



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-
VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN
MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA**

Proyecto de investigación presentado previo a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico

AUTORES:

Caiza Guallasamín Bryan David

Changoluisa Choloquina José David

TUTOR:

Ing. Marco Aníbal León Segovia Ms.C

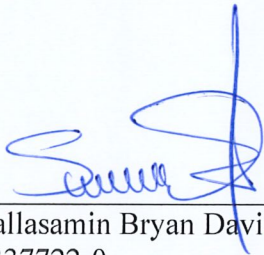
LATACUNGA, AGOSTO 2025

Latacunga, julio del 2025

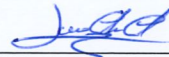
DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros CAIZA GUALLASAMIN BRYAN DAVID Y CHANGOLUISA CHOLOQUINGA JOSE DAVID declaramos ser autores del proyecto de titulación” **IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACION DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA**”, siendo el Ing. **LEON SEGOVIA MARCO ANIBAL** tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



Caiza Guallasamin Bryan David
C.C. 172337722-0



Changoluisa Choloquina Jose David
C.C. 050372775-2

Latacunga, julio del 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACION DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA”**, propuesto por los estudiantes CAIZA GUALLASAMIN BRYAN DAVID y CHANGOLUISA CHOLOQUINGA JOSE DAVID de la Carrera De Ingeniería en Electricidad , considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Leon Segovia Marco Anibal M.Sc.
C.C. 050230540-2
TUTOR

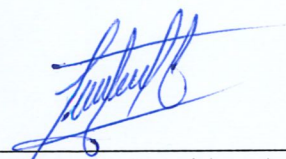
Latacunga, Julio del 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

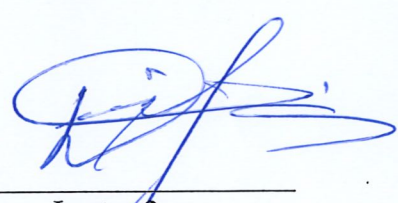
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA”, propuesto por los estudiantes Caiza Guallasamin Bryan David y Changoluisa Choloquina Jose David de la Carrera de Electricidad, me permito indicar que el o la estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad propuesta tecnológica en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

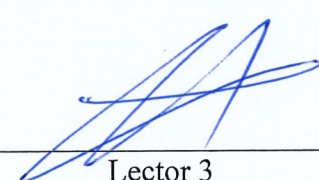
Atentamente,



Lector 1 (Presidente)
MSc. Ing. Corrales Byron
CC: 050234776-8



Lector 2
MSc. Ing. Jiménez Diego
CC: 050349370-2



Lector 3
MSc. Ing. Leon Segovia Manuel
CC: 050204135-3

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por la vida y las bendiciones dadas cada día incondicionalmente, por darme la fortaleza y sabiduría para superar cada desafío a lo largo de este camino.

A mí querida Universidad técnica de Cotopaxi, a mí querida carrera Ingeniería Eléctrica y a la docencia de toda mi trayectoria universitaria de ofrecer sus conocimientos hacia mi persona.

A mi familia, por ser mi mayor fuente de motivación. A mis hermanos, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A mi esposa, por su amor incondicional, su paciencia y por acompañarme en cada paso de este proceso con entrega y comprensión. A mi hijo, cuya existencia me inspira día a día a seguir creciendo y a dar siempre lo mejor de mí.

David Changoluisa

AGRADECIMIENTO

A mis padres por guiarme y brindarme su apoyo en cada paso de este largo camino por su ejemplo de trabajo y darme lo necesario para seguir adelante y cumplir con esta meta de mi vida.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi que me ha dado la oportunidad de formarme académicamente dentro de sus aulas, a cada uno de los docentes de la carrera de Ingeniería en Electricidad que compartieron sus conocimientos para formarme como profesional. A mi compañero de tesis José Changoluisa por su aporte al desarrollo de este proyecto.

Y, finalmente, agradezco a todas las personas que, de una manera u otra, contribuyeron a este proyecto con su tiempo, apoyo o inspiración.

Bryan David Caiza Guallasamin

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a todas las personas que han sido parte esencial de mi vida y de este logro.

A mis padrinos, pilares fundamentales de mi vida, por sus enseñanzas y por haberme guiado siempre con sabiduría y sacrificio. Sin ustedes, nada de esto sería posible. que, desde la distancia, en los Estados Unidos, han estado siempre presentes con su apoyo, consejos y afecto. Gracias por ser un ejemplo constante de esfuerzo y perseverancia.

A mis padres, por la fortaleza que siempre han demostrado, por sus sabios consejos, el apoyo incondicional y los valores inculcados, por su ejemplo a seguir.

A mi esposa Lcda. Rosalía Choloquina, por su compañía leal, su paciencia infinita y su amor que me sostuvo en cada momento de este proceso. Gracias por creer en mí, incluso en los días más difíciles.

A mi hijo Eliam David, mi mayor inspiración, razón de mi lucha diaria y el motor que me impulsa a seguir superándome.

Y a toda mi familia y amigos, por ser parte de este camino con su cariño, su fe en mí y su apoyo sincero. Este logro también es de ustedes.

David Changoluisa

DEDICATORIA

A mis padres Segundo José Caiza Paneluisa y Rosa Elvira Guallasamin que, con paciencia, cariño y cada una de sus palabras día a día me guiaron en este camino y es por ellos que hoy logro conseguir este objetivo.

A mi hermano Armando que me ha enseñado a seguir adelante sin importar las dificultades que la vida nos ponga en frente.

A Catherine Condor, mi compañera de vida por estar conmigo en los momentos de duda, por creer en mí cuando me estaba derrumbando por brindarme palabras de apoyo y amor.

A mi familia porque de uno u otra forma han estado presentes en algún momento de mi vida.

Bryan David Caiza Guallasamin

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.

Autores:

Changoluisa Choloquina José David
Caiza Guallasamín Bryan David

RESUMEN

El presente proyecto tiene de finalidad la implementación de un sistema de control de velocidad para motores de corriente alterna basado en la tecnología Flux-Vector, con el propósito de evaluar la respuesta dinámica del sistema ante variaciones de carga mecánica, el cual integra un variador de frecuencia con control vectorial, un PLC Siemens S7-1200 y un encoder como dispositivo de retroalimentación, conformando un proceso de control automatizado industrial.

El desarrollo contempla la configuración del variador, la programación de la lógica de control en el entorno TIA Portal y la incorporación de una interfaz HMI que permite al operador establecer el valor de referencia (Setpoint) y visualizar en tiempo real las variables de operación. A través de pruebas experimentales, se analizó el comportamiento de la máquina rotativa bajo condiciones de carga y en vacío, evidenciando una corriente de reposo de aproximadamente 0.68 A, que se estabiliza en régimen en torno a los 0.44 A. Bajo carga mecánica, se observaron fluctuaciones en la corriente y el torque, asociadas al esfuerzo de compensación del control vectorial, validando así su capacidad para mantener la referencia de velocidad ante perturbaciones.

El proyecto permite validar, mediante casos de estudio la teoría del control vectorial, relacionando los parámetros eléctricos de corriente, voltaje, torque y frecuencia con la respuesta dinámica del motor ante perturbaciones de carga por medio de procesos de medición y visualización de variables implementados en TIA Portal, se registra el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones la estabilidad operativa y la optimización del rendimiento en motores de inducción utilizados en aplicaciones industriales

Palabras claves: Control Flux-Vector, motor asíncrono, velocidad síncrona, PLC S7-1200, HMI y variador de frecuencia.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: IMPLEMENTATION OF A FLUX-VECTOR CONTROL SYSTEM FOR
SPEED OPTIMIZATION IN ALTERNATING CURRENT MOTORS.**

Authors:

Changoluisa Choloquina José David
Caiza Guallasamín Bryan David

ABSTRACT

The purpose of this project is the implementation of a speed control system for alternating current motors based on Flux-Vector technology, in order to evaluate the dynamic response of the system to mechanical load variations, which integrates a frequency inverter with vector control, a Siemens S7-1200 PLC and an encoder as a feedback device, forming an industrial automated control process.

The development includes the configuration of the drive, the programming of the control logic in the TIA Portal environment and the incorporation of an HMI interface that allows the operator to set the reference value (Setpoint) and visualize the operating variables in real time. Through experimental tests, the behavior of the rotating machine was analyzed under load and no-load conditions, showing a quiescent current of approximately 0.68 A, which stabilizes in regime at around 0.44 A. Under mechanical load, fluctuations in current and torque were observed, associated to the compensation effort of the vector control, thus validating its capacity to maintain the speed reference in the presence of disturbances.

The project allows the theory of vector control to be validated through case studies, relating the electrical parameters of current, voltage, torque, and frequency to the dynamic response of the motor to load disturbances through measurement and visualization processes implemented in TIA Portal. The behavior of the system under different conditions, operational stability, and performance optimization in induction motors used in industrial applications are recorded.

Key words: Flux-Vector control, asynchronous motor, synchronous speed, PLC S7-1200, HMI and variable frequency drive.

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. El problema	3
2.2. Situación Problemática.....	3
2.3. Formulación del problema.....	3
2.4. Objeto y campo de acción	4
2.4.1. Objeto de Investigación:	4
2.4.2. Campo de Acción:	4
2.5. Beneficiarios.....	4
2.5.1. Directo	4
2.5.2. Indirecto	4
2.6. Justificación.....	4
2.7. Hipótesis	5
2.8. Objetivos.....	5
2.8.1. General.....	5
2.8.2. Específicos	5
2.9. Sistemas de tareas	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1. Antecedentes.....	7
3.2. Motor de corriente alterna (AC)	8
3.2.1 Partes del motor	8
3.2.1.1. Estator.....	9
3.2.1.2. Rotor	10
3.2.2 Principio de funcionamiento	10
3.3. Motor Asíncrono	12

3.3.1.	Descripción del motor Asíncrono	12
3.4.	Control de motores alternos de 4 cuadrantes	13
3.5.	Definición de Cuadrantes	14
3.6.	Control de velocidad.....	15
3.7.	Control de motor AC con variadores de frecuencia	15
3.7.1.	Ventajas del variador:	16
3.7.2.	Desventajas del variador:.....	16
3.7.3.	Tipos de variadores de velocidad.....	16
3.7.4.	Variadores eléctrico - electrónicos	16
3.7.5.	Variadores de deslizamiento.....	17
3.7.6.	Variadores para motores de AC.....	17
3.8.	Controlador Lógico Programable	18
3.8.1.	Componentes de un PLC	18
3.8.1.1.	Características Fundamentales.....	19
3.9.	Human Machine Interface	19
3.10.	Encoder.....	20
3.11.	Redes industriales	20
3.12.	Evolución de procesos industriales.....	21
3.13.	Sistemas de control industrial.....	22
3.13.1.	Control centralizado.....	22
3.13.2.	Control distribuido.....	23
3.13.3.	Control híbrido.....	23
3.14.	Protocolo MODBUS	23
3.15.	Protocolo PROFIBUS	23
3.16.	Accionamientos eléctricos en motores de inducción.....	24
3.17.	Medición de velocidad y posición angular	25

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	26
4.1. Métodos de investigación	26
4.1.1. Método científico	26
4.1.2. Método inductivo	26
4.2. Diagrama de flujo	27
4.3. Técnicas de recolección de los parámetros.....	28
4.3.1. Observación	28
4.3.2. Medición eléctrica.....	28
4.4. Instrumentos utilizados.....	28
4.4.1. Software TIA Portal V16	28
4.4.2. Software LabVIEW	28
4.4.3. Multímetro	28
4.5. Características de los equipos.....	29
4.5.1. PLC S7-1200.....	29
4.5.2. Módulo CM 1241.....	30
4.5.3. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2	30
4.5.4. Breaker 2 polos	32
4.5.5. Breaker 3 polos	33
4.5.6. Switch Ethernet Industrial RIS3008S-8T	33
4.5.7. Cable de conexión Modbus.....	34
4.5.8. MODBUS conector.....	34
4.5.9. Motor trifásico	35
4.5.10. HMI KTP400 Basic	36
4.5.11. Encoder OMRON E6B2-CWZ6E	36
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	38
5.1. Ubicación de la maqueta en los laboratorios de la universidad.....	38

5.2.	Diagrama de conexión	39
5.3.	Casos de estudio del sistema sin carga	39
5.3.1.	Control flux vector del sistema de 0 a 1610 rpm	39
5.3.2.	Análisis de la frecuencia	42
5.3.3.	Análisis de la corriente	43
5.3.4.	Análisis de voltaje.....	44
5.3.5.	Análisis del torque	45
5.4.	Casos de estudio del sistema con carga	46
5.4.1.	Control flux vector del sistema de 0 a 2300 rpm	46
5.4.2.	Análisis de corriente	48
5.4.3.	Análisis del voltaje.....	49
5.4.4.	Análisis de la frecuencia	50
5.4.5.	Análisis de torque	50
5.5.	Costos del proyecto Flux Vector	51
5.6.	Presupuesto general	52
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
6.1.	Conclusiones.....	53
6.2.	Recomendaciones	54
7.	REFERENCIALES.....	55
8.	ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadrantes de operación.....	14
Tabla 2. Comparación del encoder incremental y encoder absoluto.....	20
Tabla 3. Clasificación de redes industriales	21
Tabla 4. Comparación entre MODBUS y PROFIBUS	24
Tabla 5. Características técnicas del PLC S7-1200.....	29
Tabla 6. Características técnicas del módulo CM 1241 RS422/RS485	30
Tabla 7. Características técnicas del SINAMICS CU240E-2	31
Tabla 8. Componentes principales del variador SINAMICS G120	32
Tabla 9. Características técnicas del breaker de 2 polos	33
Tabla 10. Características técnicas del Switch Ethernet	34
Tabla 11. Características técnicas del encoder OMRON E6B2-CWZ6E	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del motor de inducción.....	9
Figura 2. Láminas de acero del núcleo del estator	9
Figura 3. Partes del estator	9
Figura 4. Componentes del rotor	10
Figura 5. Interacción campo - corriente para la producción de par.....	11
Figura 6. Características de Torque – Velocidad.	11
Figura 7. Motor asíncrono trifásico.	13
Figura 8. Cuadrantes de operación	14
Figura 9. Jerarquía de comunicaciones industriales.	20
Figura 10. Evolución de procesos industriales	22
Figura 11. Diagrama de bloques de un Accionamiento Eléctrico	25
Figura 12. Estructura del encoder.....	25
Figura 13. Diagrama de flujo.....	27
Figura 14. PLC S7-1200.....	29
Figura 15. Módulo CM 1241	30
Figura 16. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2.....	31
Figura 17. Breaker 2 polos	32
Figura 18. Breaker 3 polos	33
Figura 19. Cable de conexión Modbus.....	34
Figura 20. Conector MODBUS	35
Figura 21. Máquina rotatoria	35
Figura 22. Pantalla HMI	36
Figura 23. Encoder OMRON E6B2-CWZ6E.....	37
Figura 24. Módulo de control de motores en AC	38
Figura 25. Diagrama de conexión eléctrica	39

Figura 26. Control Setpoint y rpm.....	40
Figura 27. Setpoint vs rpm (0 a 500 rpm)	40
Figura 28. Setpoint vs rpm (1500 a 1700 rpm)	41
Figura 29. Setpoint vs rpm (1800 a 2400 rpm)	42
Figura 30. RPM y frecuencia.....	43
Figura 31. Setpoint vs corriente sin carga	44
Figura 32. Setpoint vs voltaje sin carga.....	45
Figura 33. Corriente vs Torque sin carga	46
Figura 34. Control Setpoint y rpm con carga	47
Figura 35. Setpoint vs rpm con carga (0 a 800 rpm)	48
Figura 36. Setpoint vs rpm con carga (1200 a 2300 rpm)	48
Figura 37. RPM vs corriente con carga	49
Figura 38. RPM vs voltaje con carga	49
Figura 39. RPM vs frecuencia con carga.....	50
Figura 40. Corriente y torque con carga.....	50

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA”

Fecha de inicio: abril 2025

Fecha de finalización: agosto 2025

Lugar de ejecución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia: Carrera de Electricidad

Tipo de Proyecto: Proyecto de implementación

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de Trabajo:

Tutor de titulación: Ing. Marco Aníbal León Segovia Ms.C

Estudiantes: Changoluisa Choloquina José David

Caiza Guallasamín Bryan David

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 1: Control y Automatización en el uso de la energía del sector Industrial, Comercial y Residencial.

2. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones industriales históricamente los motores de corriente continua fueron utilizados debido a la facilidad para controlar su velocidad y torque. Hasta la década de 1950, la mayoría de la industria empleaban motores DC. Sin embargo, con el desarrollo del método de control vectorial para motores de corriente alterna AC en 1968, genera una nueva etapa de investigación y control de accionamientos eléctrico.

Existen dos técnicas principales para controlar motores en AC el control escalar y el control vectorial donde el control escalar depende de la magnitud de las señales de corriente y voltaje, sin considerar en ángulo, lo que limita su utilidad en aplicaciones de velocidad variable, el control vectorial utiliza información tanto de magnitud como de ángulo de las corrientes y voltajes de cada fase, lo que permite el control de la máquina rotativa.

Las máquinas rotativas de corriente alternan de inducción y los síncronos de imán permanente son fundamentales en la automatización industrial. Sin embargo, en aplicaciones que necesitan un control de velocidad y torque es indispensable implementar la tecnología de control vectorial (Flux Vector) aplicada en variadores de frecuencia permite un ajuste la velocidad del motor frente a métodos tradicionales.

El diseño de un sistema de control de velocidad para un motor AC utilizando un encoder para la medición de velocidad real y un variador con tecnología Flux Vector para el control de la velocidad. La implementación del sistema se realiza mediante un CPU Siemens S7-1200, que contiene el programa de control y la comunicación remota con el variador. Este proyecto aprovecha las ventajas del control vectorial para mejorar rendimiento del motor en aplicaciones industriales.

2.1. El problema

2.2. Situación Problemática

En los procesos industriales el control de velocidad de las máquinas rotativas en corriente alterna es un desafío cuando se requiere respuesta dinámica ante variaciones de carga o condiciones cambiantes del proceso. Aunque las máquinas rotativas AC son ampliamente utilizados por su simplicidad constructiva y bajo mantenimiento, su control no es directo, especialmente en sistemas donde es necesario estabilidad operativa.

