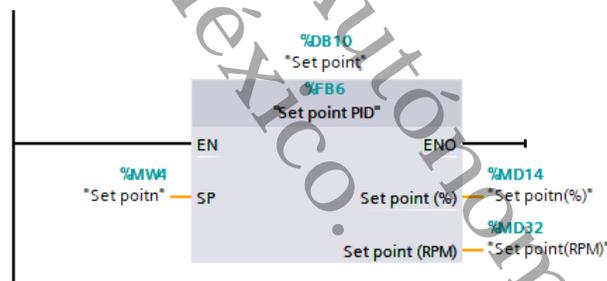


Figura 2.6 Subrutina de programación de "Setpoint".

Para asignar un valor deseado a la variable de control se incorpora un bloque de función FB denominado Set point (SP), el cual es mostrado en la Figura 2.6. Este bloque genera una salida de seguimiento de referencia de velocidad expresado en RPM y en forma porcentual. Para suministrar la señal de voltaje de control calculada por el PID, se utiliza una salida analógica del módulo 6ES7 234-4HE32-0XB0. Este módulo proporciona una señal de voltaje analógico que varía en un rango de 0 a 10 voltios de CD (SIEMENS, 2025). Este voltaje es utilizado para generar las señales PWM requeridas para la etapa de potencia la cual es procesada por medio de una placa de adquisición y control de tecnología Arduino (ARDUINO, 2025).

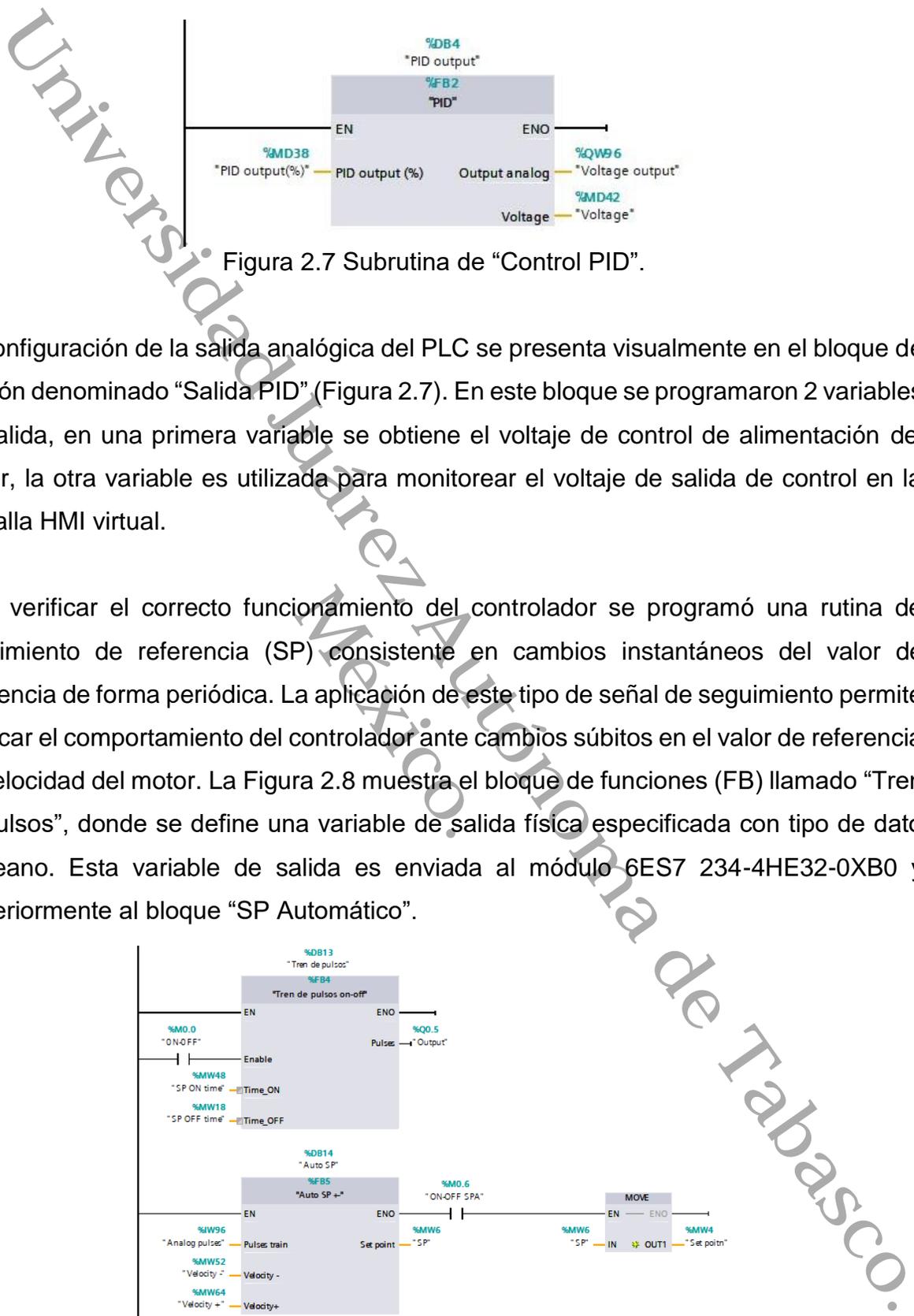


Figura 2.7 Subrutina de “Control PID”.

La configuración de la salida analógica del PLC se presenta visualmente en el bloque de función denominado “Salida PID” (Figura 2.7). En este bloque se programaron 2 variables de salida, en una primera variable se obtiene el voltaje de control de alimentación del motor, la otra variable es utilizada para monitorear el voltaje de salida de control en la pantalla HMI virtual.

Para verificar el correcto funcionamiento del controlador se programó una rutina de seguimiento de referencia (SP) consistente en cambios instantáneos del valor de referencia de forma periódica. La aplicación de este tipo de señal de seguimiento permite verificar el comportamiento del controlador ante cambios súbitos en el valor de referencia de velocidad del motor. La Figura 2.8 muestra el bloque de funciones (FB) llamado “Tren de pulsos”, donde se define una variable de salida física especificada con tipo de dato booleano. Esta variable de salida es enviada al módulo 6ES7 234-4HE32-0XB0 y posteriormente al bloque “SP Automático”.

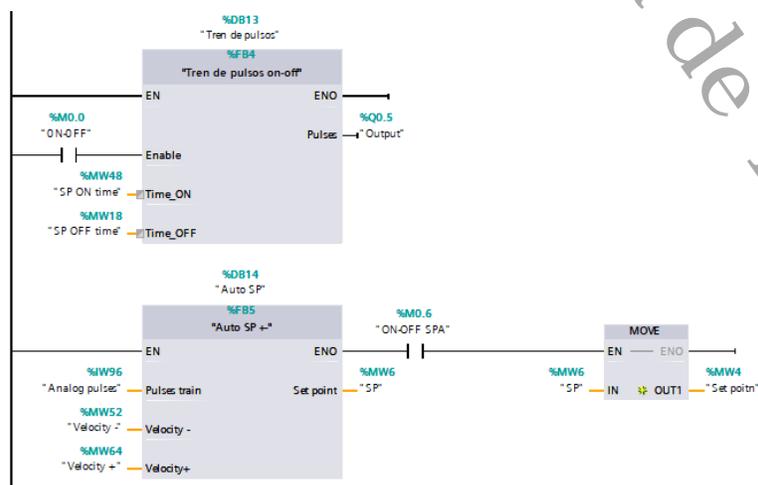


Figura 2.8 Subrutinas de programación de “Tren de Pulsos” y “SP automático”.

La ley de control PID se puede programar utilizando el bloque de programación preconstruido de Tia Portal denominado "PID_Compact". Este bloque tiene un regulador PID continuo con optimización integrada que permite configurar un regulador de pulsos con opciones entre modo manual y modo automático. Este sistema registra constantemente el valor real medido en lazo cerrado de control comparándolo con el SP establecido mediante el cálculo del error de control. El bloque "PID_Compact" calcula el voltaje de salida de control.