El desarrollo de técnicas como el control vectorial por orientación de campo (Flux-Vector) ha permitido un control del par y la velocidad, similar al que se obtiene en motores de corriente continua, pero su implementación requiere del uso combinado de sensores de retroalimentación como encoders, variadores de frecuencia y autómatas de control.

En la Universidad Técnica de Cotopaxi se identifica la necesidad de fortalecer las actividades prácticas de los estudiantes mediante proyectos de implementación que integren tecnologías de control eléctrico. Sin embargo, existe una brecha entre los fundamentos teóricos impartidos en aula y la práctico debido al elevado costo de cada uno de los equipos que componen este proceso industrial, como el uso de PLC Siemens S7-1200 en conjunto con variadores de frecuencia de con Flux-Vector. Esta limitación afecta la preparación técnica para enfrentar entornos reales de la automatización industrial.

2.3. Formulación del problema

En aplicaciones industriales, el control y la estabilidad de la velocidad en motores de corriente alterna son esenciales frente a variaciones de carga mecánica, el métodos como el control escalar (V/f) presentan limitaciones ante estos cambios que genera inestabilidad en la respuesta ante esta problemática, se plantea la implementación de un sistema de control tipo Flux-Vector el cual mediante la retroalimentación de un encoder y el autómata PLC, permite mantener la velocidad del motor conforme al valor de consigna Setpoint, este sistema debe asegurar una respuesta rápida y precisa ante variaciones de carga, optimizando el desempeño de la máquina rotativa.

2.4. Objeto y campo de acción

2.4.1. Objeto de Investigación:

Control Flux-Vector en motores de corriente alterna.

2.4.2. Campo de Acción:

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 330605 Conductores Aislados/330609 Transmisión y Distribución

2.5. Beneficiarios

2.5.1. Directo

Los postulantes de la propuesta tecnológica y personal académico que componen la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.5.2. Indirecto

Los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica y la academia universitaria.

2.6. Justificación

La implementación de un sistema de control de velocidad en motores de corriente alterna mediante tecnología Flux-Vector permite simular condiciones reales de operación, donde se requiere precisión, estabilidad y respuesta inmediata ante variaciones de carga. Este tipo de control vectorial mejora el desempeño dinámico de la máquina que permite el control del flujo y del par.

El uso de un PLC Siemens S7-1200 en conjunto con un variador de frecuencia que incorpore esta tecnología y un encoder como elemento de retroalimentación representa una configuración real del entorno industrial. La ejecución práctica de este proyecto permite validar no solo la funcionalidad, sino también su integración con elementos reales de automatización que contribuye a disminuir la distancia entre la teoría y la práctica dentro del proceso formativo

Este proyecto aporta una solución replicable para el monitoreo y control de velocidad en motores AC, generando un entorno de prueba que puede ser utilizado para el aprendizaje, análisis y ajuste de parámetros eléctricos en condiciones reales. De este modo, se promueve el uso de las tecnologías en la formación de ingenieros eléctricos, alineando el perfil profesional con las exigencias del sector productivo.

2.7. Hipótesis

La implementación de un sistema de control de velocidad para un motor AC, basado en un variador de frecuencia con tecnología Flux-Vector, un encoder como retroalimentación y un PLC Siemens S7-1200, permitirá regular la velocidad mantener la estabilidad del sistema ante perturbaciones y monitorear el comportamiento dinámico del proceso en tiempo real.

2.8. Objetivos

2.8.1. General

Implementar un sistema de control de velocidad para un motor corriente alterna, que emplea un encoder como dispositivo de retroalimentación, un variador de frecuencia con tecnología Flux-Vector y un PLC Siemens S7-1200 para el monitoreo y control.

2.8.2. Específicos

- Investigar los fundamentos del control vectorial por orientación de campo y su implementación en motores de inducción, así como el rol del encoder como dispositivo de realimentación para la medición de velocidad y posición.
- Configurar el variador de frecuencia con tecnología Flux-Vector que estable su integración con el PLC Siemens S7-1200.
- Evaluar la respuesta dinámica a través de pruebas experimentales que permitan validar su desempeño frente a variaciones de carga.

2.9. Sistemas de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar los fundamentos del control vectorial por orientación de campo y su implementación en motores de inducción, así como el rol del encoder como dispositivo de realimentación para la medición de velocidad y posición.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión bibliográfica sobre control vectorial (Flux-Vector) motores de inducción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fundamento técnico del control vectorial aplicado a motores AC. - Comprensión del papel del encoder en el lazo de control de velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Libros de teoría de máquinas eléctricas. - Artículos técnicos IEEE - Microsoft Office.
Configurar el variador de frecuencia con tecnología Flux-Vector y el encoder, estableciendo su integración con el PLC Siemens S7-1200.	<ul style="list-style-type: none"> - Selección del variador de frecuencia adecuado. - Parametrización del variador para modo Flux-Vector. - Conexión e integración del encoder al variador. - Configuración del PLC para comunicación con el variador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema funcional de control conectado a través del encoder y PLC. - Conexión de comunicación entre variador y autómatas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variador con Flux-Vector - Encoder - PLC Siemens S7-1200 - Software TIA Portal
Evaluar la respuesta dinámica a través de pruebas experimentales que permitan validar su desempeño frente a variaciones de carga.	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño de pruebas con carga variable. - Registro de datos de velocidad, corriente y torque. - 	<ul style="list-style-type: none"> - Reporte técnico de validación del comportamiento del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - Microsoft Office.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. Antecedentes

Históricamente, los motores de corriente continua dominaron la industria debido a la facilidad para regular su velocidad mediante variaciones en el voltaje de alimentación a partir de la segunda mitad del siglo XX, los motores de corriente alterna, en particular los motores de inducción empezaron a sustituir progresivamente a los motores de corriente continua en múltiples aplicaciones industriales debido a su menor necesidad de mantenimiento, construcción y adecuación para operación en ambientes industriales.

Los motores de inducción trifásicos, en particular, se convierten en la opción más común para los sistemas de accionamiento debido a su comportamiento electromecánico, su compatibilidad con la red eléctrica trifásica facilita el control del mismo en base a diagramas de control o mecanismo automatizados. Este tipo de motor no requiere escobillas ni conmutadores mecánicos, lo cual simplifica construcción comparado con los motores de corriente continua [1].

El control escalar fue la primera aproximación utilizada en variadores para motores AC, basado en el ajuste de la magnitud como voltaje y frecuencia. Sin embargo, esta técnica no permite una regulación precisa y presenta limitaciones dinámicas ante perturbaciones o cambios de carga. A partir de 1968 se desarrolló el control vectorial o tecnología Flux-Vector, que permitió modelar el motor de inducción similar al de corriente continua. Esta técnica se basa en transformar las variables del estator a un sistema rotante mediante transformadas de Park y Clarke, lo que controla el flujo y el par del motor. El control vectorial requiere la medición o estimación de las variables eléctrica y mecánicas, como la velocidad del rotor y la posición del campo para introducir el sistema de control que opera bajo las condiciones del autómatas programable.

En aplicaciones de control es necesario conocer la velocidad angular y la posición del eje por ello se emplean sensores denominados encoder, los cuales pueden ser incrementales o absolutos. Los encoder incrementales generan trenes de pulsos proporcionales al movimiento angular, que permite medir velocidad a partir de la frecuencia y la posición relativa.

El uso de autómatas en la automatización industrial ha permitido desarrollar sistemas automáticos. El PLC Siemens S7-1200 ofrece capacidad de procesamiento suficiente para implementar el control de velocidad, así como interfaces de comunicación compatibles con el variador de frecuencia mediante protocolos como Profinet o Modbus. El encoder puede

conectarse directamente al variador o al PLC se prefiere que el autómatas reciba directamente la señal del encoder e interprete la velocidad real y calcule el error que genere la señal de control que regule el variador, la integración del proceso centralizado facilita la supervisión y modificación de los parámetros de control desde una interfaz HMI.

3.2. Motor de corriente alterna (AC)

Los primeras teorías y prácticas de los motores asíncronos surgieron en el año 1888 por Galileo Ferraris y Nikola Tesla demostraron la viabilidad de generar campos electromagnéticos rotativos este principio fundamental permitió el posterior desarrollo, en 1890 por Dolivo Dobrowolsky el primer motor trifásico comercial que incorporaba un innovador diseño de rotor en jaula de ardilla combinado con un estator de devanado distribuido.

El cambio industrial a partir de 1900 los sistemas trifásicos desplazaron progresivamente a los motores monofásicos en aplicaciones industriales que consolidó la posición dominante de estos motores eléctricos entre sus características más relevantes se destacan por su configuración mecánica que garantiza operación continua en entornos industriales y su rendimiento en condiciones de operación adversas.

La principal limitación funcional de estos motores es su operación a velocidad constante que resulta mediante la integración de dispositivos electrónicos y el control digital avanzado. Esta innovación permitió implementar esquemas de regulación de velocidad, ampliando significativamente su campo de aplicación. Datos actuales indican que aproximadamente 4 de cada 5 motores utilizados en procesos industriales corresponden a esta tecnología, testimonio de su eficiencia energética y adaptabilidad operacional [2].

3.2.1 Partes del motor

El motor de inducción de tres fases es construido por dos piezas fundamentales el estator y rotor, los mismos que encuentran dentro de la carcasa que protege el ventilador, eje, estator entre otros de esta manera el rotor encaja dentro del estator con el entrehierro que los separa para que no entren en contacto eléctrico o físico [3].



Figura 1. Componentes del motor de inducción

3.2.1.1. Estator

El estator está compuesto por un núcleo fabricado mediante la apelación de láminas delgadas de acero al silicio las cuales presentan la siguiente figura 2. Estas laminaciones conforman la estructura cilíndrica hueca en el interior del rotor.

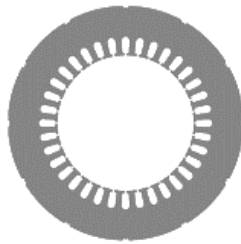


Figura 2. Láminas de acero del núcleo del estator

El núcleo del estator aloja tres bobinados, elaboradas con conductor de cobre esmaltado estas bobinas, al interactuar con el núcleo laminado de acero constituyen un electroimán donde los terminales de cada bobinado se conectan a la caja de conexiones mediante bornes aislados que permite configuraciones en estrella (Y) o triángulo (Δ), como en la figura.

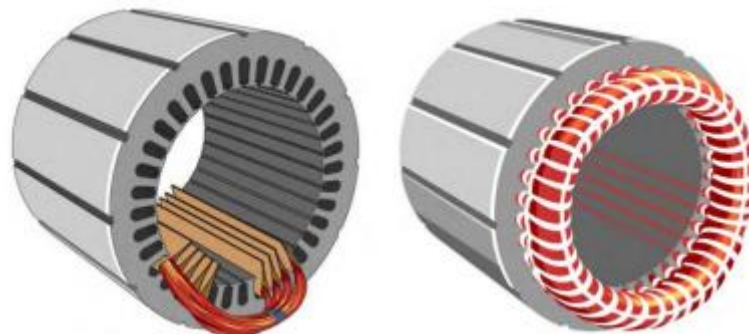


Figura 3. Partes del estator

3.2.1.2. Rotor

El rotor consiste en un apilado de láminas ferromagnéticas aisladas entre sí con ranuras axiales que alojan barras conductoras de aluminio fundido bajo presión, estos conductores se interconectan en ambos extremos mediante los anillos de cortocircuito que forman la estructura jaula de ardilla cuando las corrientes inducidas circulan por las barras producto del campo magnético rotatorio del estator que genera un flujo magnético secundario el cual permite la interacción entre ambos campos que produce el par electromagnético que se transmite a través del eje mecánico que permite su rotación de la máquina rotativa [4].

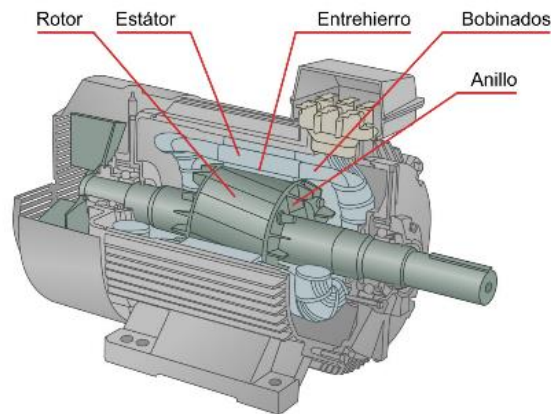


Figura 4. Componentes del rotor

3.2.2 Principio de funcionamiento

Al energizar los devanados del estator con un sistema AC trifásico balanceado se distribuye la fuerza magnetomotriz de carácter sinusoidal en el entrehierro, este fenómeno electromagnético genera un campo magnético rotatorio cuya velocidad angular es por la frecuencia de alimentación y los polos, cumpliendo con la relación:

$$n_s = \frac{60 * f_s}{p}$$

Donde:

n_s : Velocidad de sincronismo

f_s : Frecuencia del estator

p : Número de pares de polos

El campo magnético generado en el estator interactúa con el campo magnético que se distribuye en el entrehierro con las corrientes en las barras que conforman el rotor. Esta interacción provoca una distorsión en las líneas de flujo magnético, lo que genera una fuerza electromagnética tangencial respecto al eje de rotación o flecha, originando el par motor que impulsa el giro de la máquina rotativa.

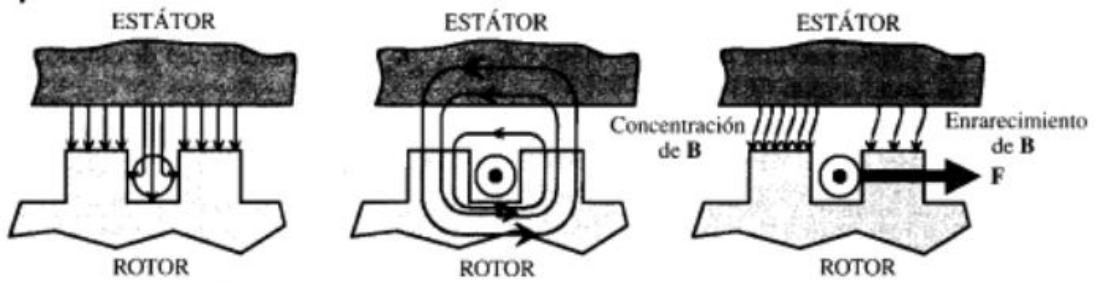


Figura 5. Interacción campo - corriente para la producción de par

El par del motor es la fuerza electromagnética que actúan sobre el rotor, lo que obliga a éste a seguir el campo magnético giratorio dependiendo del sentido de la corriente eléctrica que puede ser en sentido horario o antihorario a medida que la velocidad se aproxima al sincronismo, el par inducido disminuye progresivamente. Dado el principio de operación, las máquinas rotativas funcionan a velocidad constante determinada por la frecuencia lo que, al utilizar un convertidor de frecuencia, es posible modificar este parámetro y por ende controlar la marcha del motor es por ello que el uso de sistemas de accionamiento permite la variación y supervisión de las magnitudes eléctricas para el control de la máquina rotativa.

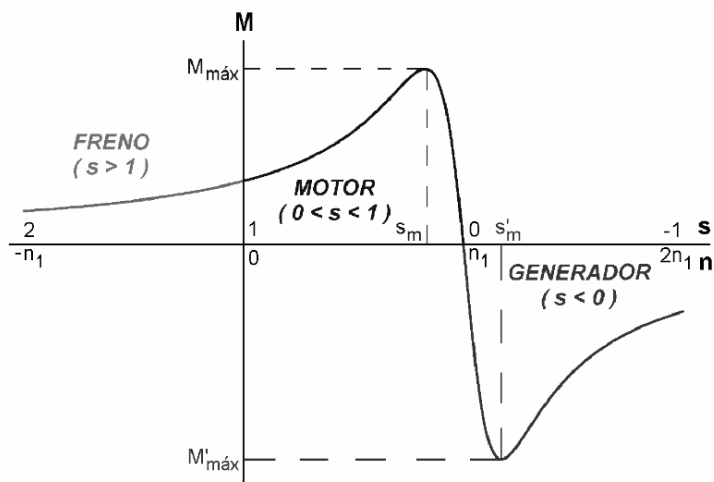


Figura 6. Características de Torque – Velocidad.

3.3. Motor Asíncrono

El motor asíncrono trifásico se compone de las partes del estator y el rotor, el primero contiene un conjunto de bobinas formadas por conductor de cobre esmaltado trifásicas organizadas en el interior del núcleo magnético desplazadas en 120 grados eléctricos que se energizan con una fuente AC trifásica lo que estas bobinas generan un campo magnético giratorio que se propaga a través del entrehierro.

En el rotor existen dos configuraciones el de jaula de ardilla y del rotor bobinado donde en ambos casos el campo magnético se induce la corriente en los cables del rotor debido a la variación del flujo magnético. Esta corriente inducida, al interactuar con el campo giratorio, produce una fuerza electromagnética que origina el par de torsión generando el movimiento del eje o flecha de la máquina rotativa.

La velocidad síncrona del campo magnético en el estator, determinada por la frecuencia de alimentación de 60 Hz y la configuración del número de polos del motor, aunque el rotor gire a una velocidad levemente inferior conocido como deslizamiento en cual si el rotor alcanzara la velocidad síncrona no existe variación de flujo por lo que no se induciría corriente alguna y el par motor resultaría nulo, donde la diferencia de velocidades es el concepto básico de funcionamiento de las máquinas asíncronas [5].

3.3.1. Descripción del motor Asíncrónico

El motor su principio fundamental electromagnético es similar al transformador, ambas máquinas eléctricas se basan en el principio de inducción, pero el motor presenta un entrehierro que separa físicamente el estator del rotor donde el estator es la sección inmóvil de la máquina que contiene el devanado primario distribuido en ranuras de un núcleo laminado magnético, los bobinados son alimentados con corriente alterna el cual produce un campo magnético giratorio.