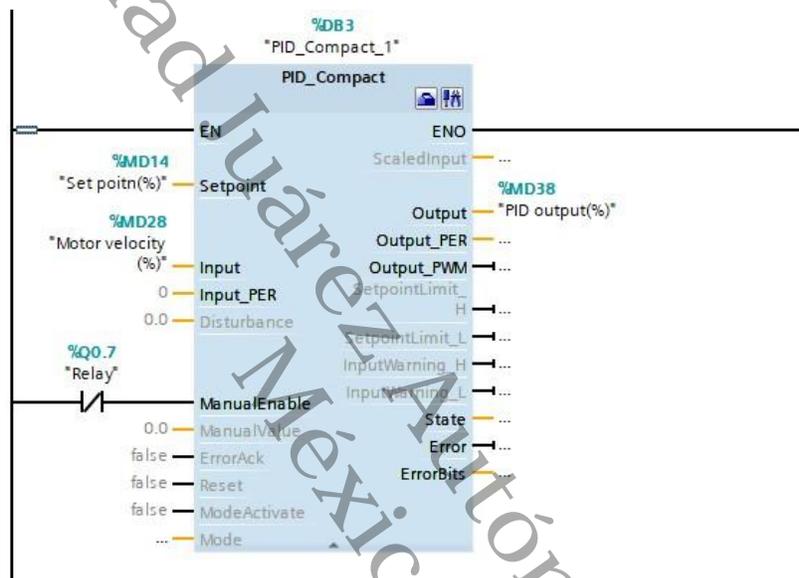


Figura 2.9 Bloque de programación "PID_Compact".

La Figura 2.9 muestra el bloque "PID_Compact", con las variables de entrada "Setpoint%" y "Motor_velocity%", el cual compara el valor real con el valor deseado, y determina una salida llamada "PID output (%)". Esta señal de salida es enviada al motor de CD a través de la etapa de potencia.

Para realizar el control y monitoreo en tiempo real se utiliza una interfaz virtual hombre-máquina (HMI) de la serie TP00 Comfort SIPLUS (Figura 2.10). Esta HMI se programa con controles de arranque y parada del sistema, así como visualización de variables como la velocidad de seguimiento de referencia, la velocidad real del motor, y el voltaje de salida de control. También se agregaron controles de activación de SP en forma de tren de pulsos. Adicionalmente, se incorpora una herramienta de representación gráfica

que facilita la observación de la respuesta del controlador PID y el valor de referencia dado.

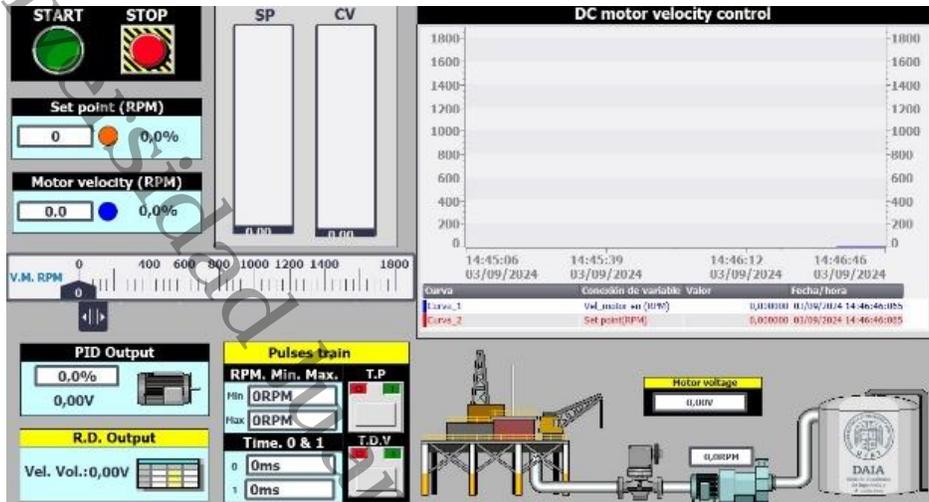


Figura 2.10 Pantalla de monitoreo y control de HMI.

2.3.3 Implementación del prototipo

El controlador propuesto consta de un PLC SIEMENS S7-1200 AC/DC/Rly, un módulo de entradas y salidas analógicas 6ES7 234-4HE32-0XB0, un motor de corriente directa LabVolt, cuyos valores de placa son mostrados en la Tabla 2.2. Se utiliza también una fuente de alimentación de 24 Voltios Siemens, un PC para la programación monitoreo y control. Se utilizaron también dos tarjetas para acondicionamiento de señales de control, un sensor de corriente ACS712.

Tabla 2.2 Datos de placa del motor

Datos del motor	
V_n	120 V
P_n	$\frac{3}{4}$ hp
T_n	0.9 N.m
n_n	1800 rpm

Para tener un registro de datos en tiempo real de las variables de velocidad, corriente, y voltaje de control, se utilizó una placa de adquisición y control basada en un microcontrolador Atmega 328P de tecnología Atmel. La carga mecánica del motor se

transfiere mediante un generador de CD por medio de una banda de acoplamiento. La carga mecánica se aplica variando la corriente de excitación del estator del generador de CD, lo que produce corrientes inducidas en el circuito de del rotor y un par opuesto al motor de accionamiento. Por otra parte, el motor de CD dispone de un sensor mecánico de posición llamado codificador incremental a partir del cual se calcula la velocidad angular del motor impulsado. La Figura 2.11 muestra una vista fotográfica del sistema de control implementado.