El rotor constituye la parte giratoria de la máquina de inducción su núcleo está conformado por un apilado de láminas de acero al silicio aisladas entre sí, cuyas ranuras axiales alojan conductores de cobre o aleaciones de bronce fundidos in situ, estos conductores se interconectan en ambos extremos mediante anillos de cortocircuito, formando un circuito eléctrico cerrado conocido como jaula de ardilla

Al energizar el estator de la máquina rotativa el campo magnético que cruza el entrehierro induce corrientes en los conductores del rotor debido a la variación del flujo lo que genera el par de motor que inicia el movimiento giratorio, bajo condiciones de operación sin carga la velocidad

puede acercarse a la velocidad síncrona, pero al aplicarse carga la velocidad disminuye de forma mínima que establece un deslizamiento necesario para mantener el fenómeno de inducción [6].



Figura 7. Motor asíncrono trifásico.

3.4. Control de motores alternos de 4 cuadrantes

Un sistema de cuatro cuadrantes permite operar de forma continua y bidireccional la revoluciones y el par de la máquina rotativa de AC con excitación independiente lo que significa que el accionamiento puede [7]:

- Acelerar o mantener el giro en sentido horario (cuadrante I).
- Frenar regenerativamente en ese mismo sentido (cuadrante II), devolviendo energía a la red.
- Invertir el sentido de giro para rotar en sentido antihorario (cuadrante III).
- Frenar regenerativamente en sentido antihorario (cuadrante IV).

Los sistemas de control utilizan convertidores que se alimenta de fuentes de voltaje monofásicas o trifásica el cual varía dependiendo de la carga. En la industria, es común los inversores bidireccionales con modulación por ancho de pulso (PWM) con dispositivos de conmutación como IGBT o MOSFET estos convertidores permiten controlar la aceleración como la desaceleración del motor [8].

El control de un cuadrante se limita a operar bajo condiciones donde la velocidad y el par tienen la misma dirección, como ocurre en los cuadrantes I y III, en el primer cuadrante el motor gira en sentido horario, generando un par positivo que impulsa la carga hacia la velocidad necesitada, en cambio el tercer cuadrante representa el funcionamiento el giro sentido antihorario, donde se invierte la dirección del campo magnético lo que a su vez genera un par de sentido opuesto al del primer cuadrante, haciendo posible la rotación inversa del motor.

Tabla 1. Cuadrantes de operación.

Cuadrante	Velocidad (ω)	Par (T)	Modo de operación
I	Positiva	Positivo	Motor en sentido directo
II	Positiva	Negativo	Generador (frenado directo)
III	Negativa	Negativo	Motor en sentido inverso
IV	Negativa	Positivo	Generador (frenado inverso)

3.5. Definición de Cuadrantes

El control de velocidad y torque de las máquinas rotativas de AC con excitación independiente relaciona las variables eléctricas y la mecánica es fundamental porque la velocidad es función directa del voltaje aplicado al inducido, mientras que el par responde proporcionalmente a la corriente, para invertir el sentido de giro se debe cambiar dos de sus tres fases en la fuente de alimentación trifásica y en la fuente monofásica se invierte el condensador de arranque, el cual modifica la dirección del par el cual cambia el sentido de la corriente en el inducido.

En control de las máquinas rotativas en las empresas industriales es necesario por las distintas actividades en las líneas de producción donde los cuadrantes se definen según las combinaciones de dirección de par y velocidad del motor basándose en las necesidades de operación. Por ejemplo, bombas o ventiladores operan normalmente en un solo sentido de rotación y par, mientras que equipos como grúas o elevadores demandan control capaz de invertir el giro sin interrumpir necesariamente el par aplicado. La presente figura representa la operación de cada cuadrante en cual se observa la dirección de la energía, corriente y voltaje [9].

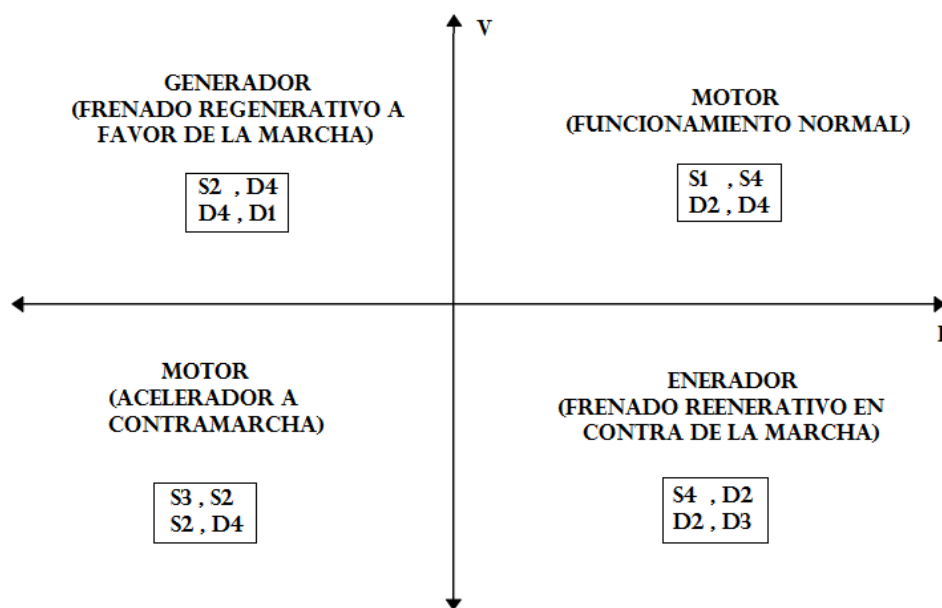


Figura 8. Cuadrantes de operación

El comportamiento de un motor de AC se clasifica en cuatro cuadrantes según la relación entre el voltaje (V), la fuerza contraelectromotriz (ϵ), la corriente (I), el par y la velocidad [10]:

- **Primer cuadrante:** El voltaje (V) es mayor que la fuerza contraelectromotriz (ϵ), y la corriente (I) es positiva. Tanto el par como la velocidad son positivos; el motor actúa como accionamiento directo.
- **Segundo cuadrante:** El voltaje es menor que ϵ , y la corriente es negativa. La velocidad es positiva, pero el par es negativo, lo que indica frenado regenerativo en avance.
- **Tercer cuadrante:** V y ϵ son negativos, y V es mayor en magnitud que ϵ . La corriente es negativa, al igual que el par y la velocidad. El motor opera en reversa en modo motriz.
- **Cuarto cuadrante:** V y ϵ son negativos, el V es menor en magnitud. La corriente es positiva, lo que genera un par positivo con velocidad negativa; corresponde al frenado regenerativo en reversa.

3.6. Control de velocidad

El control escalar de velocidad aplicado a máquinas rotativas de inducción, la magnitud del voltaje suministrado al estator se ajusta proporcionalmente a la frecuencia de operación, con el objetivo de mantener la densidad del flujo magnético en el entrehierro, este control conocido como V/f que es aplicado en variadores de frecuencia dentro de la industria por la simplicidad y bajo costo. La alimentación trifásica o monofásica del motor se realiza mediante señales de frecuencia variable producidas por un inversor a través de PWM por medio de microcontroladores se logra mantener la relación voltaje/frecuencia constante, lo cual permite conservar un par uniforme a lo largo del rango operativo el control escalar es adecuado para aplicaciones donde no se requiere precisión en la regulación del par [11].

3.7. Control de motor AC con variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia (VFD, en inglés Variable Frequency Drive) es un convertidor que regula las revoluciones por minuto de un motor AC que modifica la frecuencia y la tensión eléctrica de la señal que se aplica al estator. Al convertir los valores fijos de la red en magnitudes variables, el VFD permite el arranque, operación y parada cubriendo las necesidades de la carga.

El uso de un VFD resulta apropiado cuando la aplicación exige:

- Control del par y velocidad.
- Regulación suave de movimiento.

- Trayectorias cinemáticas.
- Operación con sistemas mecánicos.

3.7.1. Ventajas del variador:

- Reducción de corrientes de arranque que elimina los picos típicos del arranque directo o de la conexión de arranque estrella - triángulo.
- Gestión de par en todo el rango de velocidad que evita bloqueos y sobreesfuerzos sobre el eje.
- Comunicación industrial integrada que posibilita el diagnóstico, registro de fallas y supervisión remota.
- Rampas de aceleración y desaceleración programables
- Ajuste dinámico del consumo eléctrico

3.7.2. Desventajas del variador:

Los variadores de frecuencia presentan limitaciones técnicas y operativas que se consideran en el diseño del sistema de control, las principales restricciones radican en que su instalación, configuración y mantenimiento requieren personal con conocimientos especializados en sistemas automatizados para la configuración de los parámetros y protocolos de comunicación. Otra desventaja asociada a los VFD es la generación de armónicos y ruido electromagnético, los cuales pueden introducir intermitencias en equipos sensibles conectados a la misma red eléctrica de deben aplicar filtros para compensar el sistema [12].

3.7.3. Tipos de variadores de velocidad

Los controladores de velocidad se encasillan en tres grupos: mecánicos que es la transmisión por componentes físicos, hidráulicos por regulación mediante fluidos y electrónicos mediante variadores de frecuencia fundamentados en la electrónica de potencia, el presente proyecto se enfoca en los variadores electrónicos debido a su precisión para el control de la máquina rotativa.

3.7.4. Variadores eléctrico - electrónicos

Los variadores electro-electrónicos en el ámbito industrial incorpora el motor eléctrico y su unidad de control eléctrico donde el variador se refiere al dispositivo encargado del control, lo primeros de esta categoría empleaban tubos en vacío con la modernización de la electrónica de

potencia, estos componentes fueron reemplazados por dispositivos semiconductores de estado sólido, lo que permite la reducción en tamaño y costo que eleva la confiabilidad y la operación.

Dentro de los variadores eléctrico - electrónico se pueden distinguir cuatro tipos principales según el tipo de motor y el principio de control que emplean:

- Accionamientos para motores DC controla la velocidad mediante variación del voltaje de armadura
- Sistemas de corrientes de Foucault que utilizan pérdidas por Eddy currents para regulación
- Controladores por deslizamiento que ajusta la velocidad modificando la resistencia rotórica.
- Variadores de frecuencia (VFD) son dispositivos electrónicos para motores AC que modulan frecuencia y voltaje"

3.7.5. Variadores de deslizamiento

Son utilizado con motores de inducción que poseen un rotor devanado donde la velocidad mecánica de estos motores depende directamente del deslizamiento, el cual puede ajustarse incrementando la resistencia en el circuito del rotor o disminuyendo el voltaje estos parámetros controlan la velocidad de operación del motor [13].

3.7.6. Variadores para motores de AC

Los variadores en AC modifican la velocidad de rotación controlando la variable de la frecuencia por otra parte los motores de corriente continua se ajusta la velocidad con la variación del voltaje aplicada para los motores AC los dispositivos de control de velocidad se denominan AFD (Adjustable Frequency Drive) o VFD (Variable Frequency Drive) que permiten variar las revoluciones de operación en máquinas eléctricas rotatorias de rotor bobinado o en jaula de ardilla mediante el ajuste de la frecuencia [14]. La velocidad mecánica se expresa como:

$$Nm = \frac{(120 \cdot f)}{P (1 - s)}$$

Nm: Velocidad mecánica (rpm).

f : Frecuencia de alimentación.

(Hz) s: Deslizamiento (adimensional).

P: Número de polos (adimensional).

La ecuación establece que la velocidad mecánica de la máquina rotativa depende directamente de la frecuencia de la señal de alimentación, donde los variadores ajustan la misma para modificar la velocidad del eje del motor.

Los variadores son dispositivos que mantienen constante la relación voltaje/frecuencia (V/Hz) dentro del rango operativo para evitar fenómenos como la saturación del núcleo magnético, en el caso de existir alteración se puede ocasionar que se mantenga un voltaje fijo mientras se reduce la frecuencia que genera una caída del par motor, lo que limita la entrega de potencia es por ellos importante conservar una relación V/Hz adecuada con el fin de obtener estabilidad del par y la eficiencia operativa del sistema [15].

3.8. Controlador Lógico Programable

El autómatas (PLC, del inglés Programmable Logic Controller) es un dispositivo electrónico diseñado para operar en ambientes industriales que permite automatizar y supervisar procesos de producción mediante el tratamiento de señales de entrada y el accionamiento de salidas. El autómatas surgió en la década de 1960 como solución a los controladores en relés, con el objetivo de minimizar el diseño, mantenimiento y configuración de los distintos circuitos de control industrial.

El PLC su lógica de programación al inicio se realizaba mediante listados de instrucciones secuenciales, pasando el tiempo se optó por el lenguaje de escalera (Ladder Diagram), una representación gráfica basada en esquemas eléctricos similares a la lógica cableada, pero de forma horizontal la cual facilita la programación de los procesos automatizados [16].

3.8.1. Componentes de un PLC

Un PLC puede estar compuesto por módulos individuales o en una estructura compacta que incluye los siguientes elementos:

- Entradas/Salidas (E/S) se conectan sensores, pulsadores, actuadores, válvulas, etc.
- Unidad Central de Procesamiento (CPU) ejecuta el programa y coordina el funcionamiento del sistema.
- Fuente de alimentación en AC o DC.
- Unidad de programación el software mediante el cual se configura la lógica de control y se carga el programa lógico.
- Memoria donde se almacena el programa del usuario y datos del proceso en ejecución.

3.8.1.1. Características Fundamentales

- Capacidad de lectura de señales provenientes de sensores.
- Comunicación en tiempo real con equipos de campo.
- Interfaces amigables para interacción con el operario o supervisores.
- Integración con sistemas SCADA para monitoreo y control remoto.
- Programación en diversos lenguajes normalizados (según IEC 61131-3).
- Operación continua durante periodos prolongados sin interrupción.
- Capacidad para gestionar entradas y salidas remotas mediante redes industriales.

Los fabricantes de autómatas programables han revolucionado la Industria 4.0 mediante tecnologías que incrementan la capacidad de procesamiento y conectividad entre dispositivos el cual permite ejecutar tareas cada vez más complejas, con el objetivo de salvaguardar la vida del operador en entornos de automatizados [17].

3.9. Human Machine Interface

La Interfaz operador - máquina (HMI del inglés Human Machine Interface) es el medio que el operador interactúa con un sistema automatizado o una máquina que integra componentes de hardware y software que permite visualizar, supervisar y controlar los parámetros de operación de un proceso automatizado.

En la industria la pantalla HMI se manifiesta comúnmente interactúa por medio de gráficas las cuales se comunican con controladores lógicos programables (PLC) los que facilitan la interpretación de datos, la inspección en tiempo real de las variables como temperatura, presión, velocidad, nivel, humedad, flujo y la ejecución de salidas por parte del operador de forma manual o automática.

La interfaz de una pantalla HMI depende mucho de la necesidad y el proceso a controlar el cual aumenta su complejidad y diseño que pueden ser básicas como un arranque directo hasta un proceso donde debe incluirse gráficas dinámicas, alarmas, históricos de datos y diagnósticos del sistema, en la actualidad las HMI se implementan también en dispositivos móviles, tabletas o paneles industriales adaptándose a las necesidades de supervisión de un proceso automatizado. La pantalla HMI no solo mejora la interacción entre el operario y la máquina, sino que también contribuye a la operatividad de un proceso de control automatizado el cual puede detectar fallas, recopila información histórica y la toma de decisiones [18].

3.10. Encoder

El encoder es un sensor electromecánico para medir posición, velocidad angular y dirección de giro en sistemas de automatización su funcionamiento es la conversión de movimiento mecánico en señales eléctricas que por medio del autómatas o variadores de frecuencia se pueden leer los datos, existe dos tipos el encoder incremental, que proporciona pulsos por cada desplazamiento angular sin indicar posición absoluta y el encoder absoluto, que entrega un valor único de posición angular para cada punto del eje, permitiendo conocer la ubicación exacta tras interrupciones eléctricas [19].

Tabla 2. Comparación del encoder incremental y encoder absoluto.

Característica	Encoder Incremental	Encoder Absoluto
Tipo de señal de salida	Pulsos (A, B, Z)	Código digital único por posición
Referencia de posición	No conserva la posición tras apagado	Conserva la posición incluso tras cortes de energía
Precisión	Media a alta, dependiendo de resolución	Alta precisión posicional
Complejidad de conexión	Baja	Media a alta
Costo	bajo	alto
Aplicaciones típicas	Motores de alta velocidad, cintas transportadoras	Robots, CNC, aplicaciones de posicionamiento preciso
Referencia	Requiere retorno a cero tras encendido	No requiere retorno a cero

3.11. Redes industriales

Los sistemas de comunicación industrial presentan una estructura jerárquica definida para la transmisión de datos, donde cada nivel cumple funciones específicas en el flujo de información que se presente en la figura.

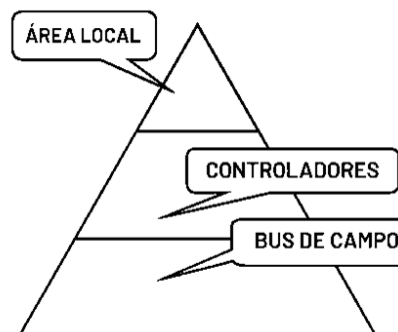


Figura 9. Jerarquía de comunicaciones industriales.

En los entornos de automatización industrial, la arquitectura de redes se organiza con el fin de optimizar el flujo de información y el control en el nivel superior se encuentra la capa de gestión de la planta o red de área local (LAN), desde donde se generan y distribuyen las directrices operativas hacia los niveles inferiores de control y supervisión.

La capa intermedia corresponde al control el cual se encuentran vinculados dispositivos como autómatas programables (PLC), sistemas de supervisión SCADA y buses de instrumentación, la comunicación entre estos dispositivos es mediante protocolos de comunicación estándar, esta integración permite una gestión de la información en tiempo real, así como los parámetros y diagnosticar los procesos automatizados a través de la HMI.

Las velocidades de transmisión de datos en redes industriales oscilan entre 2 y 10 Mbps los cuales se emplean topologías tipo bus, que permiten ramificaciones hacia diferentes dispositivos, con segmentos que pueden alcanzar distancias de hasta 2 km aproximadamente, dependiendo del tipo de protocolo de comunicación y el medio físico [20].