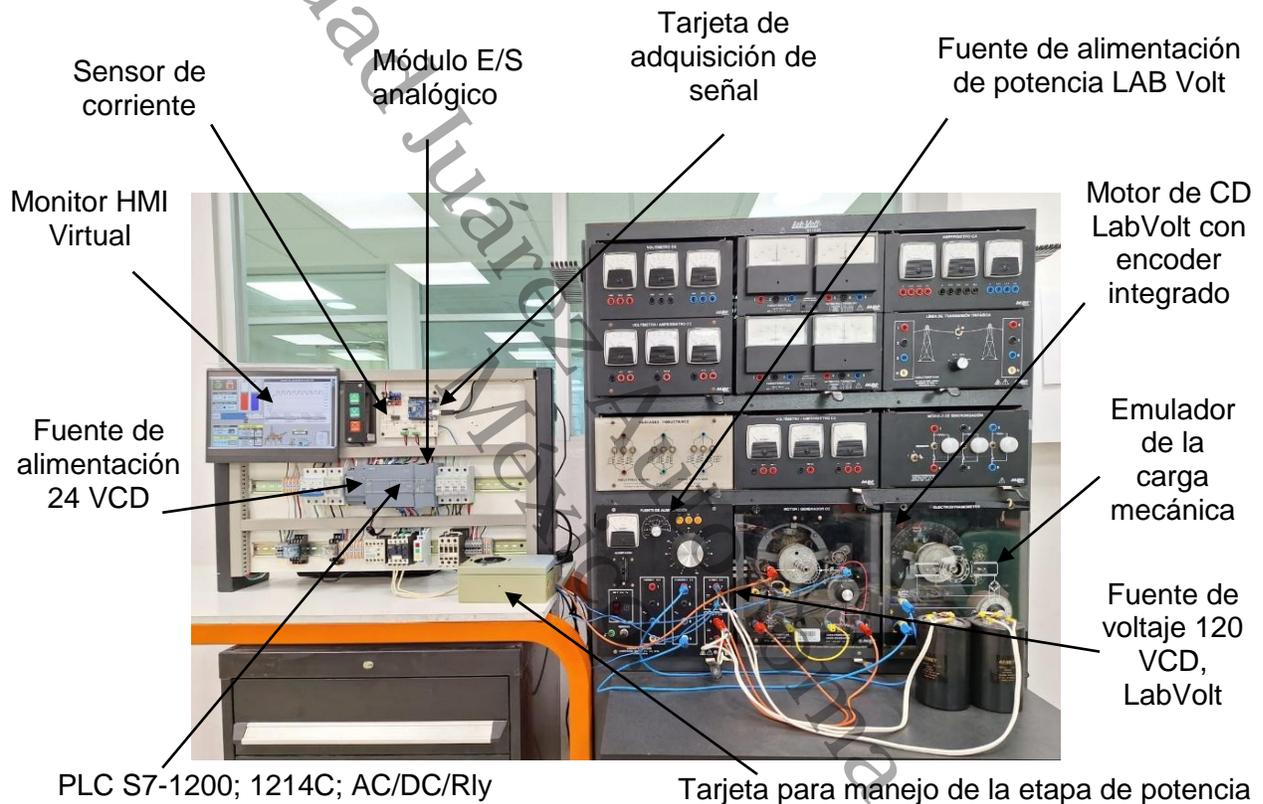


Figura 2.11 Prototipo de sistema de control

2.4 Resultados experimentales

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas experimentales y el análisis de los mismos. El desempeño del sistema de control propuesto basado en PLC S7-1200, 1214, AC/DC/Rly, es evaluado bajo los criterios de precisión, tiempo de establecimiento y rapidez de respuesta ante perturbaciones externas. Las pruebas del controlador incluyen el seguimiento de una señal de velocidad de referencia que varía en forma

periódica bajo variaciones en el par de carga del motor. El arranque del motor se realiza con el seguimiento de una función rampa de velocidad que va de 0 rpm a 1150 rpm en un tiempo de 5 s. Posteriormente, la señal de referencia consiste en un tren de pulsos que oscila entre 1150 rpm y 1350 rpm con un periodo de tiempo de 10 s. El motor se arranca en vacío y antes de 50 s se aplica un par de carga de 0.34 Nm, tal como se muestra en la Figura 2.13. La respuesta del controlador ante los cambios en la velocidad de referencia y los cambios en el par de carga son mostrados en la pantalla HMI virtual en tiempo real. Simultáneamente, las variables de velocidad y corriente de la armadura son obtenidos en tiempo real y son procesados en un microcontrolador para su medición y monitoreo. La velocidad del rotor y la corriente de armadura del motor son mostrados en la Figura 2.12 y la Figura 2.14.

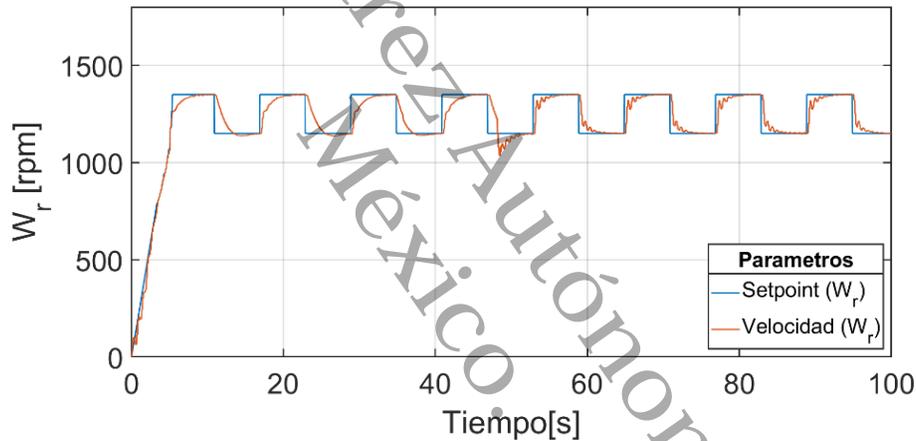


Figura 2.12 Velocidad del motor y señal de seguimiento de referencia.