Tabla 3. Clasificación de redes industriales

Tipo	Descripción
Redes industriales	Permiten la integración de PLC con sistemas de información mediante estándares como Ethernet Industrial o protocolos propietarios. Son esenciales para la digitalización de procesos.
Buses de campo	Están diseñados para la interconexión de sensores, actuadores y controladores, utilizando protocolos abiertos como Modbus, PROFIBUS, Interbus-S o DeviceNet, lo cual favorece la interoperabilidad.
Bus de dispositivos	Representan soluciones de menor costo, que vinculan sensores y actuadores, con menos cableado.

3.12. Evolución de procesos industriales

La automatización ocurre debido a la primera revolución industrial donde los sistemas mecánicos sustituyeron operaciones manuales por mecanismos automatizados, durante el siglo XX en la primera mitad se usó relés electromagnéticos que permitió implantar lógica de control cableada, en la segunda mitad con la inclusión de la electrónica que redujo el tamaño de los equipos y se disminuye los costos de mantenimiento y se logra alcanzar los objetivos de incrementar la producción y reducir la intervención humana.

La introducción del autómata programable (PLC) reemplazó los paneles de relés por un sistema reconfigurable por software, la posibilidad de reprogramar los autómatas se eliminan los elevados costos, la evolución de los procesos industriales se vincula al progreso de las redes de

comunicación como la IEEE-488 o los buses serie RS-485/422 que proporciona la sincronización en tiempo real y la recolección de datos mediante protocolos específicos para automatización, tales como Profibus y Profinet [21]. Estas redes permiten comunicar controladores, dispositivos de campo y sistemas de supervisión con altas velocidades requisito esenciales para la Industria 4.0.



Figura 10. Evolución de procesos industriales

3.13. Sistemas de control industrial

Los controladores industriales se agrupan en tres categorías aquellos que tienen una sola computadora principal, las que tienen múltiples computadoras que se comunican entre sí y las que tienen una combinación de ambos. La elección de estos esquemas depende de la complejidad, la necesidad de dividir funciones de control y la estructura física de la instalación.

3.13.1. Control centralizado

Este esquema se aplica en instalaciones de baja complejidad con un único controlador central que gestiona las tareas que incluye funciones de monitoreo y supervisión, esta arquitectura ofrece simplicidad en entornos reducidos; sin embargo, su escalabilidad es limitada.

Las limitaciones principales del control centralizado es la dependencia total de un único dispositivo que si falla toda la operación se ve interrumpida, haciendo necesario implementar sistemas redundantes para garantizar continuidad por ende requiere el cableado de todas las señales de sensores y actuadores hacia el punto central, lo cual incrementa los costos y la complejidad.

3.13.2. Control distribuido

El control distribuido se segmenta en áreas funcionales o equipos específicos, cada uno controlado por su propio autómatas que permite asignar tareas simples que reducen la complejidad del software y el mantenimiento con la mayor tolerancia a fallos donde si una unidad falla, las demás pueden continuar operando de forma independiente. Por otro lado, la implementación de un control distribuido analizar la segmentación para identificar procesos independientes y diseñar la arquitectura de comunicación adecuada.

3.13.3. Control híbrido

El control híbrido combina las características de los sistemas centralizados y distribuidos en un proceso de producción automatizado no es viable independizar completamente todos los procesos, por lo que se recurre a soluciones mixtas bajo esta condición los procesos simples se gestionan de forma autónoma, mientras que los sistemas complejos son controlados desde un núcleo central [22].

3.14. Protocolo MODBUS

MODBUS RTU es el protocolo de comunicación industrial maestro - esclavo, diseñado por buses seriales como RS-232 y RS-485, con el objetivo de transmitir datos entre equipos electrónicos como autómatas y sensores que ocupan codificación binaria lo que permite un uso del canal de comunicación.

En una red MODBUS, el maestro es quien inicia la comunicación enviando peticiones, mientras que los esclavos solo responden este protocolo admite comunicación individual (peer-to-peer) o general (broadcast), siendo una solución simple y económica utilizada en automatización con procesos industriales básicos.

3.15. Protocolo PROFIBUS

PROFIBUS (Process Field Bus), desarrollado por Siemens e impulsado por la organización PROFIBUS International es un protocolo de redes industriales en la automatización a diferencia de MODBUS que permite la comunicación cíclica como acíclica y su diseño soporta redes con mayor velocidad [23]. Existen dos variantes del protocolo Profibus:

- PROFIBUS - DP (Decentralized Peripherals): Aplicaciones de control rápido de periféricos distribuidos en sensores y actuadores.

- PROFIBUS - PA (Process Automation): Orientado al control de procesos en ambientes peligrosos, usando una topología segura.

PROFIBUS opera en el bus RS-485 con velocidades desde 9.60 kbps hasta 12.0 Mbps que soportando hasta 126 nodos por red este protocolo maneja acceso mediante token-passing y polling, que permite la comunicación maestro-esclavo [24].

Tabla 4. Comparación entre MODBUS y PROFIBUS

Característica	MODBUS RTU	PROFIBUS DP
Tipo de red	Serie (RS-232/RS-485)	Serie (RS-485), par trenzado o fibra óptica
Topología	Bus lineal o estrella limitada	Bus lineal con posibilidad de derivaciones
Velocidad de transmisión	Hasta 115.2 kbps	Hasta 12 Mbps
Número de dispositivos	Hasta 247 esclavos	Hasta 126 nodos (maestros y esclavos)
Modo de comunicación	Maestro-esclavo (cliente-servidor)	Maestro-esclavo y maestro-maestro
Gestión de errores	CRC-16	Verificación cíclica y control de colisiones
Diagnóstico y monitoreo	Limitado	Avanzado, con diagnóstico en tiempo real
Facilidad de implementación	Alta (simple, bajo costo)	Media-alta (mayor configuración y costo)
Aplicaciones comunes	Automatización básica, SCADA, monitoreo	Automatización industrial avanzada, manufactura

3.16. Accionamientos eléctricos en motores de inducción

El empleo de accionamientos eléctricos en entornos industriales resulta importante para reducir del consumo de energético y mejorar los procesos de producción, estos sistemas están conformados por tres componentes principales: un módulo de medición, una unidad de control y un convertidor electrónico de potencia, la elección y configuración de cada uno de estos elementos depende del tipo de máquina rotatoria a controlar de tipo inductivo o síncrono.

Estos sistemas no solo controlan la velocidad y del par motor también integran funciones de protección, monitoreo en tiempo real y comunicación con sistemas de automatización por lo cual los accionamientos eléctricos son considerados pilares clave en la transición hacia una industria optima y eficiente [25].

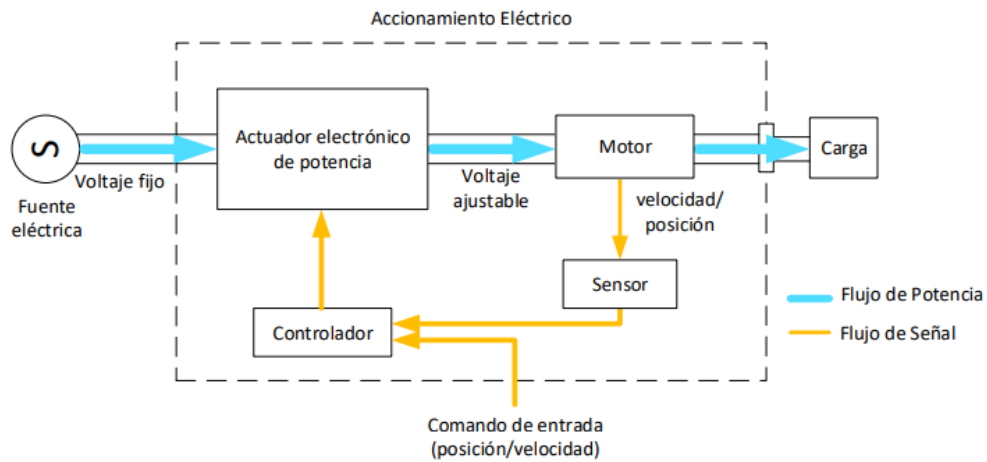


Figura 11. Diagrama de bloques de un Accionamiento Eléctrico

3.17. Medición de velocidad y posición angular

La medición de la velocidad angular y de la posición es fundamental en los sistemas de control con realimentación, ya que proporciona los parámetros para el ajuste dinámico de la respuesta del sistema por medio del sensor encoder que es un dispositivo que se acopla directamente a la flecha de la máquina y convierte el movimiento rotacional en señales digitales.

El funcionamiento del encoder se basa en un disco ranurado que gira con el eje del motor que es atravesado por un haz de luz infrarroja, emitido desde una fuente fija y captado por sensores ópticos cuando el disco gira, las interrupciones del haz de luz provocadas al paso de las ranuras generan la secuencia de pulsos eléctricos, la frecuencia de estos pulsos es proporcional a la velocidad de giro, mientras que el conteo y el análisis de la secuencia permiten determinar la posición angular del eje por este principio de operación lo convierte en un dispositivo necesario en sistemas de control de velocidad para el monitoreo del comportamiento dinámico del motor [26].

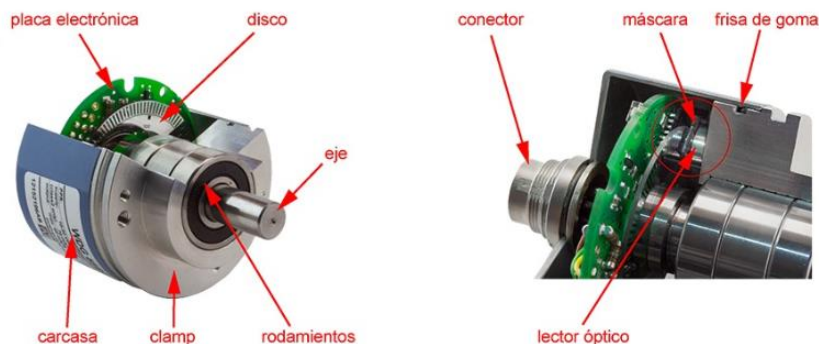


Figura 12. Estructura del encoder

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1. Métodos de investigación

Para el desarrollo del presente proyecto “Implementación de un sistema de control Flux-Vector para la optimización de la velocidad en motores de corriente alterna” se emplearon métodos científicos e inductivos los que permiten estudiar el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones reales de operación y validar el control configurado en el proceso automatizado

4.1.1. Método científico

Este método facilita la aplicación de procedimientos sistemáticos para la adquisición de conocimiento técnico por medio de la experimentación, el modelado y la validación de las variables que intervienen en el control del motor de inducción a partir de pruebas experimentales es posible observar el impacto del control Flux-Vector en la operación del sistema, sustentando los resultados con fundamentos empíricos.

4.1.2. Método inductivo

El enfoque inductivo permite mediante la observación la identificación de fenómenos particulares de la operación del motor, el comportamiento de la retroalimentación del encoder y la variación del par de la máquina rotativa bajo diferentes frecuencias de operación que son recopilados y analizados para establecer patrones de funcionamiento que son la base del diseño e implementación del control donde los parámetros registrados se analizan por medio de tablas comparativas y gráficos que orienta a validar el proceso automatizado.

4.2. Diagrama de flujo

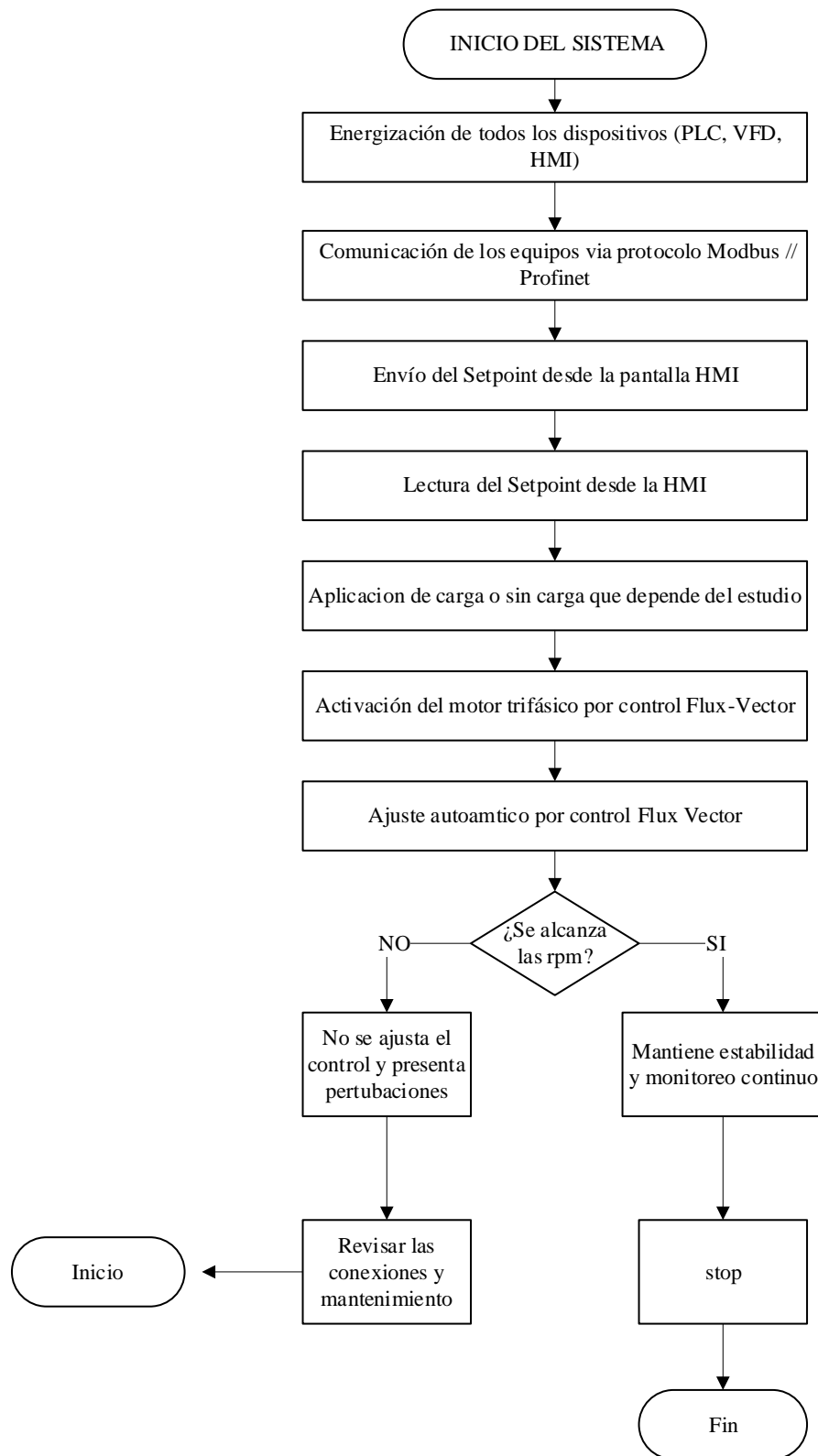


Figura 13. Diagrama de flujo

4.3. Técnicas de recolección de los parámetros

4.3.1. Observación

Se realiza una evaluación detallada del entorno experimental, considerando las condiciones operativas actuales del sistema de control vectorial aplicado a motores de corriente alterna. Esta técnica permite identificar comportamientos en la dinámica del motor, así como posibles inconsistencias en la respuesta del control, lo que facilita un análisis integral del funcionamiento del sistema en condiciones reales.

4.3.2. Medición eléctrica

Se lleva a cabo mediante instrumentos de precisión con el fin de registrar parámetros eléctricos relevantes como tensión, corriente y frecuencia, así como la velocidad angular del motor. Estos datos permiten validar el desempeño del Flux-Vector.

4.4. Instrumentos utilizados

4.4.1. Software TIA Portal V16

La interfaz del software TIA Portal facilita la programación Ladder o de diagrama de bloques de funciones para la supervisión del programa de control en el autómata PLC que integra los parámetros de velocidad, torque y la visualización del estado de operación de la máquina bajo el esquema Flux-Vector.

4.4.2. Software LabVIEW

El entorno de desarrollo LabVIEW se utiliza como herramienta para la creación de una interfaz gráfica orientada al monitoreo en tiempo real de los parámetros eléctricos de la máquina rotativa que permite la interacción del operador y el sistema que facilita la supervisión del comportamiento del sistema automatizado.

4.4.3. Multímetro

El multímetro es un equipo que permite medir magnitudes eléctricas en circuitos de corriente DC y AC en valores RMS con la función principal de comprobar los parámetros registrados por la interfaz gráfica, asegurando las mediciones de voltaje y corriente eléctrica.

4.5. Características de los equipos

4.5.1. PLC S7-1200

El autómata programable Siemens S7-1200 AC/DC/RLY seleccionado para implementar el control flux-vector, es alimentada por corriente alterna de 120 V – 230 V con entradas digitales 24 V en corriente directa y salidas a relé 10 A, la programación del CPU se realiza mediante TIA Portal con el lenguaje Ladder y bloques funcionales (FBs), con capacidad de comunicación Profinet para sincronización en tiempo real con variadores de frecuencia.



Figura 14. PLC S7-1200

Tabla 5. Características técnicas del PLC S7-1200

Parámetro	Especificación
Tipo de CPU	CPU 1212C AC/DC/RLY
Alimentación	100–240 V AC
Entradas digitales (DI)	8 entradas a 24 V DC
Salidas digitales (DO)	6 salidas a relé
Entradas analógicas	2 integradas (0–10 V DC)
Salidas analógicas	No integradas
Memoria de programa	75 kB
Memoria de datos	2 MB (RAM), ampliable con tarjeta SD
Velocidad de procesamiento	0.08 μ s/instrucción lógica básica
Comunicación integrada	1 puerto PROFINET (Ethernet RJ45)
Protocolos soportados	Profinet
Expansión	Hasta 3 módulos de señal y 1 módulo de comunicación
Montaje	Carril DIN de 35 mm
Software de programación	TIA Portal V13 o superior

4.5.2. Módulo CM 1241

El módulo CM 1241 RS422/RS485 es una expansión de comunicación serial para el PLC Siemens S7-1200 su función es establecer la comunicación entre el autómatas y el variador de frecuencia que utiliza protocolos industriales sobre interfaces RS485 que transmite datos en tiempo real como velocidad, frecuencia, corriente o fallos del sistema.



Figura 15. Módulo CM 1241

Tabla 6. Características técnicas del módulo CM 1241 RS422/RS485

Parámetro	Especificación
Modelo	CM 1241 RS422/RS485
Compatibilidad	PLC Siemens S7-1200
Interfaces soportadas	RS422 / RS485
Protocolo soportado	MODBUS RTU / Freeport
Velocidad de transmisión	Hasta 115,2 kbps
Número de puertos	1 puerto serial
Tipo de conector	DB9 hembra
Montaje	Directo sobre riel DIN
Aislamiento galvánico	Integrado entre PLC y módulo
Indicadores LED	RX, TX y estado de comunicación
Aplicaciones	Comunicación con variadores, HMI, sensores.

4.5.3. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

El variador SINAMICS CU240E-2 forma parte de la familia SINAMICS G120 de Siemens, diseñado para aplicaciones que requieren control vectorial de flujo (Flux-Vector Control) en

motores de inducción o síncronos. En el presente proyecto, cumple la función de permitir el ajuste dinámico de la velocidad del motor, gestionando los parámetros eléctricos en tiempo real. En este caso particular, el CU240E-2 implementado se comunica mediante el protocolo MODBUS RTU, por lo que se emplea el módulo de comunicación CM 1241 en el PLC S7-1200 para establecer el enlace serial vía RS-485.



Figura 16. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

Tabla 7. Características técnicas del SINAMICS CU240E-2

Parámetro	Especificación
Modelo	SINAMICS CU240E-2 (versión con interfaz serial RS-485 para MODBUS RTU)
Número de parte	6SL3244-0BB12-1BA1
Familia	SINAMICS G120
Tensión de alimentación	3AC 380–480 V \pm 10%, 50/60 Hz
Potencia nominal	Desde 0.55 kW hasta 250 kW
Tipo de control	Control escalar (V/f) y control vectorial de flujo (FOC)
Interfaz de comunicación	MODBUS RTU (RS-485) – vía CM 1241 (en el PLC)
Entradas digitales	6 programables
Salidas digitales	2 programables
Entradas analógicas	2 (tensión o corriente)
Encoder compatible	HTL / TTL / incremental
Funciones adicionales	Protección térmica, freno integrado, supervisión de fallos
Montaje	Riel DIN o panel
Aplicaciones típicas	Bombas, ventiladores, compresores, transporte y control de movimiento

El variador SINAMICS G120 se compone de tres módulos principales:

- Unidad de control (CU)
- Módulo de potencia (PM)
- Panel de operador (BOP-2)

Los equipos que conforman el SINAMICS G120 componen aplicaciones industriales de control de motores mediante protocolos de comunicación como MODBUS RTU por medio del módulo CM 1241 que establece la comunicación entre el PLC S7-1200 y la CU240E-2.

Tabla 8. Componentes principales del variador SINAMICS G120

Componente	Descripción	Características principales
CU240E-2	Unidad de control encargada de gestionar el control vectorial del motor y la comunicación con el PLC.	Control V/f y Flux-Vector (FOC), interfaz RS-485 para MODBUS RTU, entradas/salidas digitales.
PM240-2	Módulo de potencia que convierte la energía de entrada para alimentar al motor en base al control de la CU.	Tensión de entrada 3AC 380–480 V, protección electrónica, con freno regenerativo.
BOP-2 (Basic Operator Panel)	Panel de operador que permite parametrizar, monitorear y diagnosticar el estado del variador localmente.	Pantalla LCD de dos líneas, navegación por teclas, acceso a parámetros sin PC.

4.5.4. Breaker 2 polos

El breaker bipolar cumple una función esencial en la protección del sistema de control este dispositivo actúa como interruptor automático de seguridad que protege al variador de frecuencia SINAMICS frente a sobrecargas térmicas y cortocircuitos.



Figura 17. Breaker 2 polos

Tabla 9. Características técnicas del breaker de 2 polos

Parámetro	Especificación
Tipo	Interruptor termomagnético bipolar 2P
Tensión nominal	110 V/220 V AC
Corriente nominal (In)	10 A
Capacidad de corte	6 kA a 10 kA (según norma IEC 60898 / 60947-2)
Curva de disparo	Tipo C (uso general con cargas inductivas moderadas)
Frecuencia	60 Hz
Número de polos	2 (actúa sobre ambas fases simultáneamente)
Tipo de montaje	Riel DIN
Aplicación en el sistema	Protección del circuito de alimentación del variador

4.5.5. Breaker 3 polos

El breaker tripolar protege directamente el motor de corriente alterna trifásico que desconecta de forma simultánea de las tres fases ante condiciones anormales como sobrecarga o cortocircuito



Figura 18. Breaker 3 polos

4.5.6. Switch Ethernet Industrial RIS3008S-8T

El switch industrial realiza la comunicación de datos dentro del entorno de control automatizado que permite la interconexión del PLC, variador de frecuencia y la pantalla HMI de supervisión que garantiza la conexión estable incluso en condiciones industriales adversas. Su soporte de QoS (Quality of Service) optimiza el tráfico de red, asegurando la prioridad en el envío de señales de control.

Tabla 10. Características técnicas del Switch Ethernet

Parámetro	Detalle
Modelo	RIS3008S-8T
Puertos	8 puertos RJ45 10/100Base-TX
Estándares de red	IEEE 802.3
QoS (Quality of Service)	Integrado
Tipo de montaje	Carril DIN (DIN rail)
Rango de alimentación	12 V DC
Temperatura de operación	-40 °C a +75 °C
Protección	Contra sobrecorrientes y sobretensiones
Aplicación	Redes industriales en ambientes hostiles

4.5.7. Cable de conexión Modbus

El cable de conexión Modbus es el medio de comunicación que emplea el protocolo Modbus RTU o ASCII, especialmente en redes RS-485 establece la transmisión de datos entre dispositivos esclavos - maestro en los autómatas, variadores de frecuencia y módulos. El cable se compone por conductores trenzados y blindados, lo que reduce la interferencia electromagnética y genera una señal estable.



Figura 19. Cable de conexión Modbus

4.5.8. MODBUS conector

El conector SIMATIC DP para MODBUS es un dispositivo de conexión dentro de redes industriales basada en comunicación serial RS485 que incluye una salida de cable en posición oblicua, el modelo cuenta con un cierre integrado y función de seccionamiento lo que permite aislar tramos de red sin necesidad de desmontar el conector que soporta velocidades hasta 12 Mbit/s.



Figura 20. Conector MODBUS

4.5.9. Motor trifásico

El motor trifásico de inducción utilizado en entornos industriales y comerciales debido a su capacidad de generar un par constante y por su rendimiento frente a motores monofásicos de igual potencia es por ello ideal para el accionamiento de sistemas como bombas, ventiladores, montacargas, grúas y equipos que requieren funcionamiento continuo o intermitente.

Para el presente proyecto se utiliza un motor trifásico modelo 3-IE2-63M2-4/B35, con carcasa tipo B35 y grado de protección IP55, lo que garantiza resistencia frente a polvo y salpicaduras de agua. Este equipo presenta una potencia nominal de 0.18 kW, opera a una frecuencia de 60 Hz y una velocidad de 1610 r.p.m con su tensión de operación puede ser de 220 V, con una corriente nominal de 1.08 A y un factor de potencia de 0.73 lo es adecuado para sistemas automatizados de baja potencia



Figura 21. Máquina rotatoria

4.5.10. HMI KTP400 Basic

La pantalla HMI KTP400 Basic de Siemens es una interfaz hombre-máquina diseñada para la inspección y control de procesos industriales que permite al operario visualizar variables, enviar a accionar o detener procesos y diagnosticar fallos en tiempo real, es con el software TIA Portal que se configura las imágenes y su conexión directa con PLCs S7-1200 es ideal para aplicaciones donde se requiere una interacción hombre – máquina.

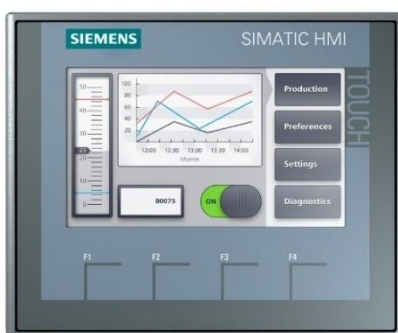


Figura 22. Pantalla HMI

Tabla 9. Características técnicas de la pantalla HMI KTP400 Basic

Parámetro	Especificación
Modelo	KTP400 Basic
Tamaño de pantalla	4" TFT color
Resolución	480 × 272 píxeles
Tipo de pantalla	Táctil resistiva
Colores	65,536 colores (16 bits)
Interfaz de comunicación	1 × Ethernet (RJ45) / 1 × USB (tipo mini)
Memoria de usuario	2 MB
Programación	TIA Portal V11 o superior
Protección frontal	IP65
Alimentación	24 V DC
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C
Montaje	Empotrado en panel

4.5.11. Encoder OMRON E6B2-CWZ6E

El OMRON E6B2-CWZ6E es un encoder incremental rotativo que convierte el desplazamiento angular de un eje en señales eléctricas de pulsos. Está diseñado para aplicaciones industriales que requieren detección de posición angular, velocidad de rotación o conteo de pulsos. Genera tres señales de salida: A, B y Z, siendo la Z una señal de referencia por cada revolución completa.



Figura 23. Encoder OMRON E6B2-CWZ6E

Tabla 11. Características técnicas del encoder OMRON E6B2-CWZ6E

Parámetro	Especificación
Tipo	Encoder incremental rotativo
Resoluciones disponibles	100, 200, 360, 500, 600, 1000, 1024, 2000, 2500 PPR
Voltaje de alimentación	5 a 24 VDC
Corriente nominal	≤ 100 mA
Diámetro del eje	6 mm
Diámetro del cuerpo	40 mm
Tipo de salida	NPN open collector
Señales de salida	Fase A, Fase B, Fase Z
Frecuencia máxima	100 kHz
Temperatura de operación	-10 °C a +70 °C
Grado de protección	IP64
Rotación	Sentido horario y antihorario

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para el análisis del proyecto de control Flux-Vector aplicado a un motor de corriente alterna, se estableció una secuencia de procedimientos que inició con la identificación de los equipos utilizados, tales como el PLC, la pantalla HMI, las fuentes de alimentación, el motor trifásico y los softwares correspondientes. Todo el desarrollo se llevó a cabo en los laboratorios del área de PLC, los cuales están destinados a brindar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica experiencias prácticas que complementan los contenidos teóricos impartidos en las aulas, con el propósito de fomentar una formación integral basada en el enfoque teórico-práctico.

5.1. Ubicación de la maqueta en los laboratorios de la universidad

En la provincia de Cotopaxi, en el cantón Latacunga, los laboratorios de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi se distinguen por contar con equipamiento que responde a las exigencias del entorno laboral actual. Estos espacios permiten a los estudiantes desarrollar prácticas aplicadas mediante el uso de equipos de marcas reconocidas, alineados con las normativas vigentes del sector eléctrico.



Figura 24. Módulo de control de motores en AC

5.2. Diagrama de conexión

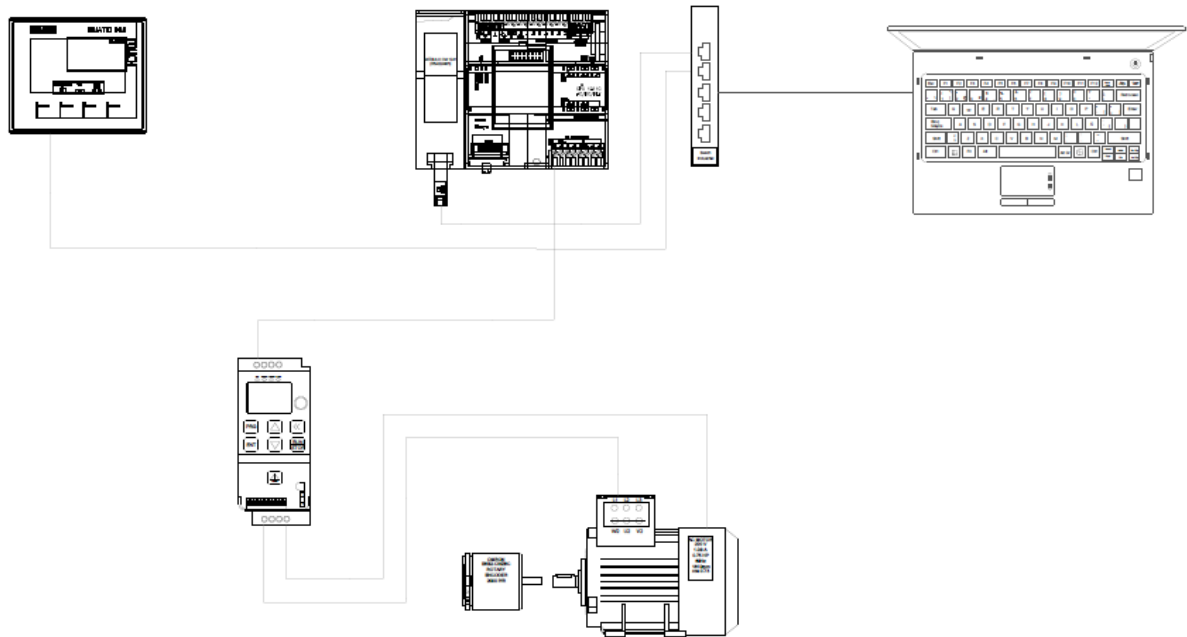


Figura 25. Diagrama de conexión eléctrica

5.3. Casos de estudio del sistema sin carga

5.3.1. Control flux vector del sistema de 0 a 1610 rpm

El control vectorial de flujo (Flux Vector Control) se distingue por su capacidad de mantener un comportamiento estable en motores de corriente alterna que permitiendo el manejo del par y la velocidad en distintas condiciones de carga. Para lograr este tipo de control, se utiliza un variador de frecuencia que junto con la retroalimentación en tiempo real proporcionada por el encoder, permite ajustar continuamente los parámetros eléctricos del sistema. La velocidad de referencia o set point es ingresada mediante la pantalla HMI, lo que facilita la interacción con el usuario. En el presente estudio se analiza el comportamiento dinámico del motor con base en los datos de placa, siendo la velocidad nominal de 1610 rpm, mediante el monitoreo de variables como la frecuencia, el torque, la corriente y el voltaje frente a diferentes condiciones de operación.

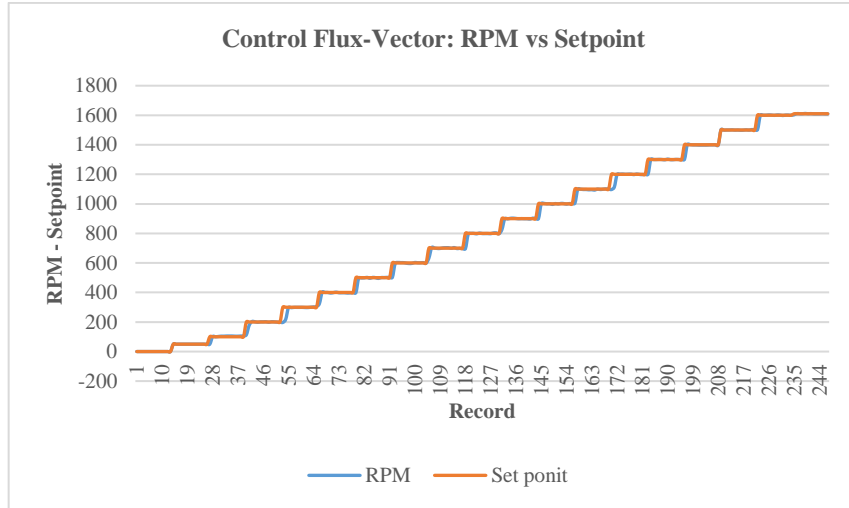


Figura 26. Control Setpoint y rpm

La figura muestra el comportamiento dinámico de la máquina rotativa, la curva naranja indica el setpoint de velocidad introducido mediante la pantalla HMI, mientras que la línea azul representa las RPM reales medidas en el motor, La coincidencia de ambas curvas confirma la capacidad del sistema de control vectorial de flujo para seguir la consigna de velocidad con una desviación mínima que se logra por medio de la retroalimentación, el cual permite una respuesta ante variaciones del setpoint, el control se mantiene estable hasta alcanzar la velocidad nominal de 1610 RPM, tal como indican los datos de placa.

En las siguientes figuras se analiza el comportamiento del motor ante distintos valores de setpoint que evalúa la capacidad del sistema de control para seguir la consigna de velocidad dentro de su rango de operación y de experimentación.