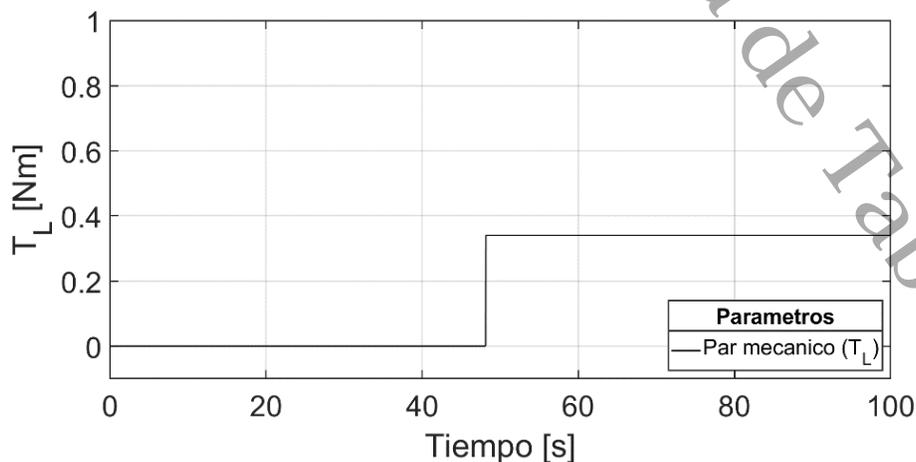


Figura 2.13 Cambios en el par de carga aplicado al motor.

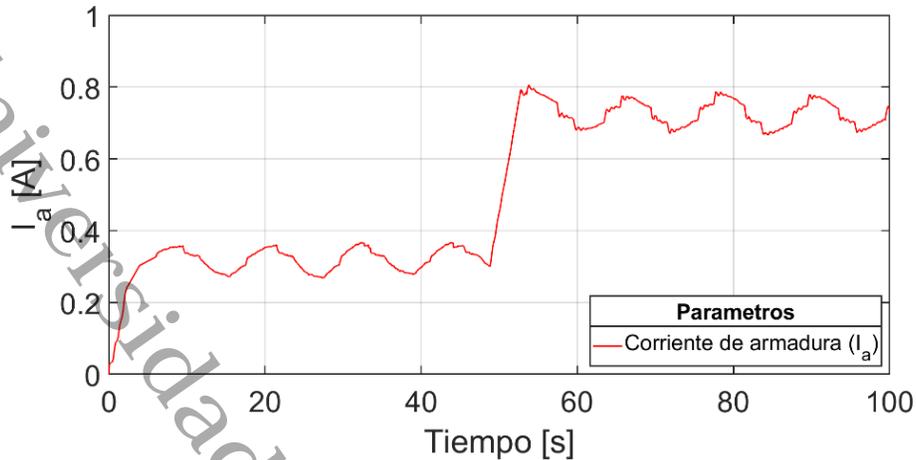


Figura 2.14 Corriente de armadura del motor.

2.4.1 Resultados de operación del motor sin carga

La prueba de vacío, o sin carga, se realiza en dos eventos de seguimiento de referencia de velocidad. En un primer evento el motor arranca sin carga por medio de una función rampa. En el segundo evento se aplica una señal periódica de seguimiento. Durante el primer escalón, la velocidad del motor alcanza 1350 rpm en un tiempo de convergencia de 3.5 segundos con un error de precisión de 0.1%, tal como se muestra en la Figura 2.12. Por otro lado, cuando la velocidad de referencia disminuye a 1150 rpm, la acción de control alcanza dicha referencia en un tiempo de convergencia de 3.8 segundos con un error de precisión de 0.1%. Adicionalmente, la corriente de armadura en el arranque alcanza un valor máximo de 0.35 A, como se puede ver en la Figura 2.14. Durante los cambios en la señal de referencia periódica de velocidad, la corriente de armadura presenta valores mínimo y máximo de 0.27 A y 0.37 A, respectivamente. La respuesta del controlador durante la operación del motor sin carga, en forma resumida, es mostrado en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Respuesta de control del motor sin carga

Velocidad de referencia [rpm]	Par de carga del motor [Nm]	Tiempo de convergencia [seg]	Error de precisión [%]	Corriente de armadura [A]
1350	0	3.5	0.1	0.37
1150	0	3.8	0.1	0.27

2.4.2 Resultados de operación del motor con carga

Durante esta prueba, el motor trabaja con una carga de 0.34 Nm. Este par se aplica en un tiempo de 50 segundos medidos desde el arranque del motor. En el instante en que la carga es aplicada, el valor de referencia de velocidad es 1150 rpm. En estas condiciones, la corriente de armadura presenta un valor máximo de 0.81 A, mientras que la velocidad del motor presenta un transitorio rápido con una caída de velocidad llegando a 1035 rpm, lo cual representa una caída de 10% respecto al valor de referencia establecido. Después del periodo transitorio la velocidad del motor se estabiliza en un tiempo de 3.48 segundos con un error de precisión de 0.2%, tal como se observa en la Figura 2.12. Cuando la referencia de velocidad cambia a 1350 rpm el tiempo de convergencia es de 3.3 segundos, con un error de precisión de 0.1%. El efecto sobre la corriente de armadura ante los cambios en la referencia de velocidad del motor con carga se puede observar en la Figura 2.14, donde se muestra que la corriente de armadura alcanza valores mínimos y máximos de 0.65 A y 0.78 A, respectivamente. Un resumen de resultados de la respuesta del controlador durante la operación del motor con carga es mostrado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Respuesta de control del motor con carga

Velocidad de referencia [rpm]	Par de carga del motor [Nm]	Tiempo de convergencia [seg]	Error de precisión [%]	Corriente de armadura [A]
1150	0.34	3.48	0.2	0.65
1350	0.34	3.3	0.1	0.78

2.5 Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un esquema de control de velocidad basado en un controlador lógico programable PLC y un motor de CD con encoder. El monitoreo y registro de las variables de velocidad, corriente eléctrica, y voltaje de control se realiza a través de un dispositivo HMI virtual y a través de una tarjeta de adquisición de datos en tiempo real. Los resultados obtenidos se realizaron bajo condiciones de operación con

seguimiento de referencia variable mediante un tren de pulsos y con cambios simultáneos en el par de carga del motor.

Los resultados de las pruebas mostraron un desempeño adecuado y satisfactorio. El controlador de velocidad propuesto representa una alternativa para aplicaciones de control de motores de CD con uso de dispositivos lógicos programables de uso industrial y costo reducido. En trabajos futuros, el algoritmo de programación será capaz de identificar y responder ante condiciones críticas para el diagnóstico de fallas y protección del motor en tiempo real. Finalmente, el controlador propuesto, puede ser adecuado y útil en aplicaciones de control industrial de motores de CD que requieran un par alto de funcionamiento con velocidades variables y respuesta rápida ante perturbaciones.

2.6 Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para la realización del presente trabajo, a través del proyecto de apoyo institucional “Validación de una técnica de control robusto implementado en plataforma PLC S7-1200 de tecnología Siemens aplicable al control de velocidad de motores de CD”.

2.7 Referencias

- Alcocer Lazaro, A., Rodríguez-López, G., Valenzuela Murillo, F. A., Ramírez-Betancour, R., Martínez Solís, F., & Juárez-Zirate, S. (2022). Caracterización de parámetros de un motor eléctrico de corriente directa mediante pruebas experimentales. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 6(2), 77-86. doi:<https://doi.org/10.19136/jeeos.a6n2.5219>
- Chapman, S. J. (2012). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. México: McGraw Hill Education.
- Freitas, J. B., Marquezan, L., de Oliveira, P. J., Gamboa, E. A., & Hernandez, M. M. (2024). A fuzzy-based Predictive PID for DC motor speed control. *International Journal of Dynamics and Control*, 2522-2521.

- Hamoodi, S. A., Hamoodi, A. N., & Hameed, F. I. (2022). Armature Control of a DC Motor Based on Programmable Logic Controller. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 110-114.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. New York: IEEE PRESS.
- Nair, M. M., Kumar, A., & Sreenath, N. (2021). The Future with Industry 4.0 at the Core of Society 5.0: Open Issues, Future Opportunities and Challenges. *IEEE Xplore*, 1-7.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- Portillo, E. S., & Ordoñez, J. L. (2020). Design and Implementation of a Fuzzy Controller for Frequency Control of a Motor in an S7-1200 PLC. *18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*.
- Quezada, J. C., Flores, E., González, M., & Bautista, J. (2018). Sistema HMI-PLC-ADF-Motor CA para control de velocidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1-15.
- Ramírez, R., Valenzuela, F. A., Martínez, F., Castañeda, C. E., Morfin, O. A., & Olmos, J. A. (2018). Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1-10.
- Sarma, U., & Bordoloi, P. K. (2017). Speed Control of A DC Motor Using PLC Microcontroller. *ieeexplore*, 1-6.