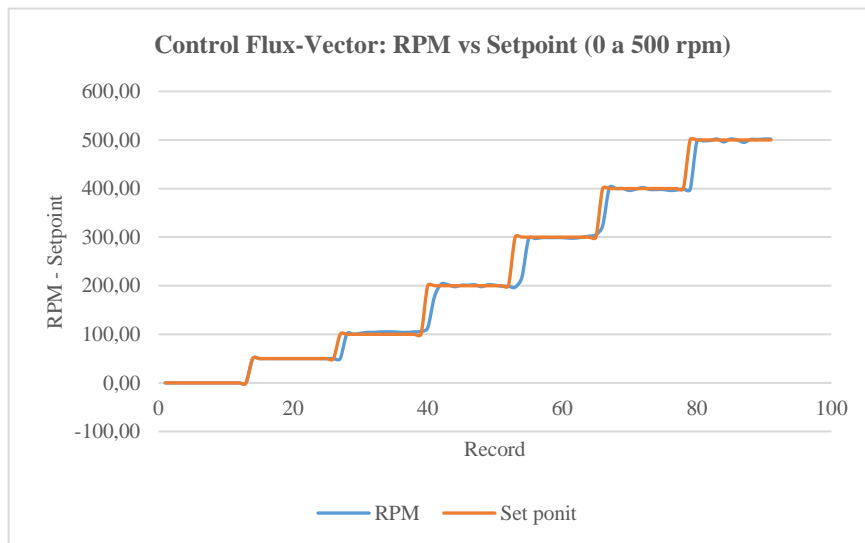


Figura 27. Setpoint vs rpm (0 a 500 rpm)

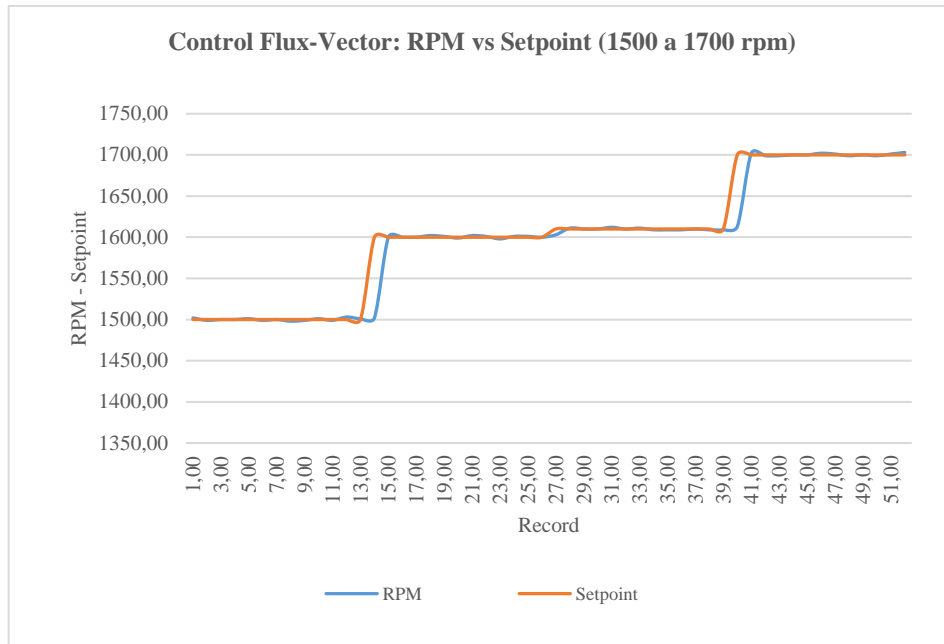


Figura 28. Setpoint vs rpm (1500 a 1700 rpm)

Las figuras presentadas detallan la respuesta del sistema de control Flux-Vector aplicado a la máquina rotativa, la línea naranja corresponde al Setpoint que se configura desde la pantalla HMI mientras que la señal azul representa las RPM reales medidas su aproximidad entre ambas curvas evidencia un seguimiento de la velocidad, con desviaciones mínimas durante el estado estacionario. Esta respuesta es resultado del lazo de realimentación, que proporciona corrección continua ante variaciones, logrando un tiempo de establecimiento cercano a 1 segundo frente a incrementos escalonados del Setpoint, sin manifestar oscilaciones. El análisis del error absoluto entre el valor de consigna y las RPM reales confirma un margen de diferencia que varía entre el 1 % y el 3 %, manteniéndose estable en todos los regímenes evaluados el comportamiento sostenido se mantiene hasta alcanzar la velocidad nominal de 1610 RPM, según datos de placa, ratificando la operatividad dentro su rango del funcionamiento establecido.

Las figuras correspondientes al rango de 1800 a 2400 RPM evidencian la respuesta del sistema de control Flux-Vector más allá de la velocidad nominal del motor. En los valores experimentales superiores a los 1610 RPM, se observa que la desviación entre el Setpoint y las RPM reales permanece contenida entre un 1 % y un 2 %, lo que refleja una adecuada capacidad de seguimiento incluso fuera del régimen nominal. Sin embargo, a partir de un Setpoint de 2400 RPM, la curva de velocidad real deja de seguir la referencia impuesta. Este fenómeno se debe a una restricción establecida en el programa del PLC, implementada con el propósito de proteger el motor frente a condiciones de sobrevelocidad. Dicha limitación actúa como una medida preventiva para evitar operar fuera de los límites especificados por la placa

característica del equipo, garantizando así la integridad del sistema ante frecuencias o velocidades excesivas.

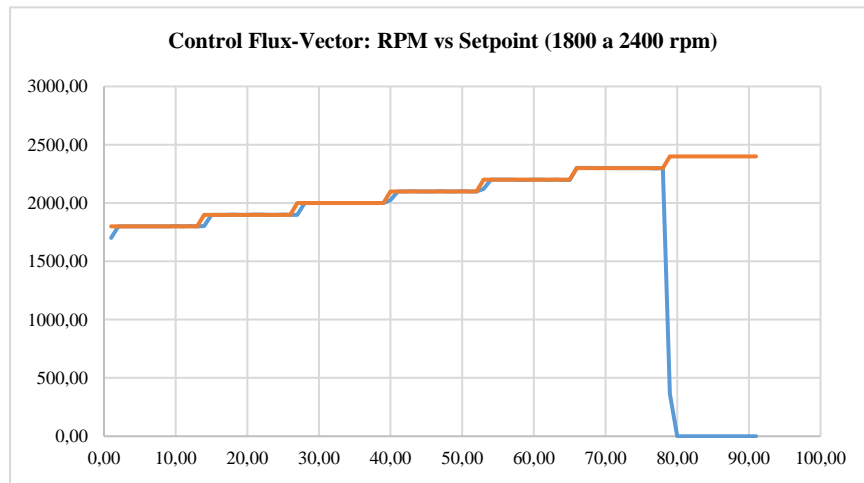


Figura 29. Setpoint vs rpm (1800 a 2400 rpm)

5.3.2. Análisis de la frecuencia

La Figura presenta la relación entre las Revoluciones Por Minuto del motor y la frecuencia de alimentación suministrada por el sistema de control Flux-Vector se observa una relación directamente proporcional a lo largo de todo el rango operativo a medida que la frecuencia se incrementa desde sus valores iniciales, las RPM del motor aumentan de similar forma que valida el principio de control de velocidad en máquinas de corriente alterna. Esta proporcionalidad es fundamental para asegurar el control del flujo magnético y del par motor a distintas velocidades de operación. En el extremo superior de la experimentación la frecuencia alcanza aproximadamente los 78 Hz, mientras que las RPM se elevan hasta alrededor de 2300 RPM. Finalmente, se registra una disminución simultánea tanto de la frecuencia como de las RPM hasta valores mínimos, comportamiento correspondiente a la activación del mecanismo de salvaguarda del PLC, programado para interrumpir el funcionamiento de la máquina rotativa al detectarse condiciones cercanas o superiores a los límites de operación establecidos por los datos de placa.

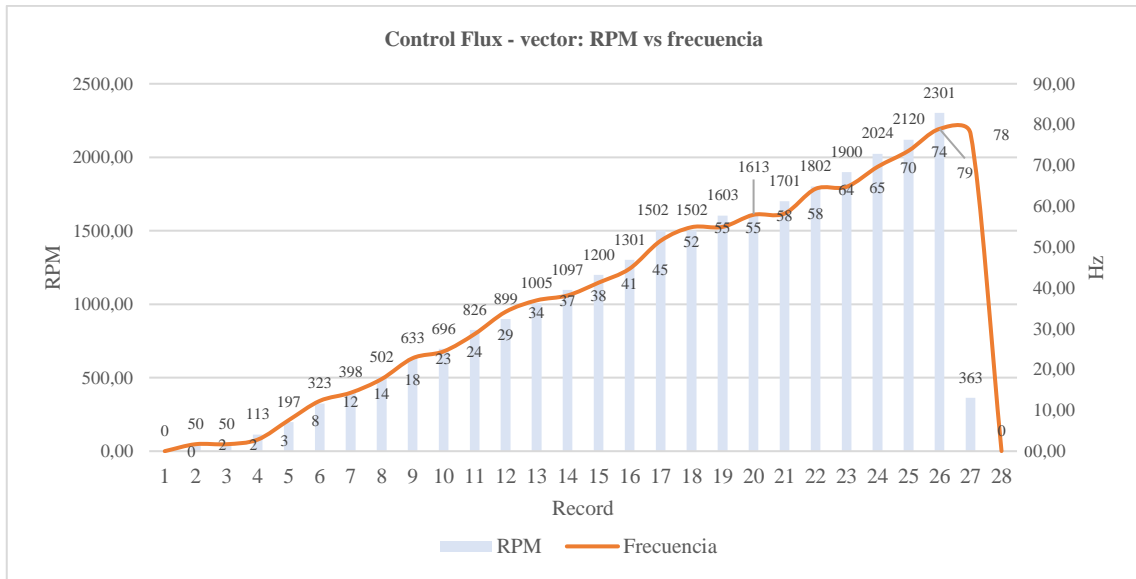


Figura 30. RPM y frecuencia

5.3.3. Análisis de la corriente

La Figura detalla el comportamiento de la corriente demandada por el motor de corriente alterna en función del Setpoint de velocidad bajo el sistema de control Flux-Vector, con el motor en reposo el Setpoint de 0 RPM la corriente se establece en un valor nominal de 0.68 A correspondiente a la corriente de excitación y las pérdidas en vacío, al comenzar la aceleración de la máquina rotativa, se observa un descenso transitorio en la corriente desde su valor de reposo hasta un régimen de operación más bajo, estabilizándose aproximadamente en 0.44 A a 0.45 A donde a medida que el Setpoint se incrementa progresivamente en el rango de operación funcional del motor, esta corriente se mantiene relativamente constante, lo cual es coherente con el principio del control vectorial de flujo en condiciones de baja o nula carga mecánica, donde la componente de corriente de magnetización permanece estable para mantener el flujo constante, al extremo superior del rango de velocidad de 2400 RPM en el Setpoint, se registra un incremento abrupto de la corriente de vuelta a su valor inicial. Este comportamiento es resultado de la acción de salvaguarda programada en el PLC, la cual interrumpe el suministro de potencia al motor al detectarse una condición que excede los límites operativos de la máquina.

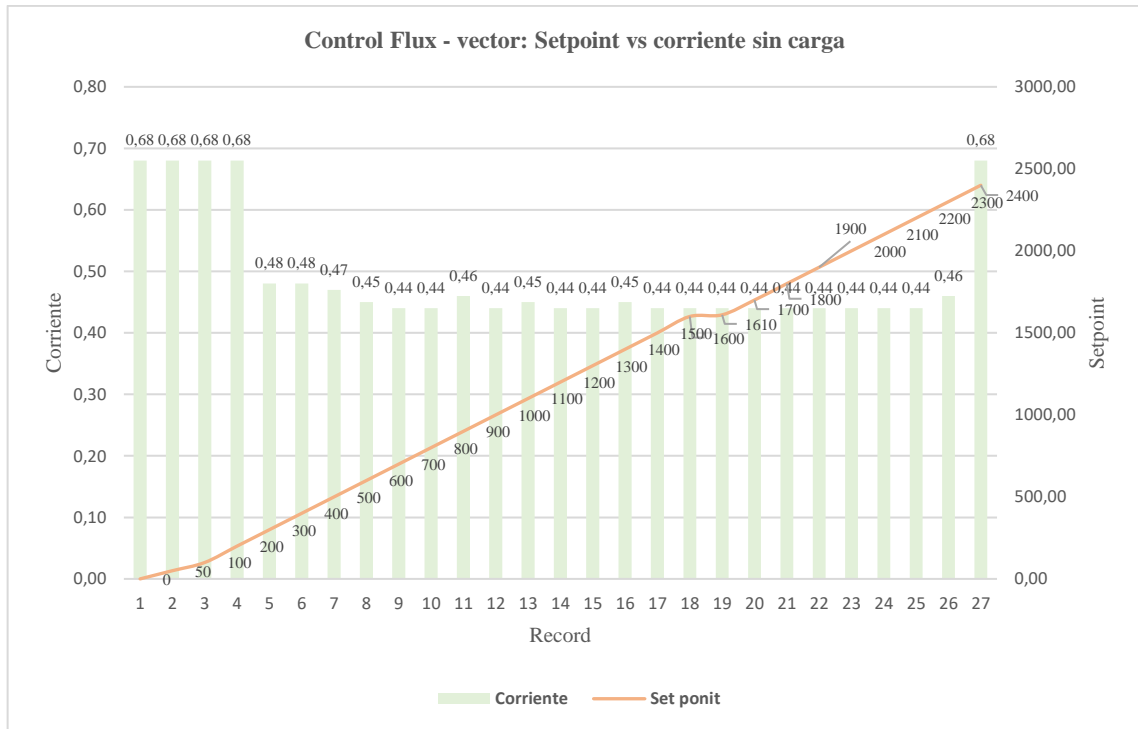


Figura 31. Setpoint vs corriente sin carga

5.3.4. Análisis de voltaje

La Figura muestra la relación directa entre el Setpoint de velocidad y el voltaje aplicado al motor dentro del esquema de control Flux-Vector. A medida que el valor del Setpoint se incrementa, el sistema regula progresivamente la tensión de alimentación, evidenciando una respuesta proporcional entre ambas variables, la respuesta indica que el controlador adapta el voltaje suministrado conforme a la referencia de velocidad ingresada por el operador en la pantalla HMI, se evidencia un incremento de la tensión desde un valor inicial de 21 V correspondiente a velocidades bajas hasta alcanzar un máximo de 186 V cuando el Setpoint se sitúa en 2400 rpm, esta relación es esencial para el comportamiento electromagnético adecuado del motor durante todo el rango de operación, se registra una caída en el Setpoint como en el voltaje, lo que coincide con la acción de protección configurada en el PLC, diseñada para evitar que la máquina rotativa opere fuera de sus límites establecidos en la programación.

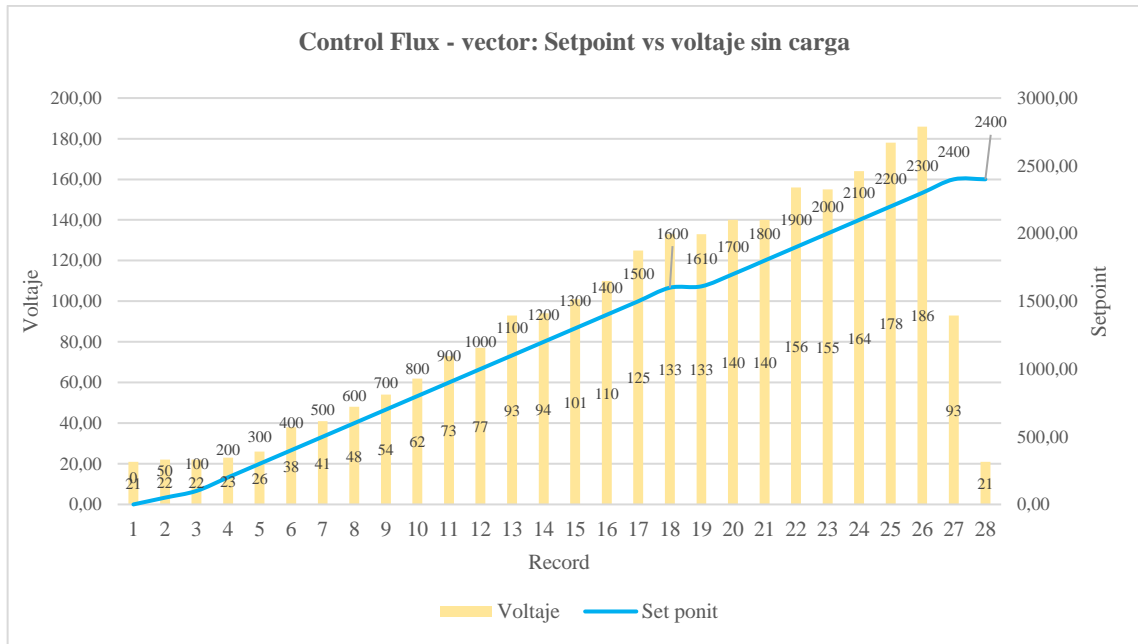


Figura 32. Setpoint vs voltaje sin carga

5.3.5. Análisis del torque

La Figura representa la relación entre la corriente eléctrica y el torque generado en el motor operando bajo el control Flux-Vector en estado de reposo, con un torque nulo, la corriente inicial se mantiene en aproximadamente 0.68 A, correspondiente a la corriente de excitación y pérdidas en vacío con el sistema entra en operación y el torque comienza a desarrollarse los valores bajos que oscilan entre 0.07 N·m y un máximo de 0.17 N·m se observa un descenso transitorio en la corriente, que se estabiliza en un intervalo de 0.44 A a 0.45 A, la estabilización es característica del control vectorial en condiciones de baja carga mecánica, tanto el torque como la corriente caen a cero, lo que coincide con la activación del esquema de protección programado en el PLC, el cual detiene el suministro de energía al motor para preservar la integridad de la máquina.

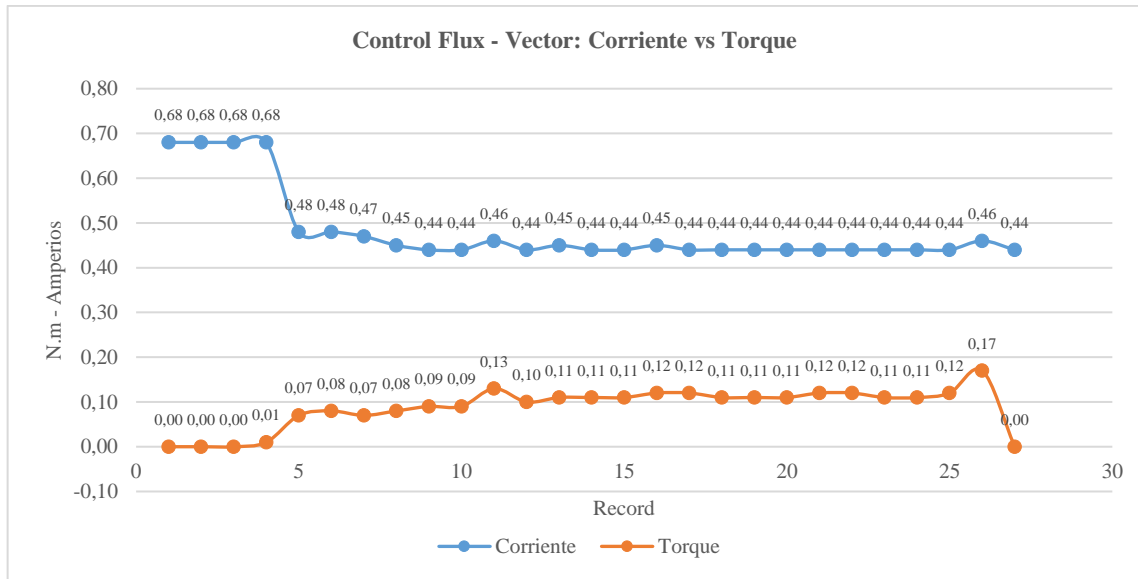


Figura 33. Corriente vs Torque sin carga

5.4. Casos de estudio del sistema con carga

5.4.1. Control flux vector del sistema de 0 a 2300 rpm

La Figura presenta el comportamiento del sistema de control Flux-Vector ante la aplicación de una carga mecánica variable, introducida mediante un mecanismo de frenado manual acoplado a un disco. A diferencia de las condiciones de operación sin carga, el desempeño dinámico del motor incluye ahora la respuesta ante perturbaciones de torque, el motor continúa respondiendo al Setpoint de velocidad, la curva azul correspondiente a las RPM reales evidencia oscilaciones con respecto a las pruebas en vacío las fluctuaciones son consecuencia directa de la carga introducida en distintos niveles del Setpoint aunque el sistema de control logra compensar dichas variaciones, restableciendo la velocidad de referencia o manteniéndose dentro de un margen aceptable, la presencia de estas oscilaciones validan el desempeño del algoritmo de control Flux-Vector frente a variaciones de carga, demostrando su capacidad para conservar el control de velocidad en condiciones operativas variante en la carga a la máquina rotativa.