2.8 Semblanzas de los autores

Jesús Manuel Pérez- Torrez. Es egresado de la Licenciatura de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México, en 2024. Ha participado en proyectos de investigación en el diseño y control utilizando Controladores Lógicos Programables. Sus áreas de interés son los sistemas de control de máquinas eléctricas, sistemas de manufactura y mantenimiento industrial.

Reymundo Ramírez-Betancour. Recibió el grado de doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

Actualmente es profesor investigador de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), adscrito a la carrera de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus principales líneas de investigación son: control de sistemas, análisis dinámico y estacionario de sistemas eléctricos.

Fredy Alberto Valenzuela-Murillo. Recibió el grado de maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de Morelia, México, en 2006 y el grado de doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, México, en 2010. Desde 1992 a la fecha es profesor investigador en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, sus áreas principales de investigación son el análisis y control de sistemas eléctricos.

Fermín Martínez-Solís. Obtuvo el título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Es profesor investigador de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco en la carrera de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Tiene experiencia en investigación y diseño de sistemas electrónicos para medición, control y automatización de procesos industriales. Sus áreas de interés son: diseño e implementación de tarjetas de adquisición de datos, sistemas robóticos y mecatrónicos, automatización industrial y control de procesos, así como la investigación y desarrollo de equipos para rehabilitación de extremidades inferiores.

Onofre Amador Morfin-Garduño. Recibió el grado de doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional en 2010. Trabaja como profesor-investigador en el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Está adscrito al departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación e imparte cátedra a nivel Licenciatura y Maestría en Ingeniería Eléctrica. Sus principales áreas de interés son: control automático aplicado a las fuentes de energía renovables, control en lazo cerrado de máquinas eléctricas y uso eficiente de la energía.

Apéndice A

Alojamiento de la tesis en el repositorio institucional	
Título de Tesis:	“Monitoreo y control de velocidad de un motor de cd utilizando un dispositivo de control lógico programable”
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Jesús Manuel Pérez Torrez
ORCID:	0009-0007-6798-0727
Resumen de la Tesis :	<p>Los controladores lógicos programables (PLC), son ampliamente utilizados en controles industriales por sus características de robustez, confiabilidad, bajo costo y flexibilidad de integración con tecnologías actuales de la industria 4.0. En este sentido, en el presente trabajo se propone un controlador basado en PLC Siemens y software de programación TIA PORTAL. El objetivo de este controlador es regular la velocidad de un motor de corriente directa (CD) utilizando una ley de control PID retroalimentado, cuya sintonización se realiza con métodos experimentales de respuesta al escalón y con uso de la herramienta de sintonización fina propias del PLC. El monitoreo de variables se muestra en una pantalla HMI virtual, mientras que el registro de datos en tiempo real y el manejo de la etapa de</p>

	<p>potencia se realiza a través de una tarjeta de adquisición y control basada en un microcontrolador Atmega 328P. La validación del controlador se efectúa con pruebas experimentales de laboratorio en condiciones de seguimiento de referencia de velocidad variable y con perturbaciones simultáneas en el par de carga. Los resultados de las pruebas muestran un desempeño estable con buena precisión y respuesta rápida ante perturbaciones. Por lo que un controlador como el que se propone puede ser adecuado para su utilización en sistemas de control industrial que requieren alto par con velocidad variable.</p>
<p>Palabras claves de la Tesis:</p>	<p>PLC, Control de velocidad, motor de CD, PID, HMI.</p>
<p>Referencia citadas:</p>	<p>Página 27</p>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.