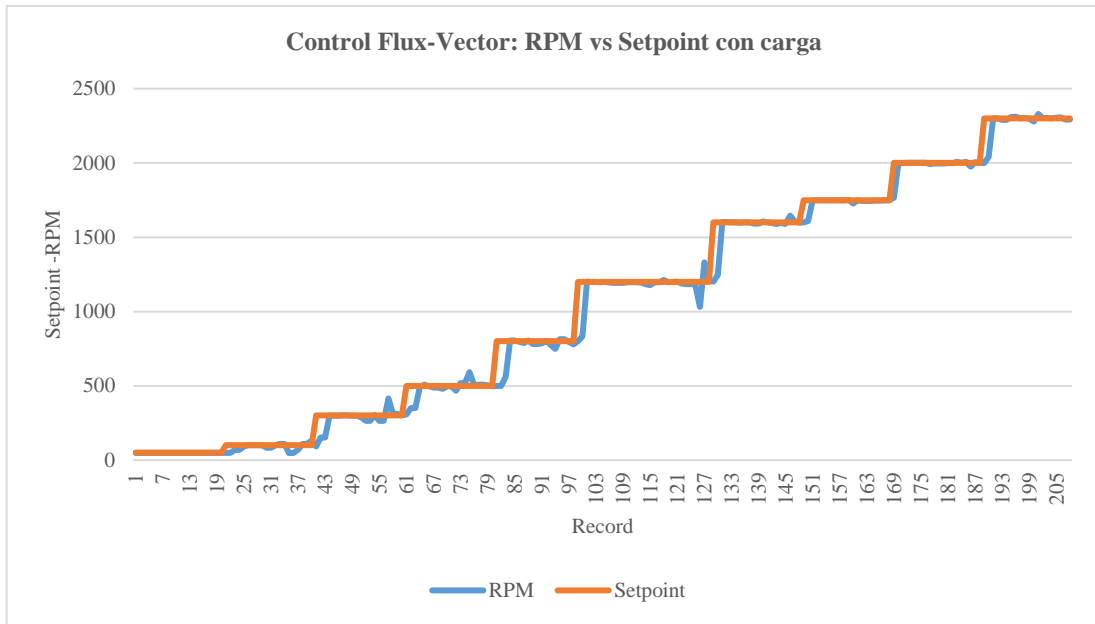


Figura 34. Control Setpoint y rpm con carga

La Figura permite analizar el comportamiento del sistema de control Flux-Vector ante la presencia de una carga mecánica variable el estudio se concentra en valores de referencia como 100, 300, 500 y 800 RPM, con el objetivo de identificar las perturbaciones introducidas por la carga y su impacto sobre la respuesta dinámica del motor al aumentar el Setpoint desde la interfaz HMI se evidencia una separación inicial entre la velocidad de referencia y la velocidad real.

Las oscilaciones detectadas en la curva de RPM de color azul representan la influencia directa de la carga aplicada y refleja el comportamiento transitorio del sistema en su intento por compensar el torque adicional. A pesar de estas perturbaciones, el control Flux-Vector logra estabilizar la velocidad en torno al Setpoint indicado, manteniendo una operación dentro de un margen

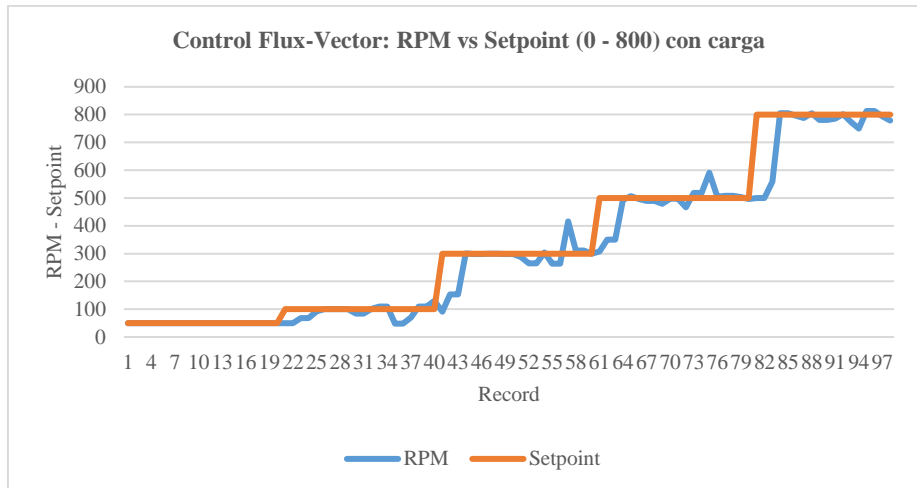


Figura 35. Setpoint vs rpm con carga (0 a 800 rpm)

La Figura muestra el comportamiento del control Flux-Vector bajo carga, en un rango de Setpoints entre 1200 y 2300 rpm se observa la presencia de carga mecánica el motor sigue de forma la referencia de velocidad impuesta desde el HMI. La respuesta del sistema evidencia la respuesta entre los valores programados y las RPM reales.

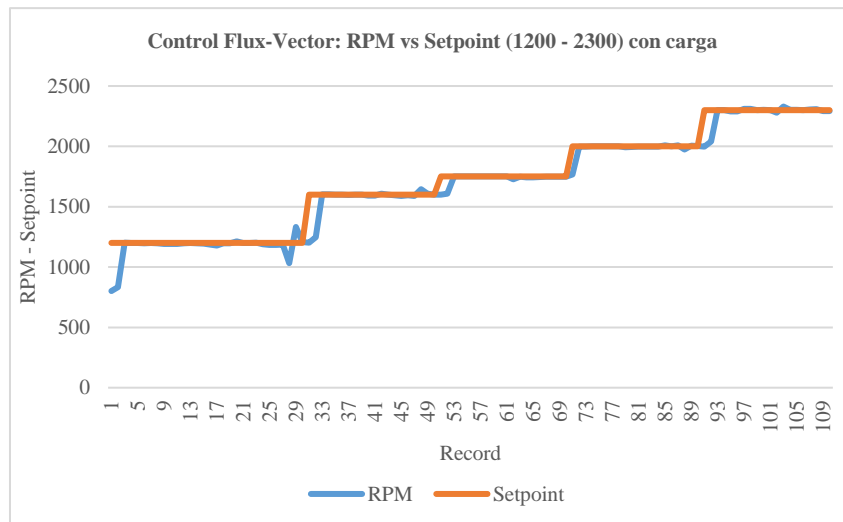


Figura 36. Setpoint vs rpm con carga (1200 a 2300 rpm)

5.4.2. Análisis de corriente

La Figura muestra la relación entre las RPM del motor y la corriente consumida bajo condiciones de carga variable en estado de reposo la corriente inicial registrada es de 0.68 A, correspondiente al magnetismo residual y pérdidas en vacío con el incremento del Setpoint de velocidad, la corriente presenta un descenso transitorio, estabilizándose entre 0.43 A y 0.56 A

durante el funcionamiento y se identifican variaciones en la corriente asociadas a la demanda de torque provocada por la carga mecánica aplicada.

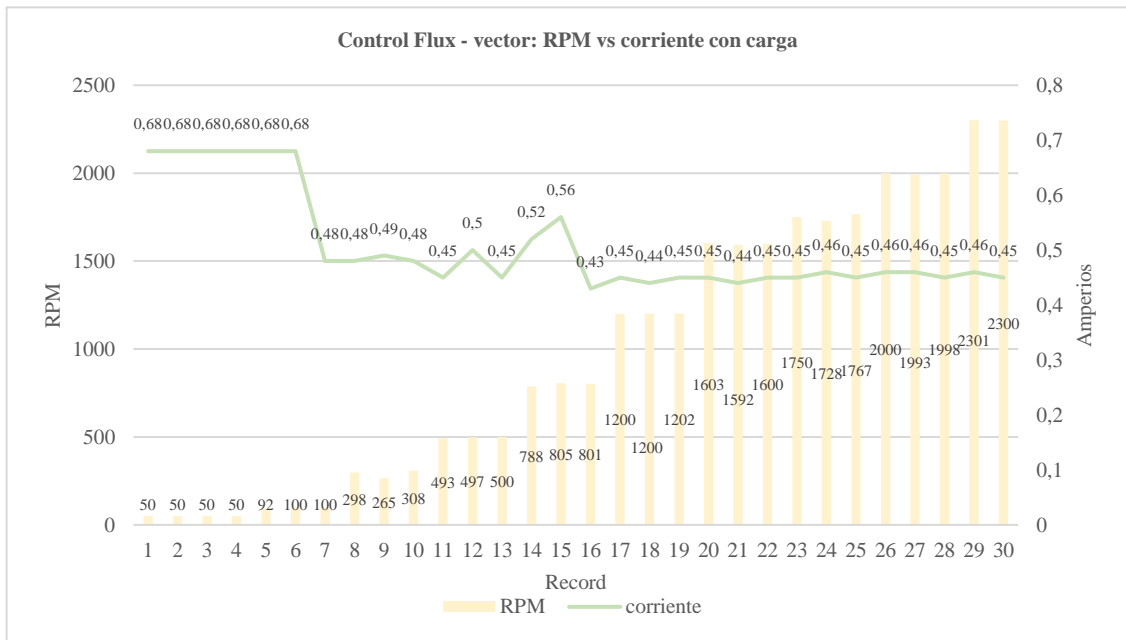


Figura 37. RPM vs corriente con carga

5.4.3. Análisis del voltaje

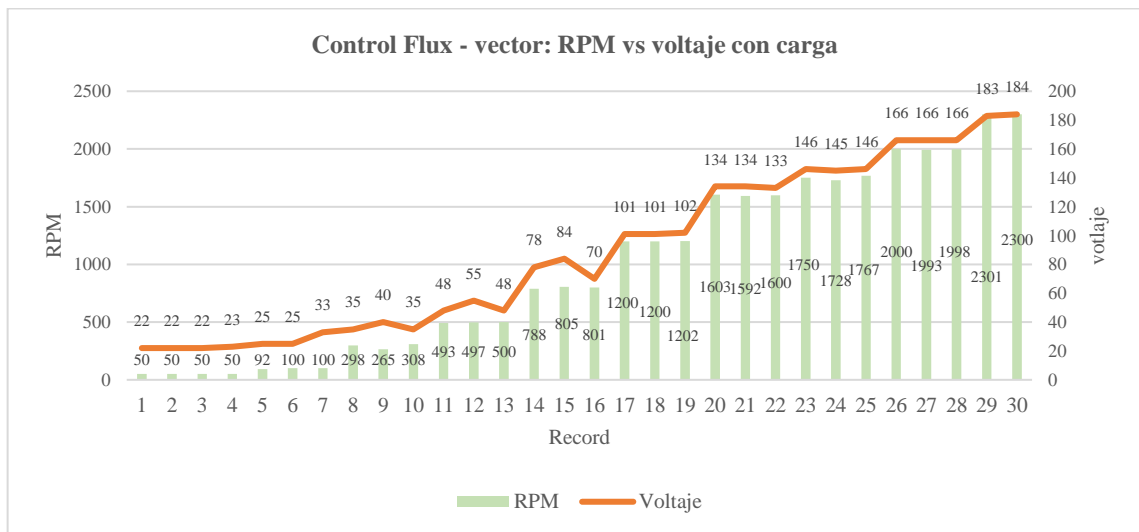


Figura 38. RPM vs voltaje con carga

La figura representa la relación entre las RPM del motor y el voltaje aplicado en presencia de carga mecánica, el voltaje incrementa conjuntamente con las RPM, que mantiene la relación directa para alcanzar la velocidad deseada bajo condiciones de perturbación, este comportamiento valida la modulación del voltaje por parte del control Flux-Vector, lo que permite entregar el torque necesario

5.4.4. Análisis de la frecuencia

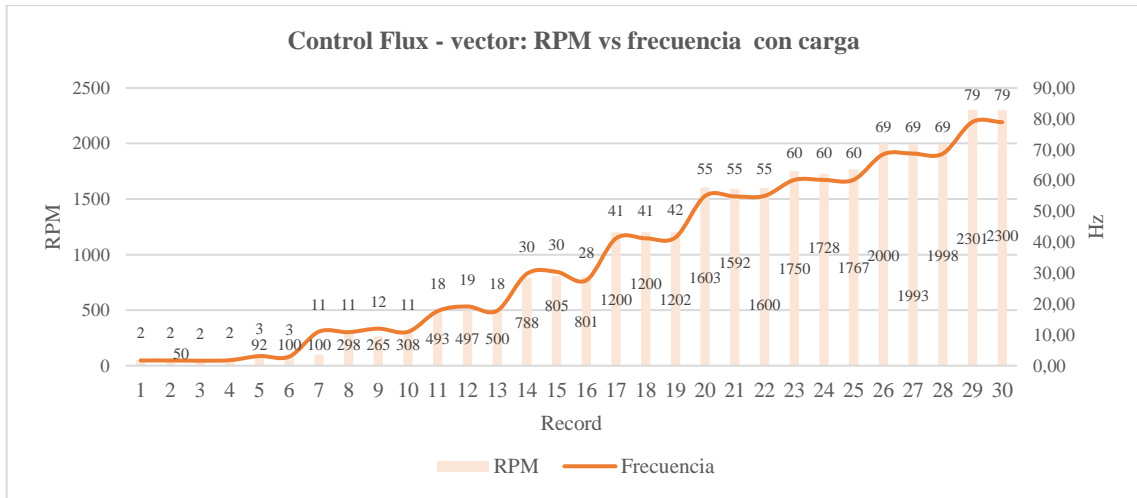


Figura 39. RPM vs frecuencia con carga

La figura muestra la relación directa entre las RPM del motor y la frecuencia de alimentación bajo carga a medida que la frecuencia aumenta, las RPM se eleva que valida el principio de control de velocidad del sistema Flux-Vector, este comportamiento refleja la capacidad del sistema para ajustar la frecuencia según la referencia establecida.

5.4.5. Análisis de torque

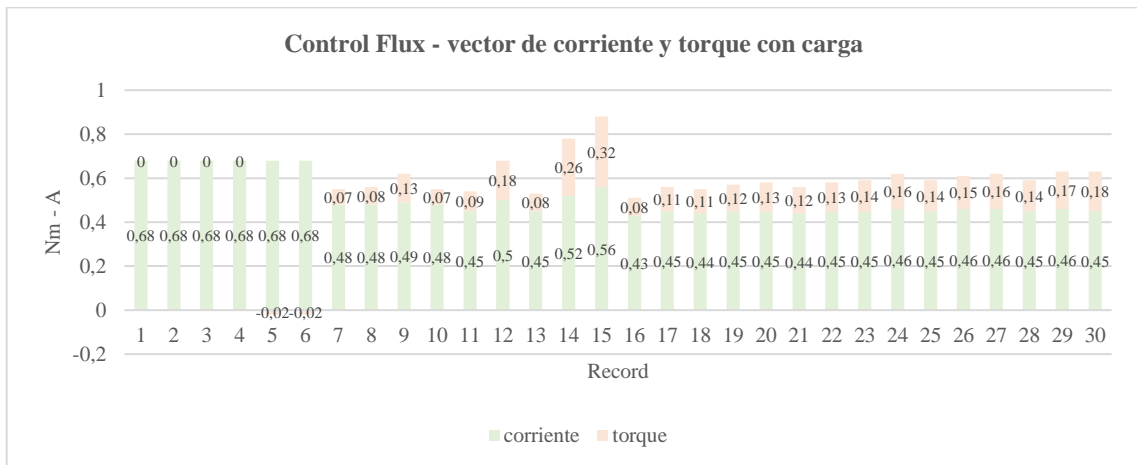


Figura 40. Corriente y torque con carga

La figura muestra la interacción entre la corriente consumida por el motor y el torque desarrollado bajo condiciones de carga, dentro de un esquema de control Flux-Vector, los primeros registros con el motor en reposo, la corriente es constante en 0.68 A y el torque es nulo a partir del incremento del Setpoint, se observa una reducción progresiva de la corriente y la aparición de torque, el sistema responde aumenta la corriente total en momentos específicos

para generar el par necesario ante perturbaciones esta dinámica evidencia cómo el control Flux-Vector ajusta la corriente para mantener el torque requerido.

5.5. Costos del proyecto Flux Vector

Tabla 12. Presupuesto del proyecto de implementación

RECURSOS	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Recursos de materiales (suministros y materiales)				
Módulo de potencia estándar PM240-2 (6SL3210-1PB13-8UL0)	1	U	\$299.20	\$299.20
Unidad de control CU240E-2, MODBUS TRU/USS (6SL3244-0BB12-1BA1)	1	U	\$298.52	\$298.52
Panel operador IOP-2 (6SL3255-0AA00-AJA2)	1	U	\$193.80	\$193.80
SIMATIC S7-1200 (6ES7 241-1 CH31-OXB0)	1	U	\$300.00	\$300.00
Breaker de 2 fases	1	U	\$5.50	\$5.50
Breaker de 3 fases	1	U	\$6.50	\$6.50
Rieles	1	M	\$5.00	\$5.00
Piezas para rieles	3	U	\$2.50	\$7.50
Conector de comunicaciones	2	U	\$55.00	\$110.00
Switch Ethernet industrial	1	U	\$90.00	\$90.00
Breaker industrial	1	U	\$13.00	\$13.00
Cable flexible #18	15	M	\$0.35	\$5.25
Cinta aislante taipe	1	U	\$0.60	\$0.60
Mesa de madera	1	U	\$40.00	\$40.00
Alucobon	1	U	\$170.00	\$170.00
Servicio administrativo/envío	4	U	\$5.00	\$20.00
Llantas	4	U	\$0.60	\$2.40
Puntos de suelda	4	U	\$1.00	\$4.00
Espray blanco	2	U	\$2.50	\$5.00
Waípe	10	U	\$0.10	\$1.00
Letras	20	U	\$0.25	\$5.00
Ascensor	1	U	\$15.00	\$15.00
Pesas	1	U	\$20.00	\$20.00
Recursos tecnológicos				
Uso de internet	100	H	\$0.70	\$70.00
Scanner	12	U	\$0.50	\$6.00
Impresiones revisiones	1	U	\$12.00	\$12.00
Impresiones normales	200	U	\$0.10	\$20.00
Gastos varios				
Alimentación	60	u	\$2.50	\$150.00
Movilización	30	u	\$8.00	\$240.00
Subtotal				\$2125.75
Imprevistos (10%)				\$150.00
TOTAL				\$2270.27

5.6. Presupuesto general

Tabla 13. Presupuesto general

CONCEPTO	MONTO
Recursos de materiales	\$1622.27
Recursos tecnológicos	\$108.00
Gastos varios	\$390.00
Imprevistos	\$150.00
TOTAL GENERAL	\$2270.27

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El control vectorial por orientación de campo se identifica por su capacidad para desacoplar el flujo y el par en motores de inducción, la incorporación del encoder permitió una realimentación de la velocidad y posición para el funcionamiento del control Flux-Vector que permite la regulación dinámica del sistema.
- La configuración del variador de frecuencia con tecnología Flux-Vector, en conjunto con el controlador PLC Siemens S7-1200, permite el intercambio de señales de control y monitoreo en tiempo real. Esta integración asegura una operación sincronizada entre el variador y la lógica del autómatas, posibilitando la adquisición continua de parámetros eléctricos como corriente, torque y velocidad (RPM), lo que garantiza el funcionamiento estable de la máquina rotativa bajo distintas condiciones de carga.
- Se desarrolló en TIA Portal la lógica de control encargada de regular la velocidad del motor mediante el variador de frecuencia, permitiendo al operador establecer el Setpoint desde la pantalla táctil HMI, así como visualizar en tiempo real las RPM del motor. Esta configuración posibilita la ejecución de pruebas bajo diferentes condiciones de carga, incluyendo restricciones programadas orientadas a la protección de los equipos. La interfaz HMI establece una interacción continua entre el operador y el sistema, permitiendo la supervisión y el seguimiento del comportamiento dinámico del motor durante todo el proceso de operación.
- En las pruebas experimentales realizadas se evalúa el comportamiento del motor AC tanto en vacío como con carga mecánica sin carga, el sistema mantuvo un consumo de corriente promedio de 0.68 A en reposo, disminuyendo progresivamente hasta estabilizarse entre 0.43 A y 0.45 A durante el régimen, con carga se evidencia fluctuaciones en la corriente y el torque, asociadas al esfuerzo de compensación frente al cambio de carga y la respuesta proporcional entre RPM y frecuencia que valida la capacidad del control Flux-Vector para ajustar los parámetros eléctricos y mantener la referencia de velocidad.

6.2. Recomendaciones

- Para la implementación del sistema de control Flux-Vector, la selección de los equipos como el PLC, HMI, variador, encoder, motor, variador entre otros debe basarse en la revisión de sus hojas de datos o datasheets es fundamental para la coordinación de las características operativas de los equipos que asegure la compatibilidad y funcionalidad entre los elementos del sistema.
- Ampliar los ensayos experimentales incorporando cargas de mayor inercia y perfiles de velocidad variables, con el propósito de evaluar la capacidad de respuesta del sistema de control Flux-Vector frente a condiciones dinámicas más exigentes, y establecer sus límites operativos en aplicaciones industriales con demandas de mayor precisión en la regulación de velocidad.
- Integrar al sistema de monitoreo del variador nuevas variables eléctricas y mecánicas como el torque estimado, el deslizamiento y el factor de carga, a través de la comunicación con el PLC Siemens S7-1200. Esto permitirá un control más detallado sobre el comportamiento del motor y facilita el diagnóstico de fallos en condiciones reales de operación.

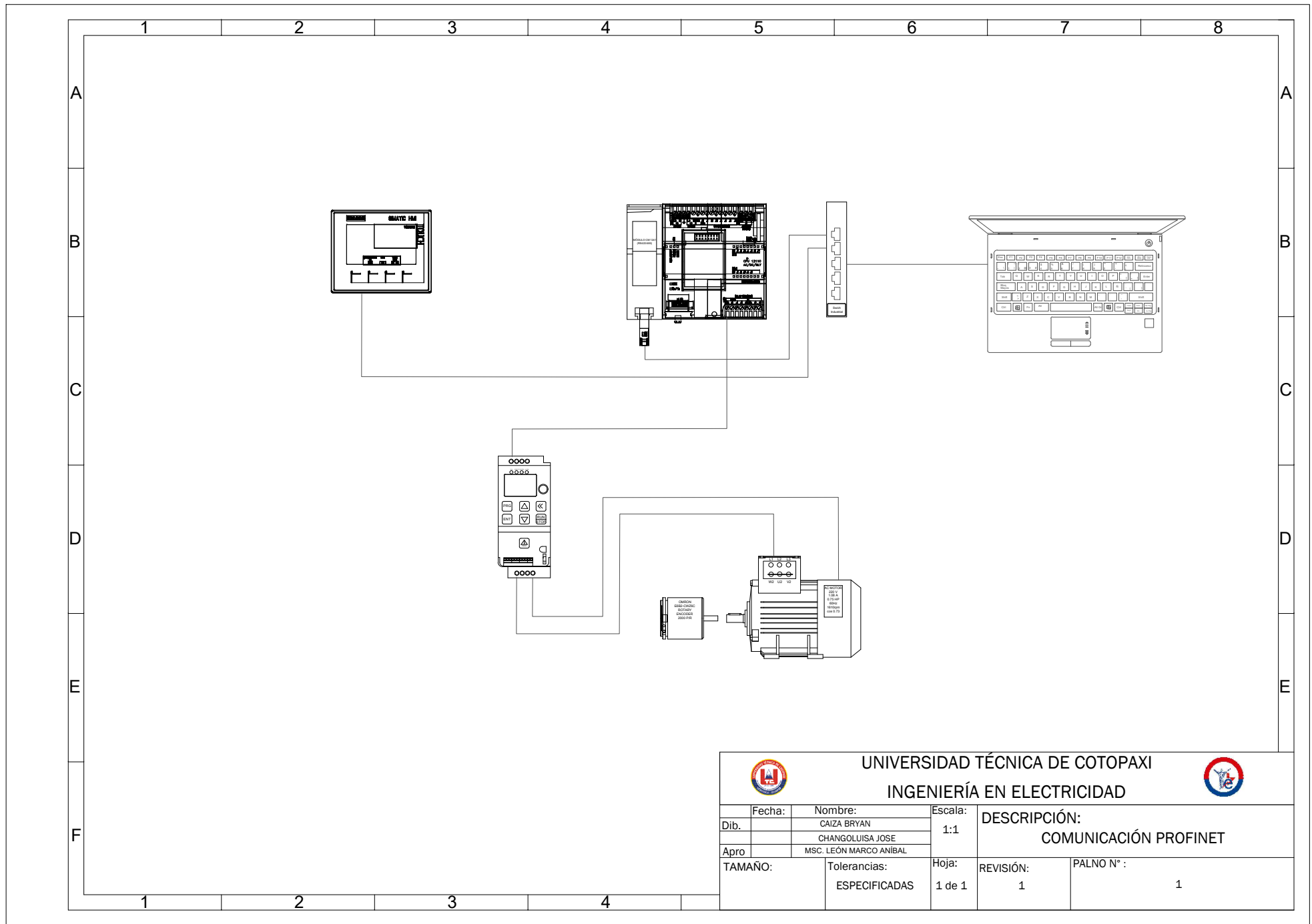
7. REFERENCIALES

- [1] K. N. Sujatha and K. Vaisakh, “Implementation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System in Speed Control of Induction Motor Drives,” *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, vol. 02, no. 02, pp. 110–118, 2010, doi: 10.4236/JILSA.2010.22014.
- [2] X. Liang, “Temperature estimation and vibration monitoring for induction motors and the potential application in electrical submersible motors,” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 148–162, Jun. 2019, doi: 10.1109/CJECE.2018.2875111.
- [3] V. Bilek, J. Barta, M. Toman, P. Losak, and G. Bramerdorfer, “A comprehensive overview of high-speed solid-rotor induction machines: Applications, classification, and multi-physics modeling,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 166, p. 110520, May 2025, doi: 10.1016/J.IJEPES.2025.110520.
- [4] IEC, “Fuel cell technologies. Part 7-1, Single cell performance tests for polymer electrolyte fuel cells (PEFC),” p. 74, 2017, Accessed: Jul. 07, 2025. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/d1833a5a-39af-4ce0-b488-dfcd51a06126/en-60034-12-2017>
- [5] H. ; Wang, Y. ; Yang, D. ; Chen, X. ; Ge, S. ; Li, and Y. Zuo, “Speed-Sensorless Control of Induction Motors With an Open-Loop Synchronization Method,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. PP, no. 2, pp. 1963–1977, 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3050805.
- [6] A. Darjazini, A. Vahedi, A. Nobahari, and S. Gharehseyed, “Analysis of electromagnetic torque for induction motors with a novel non-skewed rotor structure,” *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 238–257, Jan. 2022, doi: 10.1108/COMPEL-03-2021-0106.
- [7] I. G. Hansen, “Four quadrant control of induction motors,” *National Aeronautics and Space Administration, Technology 2000, Volume 1*, 1991.
- [8] M. Chadli and M. Azab, “A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction Motor Drives,” *Vehicles 2025, Vol. 7, Page 15*, vol. 7, no. 1, p. 15, Feb. 2025, doi: 10.3390/VEHICLES7010015.

- [9] J. Singh, S. Prakash Singh, K. Shanker Verma, A. Iqbal, and B. Kumar, “Recent control techniques and management of AC microgrids: A critical review on issues, strategies, and future trends,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 11, p. e13035, Nov. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13035;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [10] A. Babu and M. Vijayakumar, “Analysis Of Four Quadrant Operation Of BLDC Motor With The Implementation Of FPGA,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology An ISO*, vol. 3297, no. 1, 2007, Accessed: Jul. 05, 2025. [Online]. Available: www.ijirset.com
- [11] D. Karthik and T. R. Chelliah, “Analysis of scalar and vector control based efficiency-optimized induction motors subjected to inverter and sensor faults,” *Proceedings of 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, ICACCCT 2016*, pp. 462–466, Jan. 2017, doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831682.
- [12] L. Yang, S. Wang, and J. Feng, “Electromagnetic interference modeling and suppression techniques in variable-frequency drive systems,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 329–353, Sep. 2018, doi: 10.1007/S11465-018-0466-1.
- [13] G. Rizzoli, M. Mengoni, A. Tani, G. Serra, L. Zarri, and D. Casadei, “Wireless Power Transfer Using a Five-Phase Wound-Rotor Induction Machine for Speed-Controlled Rotary Platforms,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 67, no. 8, pp. 6237–6247, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2935988.
- [14] P. Vas, “Self-commissioning,” *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, pp. 705–721, Nov. 1998, doi: 10.1093/OSO/9780198564652.003.0008.
- [15] V. Kumar, R. K. Behera, D. Joshi, and R. Bansal, “Power Electronics, Drives, and Advanced Applications,” *Power Electronics, Drives, and Advanced Applications*, Mar. 2020, doi: 10.1201/9781315161662.
- [16] J. Wei, “Convergence of IoT and PLC in Industrial Automation: A Systematic Review of Emerging Trends, Technical Challenges, and Prospects,” *Applied and Computational Engineering*, vol. 150, no. 1, pp. 89–94, Apr. 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.22249.

- [17] H. Cui, J. Hong, and R. Loudon, “An Overview of the Security of Programmable Logic Controllers in Industrial Control Systems,” 2024, doi: 10.3390/encyclopedia4020056.
- [18] D. H. Mo *et al.*, “Design of Digital-Twin Human-Machine Interface Sensor with Intelligent Finger Gesture Recognition,” *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 3509, vol. 23, no. 7, p. 3509, Mar. 2023, doi: 10.3390/S23073509.
- [19] M. Costin and C. Lazar, “Induction Motor Improved Vector Control Using Predictive and Model-Free Algorithms Together with Homotopy-Based Feedback Linearization,” *Energies* 2024, Vol. 17, Page 875, vol. 17, no. 4, p. 875, Feb. 2024, doi: 10.3390/EN17040875.
- [20] I. Behnke and H. Austad, “Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review,” *IEEE Internet Things J*, vol. 11, no. 5, pp. 7399–7410, Nov. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3332507.
- [21] G. Sridevi, A. Saligram, and V. Nattarasu, “Effective Protocols for Industrial Communication,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 545, pp. 1093–1105, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-5802-9_94.
- [22] C.-H. Loh and C.-M. Chang, “Application of Centralized and Decentralized Control to Building Structure: Analytical Study,” *J Eng Mech*, vol. 134, no. 11, pp. 970–982, Nov. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:11(970).
- [23] Q. Zhe, H. Sun, Y. Liu, Z. Rao, and G. Liang, “Application Status and Challenge of PROFIBUS Technology in Industrial Automation Field,” *International Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 16–23, Apr. 2024, doi: 10.62051/IJMEE.V2N2.03.
- [24] A. L. Dias, G. S. Sestito, and D. Brandao, “Performance Analysis of Profibus DP and Profinet in a Motion Control Application,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 86–93, Feb. 2017, doi: 10.1007/S40313-016-0278-7.
- [25] K. S. Rathikrindi, S. Paramasivam, and L. Sandeep, “Energy saving opportunities through Variable Frequency Drive for Commercial Air Conditioners,” *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2018*, pp. 338–340, Aug. 2018, doi: 10.1109/ICEES.2018.8443219.

- [26] F. Paredes, C. Herrojo, and F. Martín, “Position Sensors for Industrial Applications Based on Electromagnetic Encoders,” *Sensors 2021, Vol. 21, Page 2738*, vol. 21, no. 8, p. 2738, Apr. 2021, doi: 10.3390/S21082738.



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI 					
INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD					
Fecha:	Nombre:	Escala:	DESCRIPCIÓN: COMUNICACIÓN PROFINET		
Dib.:	CAIZA BRYAN	1:1			
Apro:	CHANGOLUISA JOSE				
TAMAÑO:		Tolerancias:	Hoja:	REVISIÓN:	PALNO N° :
		ESPECIFICADAS	1 de 1	1	1

8. ANEXOS



CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Anexo A. MANUAL DE USUARIO

Proyecto de implementación:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA
LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE
ALTERNA**

AUTORES:

Changoluisa Choloquina José David

Caiza Guallasamín Bryan David

TUTOR:

Ing. Marco Aníbal León Segovia Ms.C

LATACUNGA, JULIO 2025

TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

I. OBJETIVO

Configurar el sistema de control Flux-Vector en un motor trifásico de CA mediante el PLC S7-1200 y un variador de frecuencia para ajustar parámetros de control y análisis de la respuesta dinámica ante variaciones de carga.

II. INTRODUCCIÓN

El proyecto implementa un sistema de control Flux-Vector para regular la velocidad de un motor trifásico de CA utilizando un PLC Siemens S7-1200 como control principal, conectado a un variador de frecuencia mediante protocolo MODBUS para el manejo del accionamiento del motor, la pantalla HMI se comunica con el PLC para la visualización en tiempo real de parámetros como velocidad, torque, corriente y voltaje mientras que el módulo CM 1241 (RS485) gestiona la comunicación con los dispositivos externos para la conexión entre equipos se emplea un switch industrial con cableado CAT6 para la integración de señales con un encoder que proporciona realimentación de velocidad mediante señales, la configuración y programación se realiza en TIA Portal V 16 por medio del diagrama bloques para la lógica de control, el software facilita la programación, el monitoreo en tiempo real y la ejecución de pruebas con la finalidad de guiar al operador del control donde los resultados obtenidos se tomen como referencia aplicaciones industriales que requieran un manejo de motores de corriente alterna que demuestre la viabilidad del proyecto.

III. RECURSOS

3.1. Equipos

- PLC: Siemens S7-1200 (modelo CPU 1212C)
- Interfaz HMI: Pantalla táctil KTP400 Basic de Siemens
- Módulo de comunicación: CM 1241 (RS485) para protocolo Modbus RTU
- Encoder rotativo OMRON E6B2-CWZ6E

3.2. Materiales

- Conductor: THHN calibre N12 – N16 para alimentación
- Switch: Conmutador Ethernet industrial para red PROFINET
- Cable UTP cat 6

3.3. Software

- Plataforma TIA Portal V17 (programación de PLC y HMI)
- LabVIEW (para monitoreo y adquisición de datos)

3.4. Instrumentos de Medición

- Multímetro digital (para verificación de voltajes y continuidad)

IV. PROCEDIMIENTO

4.1.1. Consideraciones de seguridad eléctrica

Durante el montaje, operación y pruebas del sistema, se deben seguir normas de seguridad:

- No ingresar con alimentos o bebidas cerca del tablero eléctrico.
- No introducir las manos en la máquina rotativa ni en los bornes energizados.
- No portar pulseras, collares o elementos metálicos sueltos.
- Mantener el cabello recogido.
- Utilizar siempre el equipo de protección personal adecuado: guantes dieléctricos, gafas de seguridad y calzado aislante.
- Tomar precauciones especiales debido a la inclusión de un disco giratorio, que simula carga mecánica sobre el motor, lo cual puede generar riesgos físicos si se manipula sin las debidas precauciones.

4.2. Conexión de los Equipos

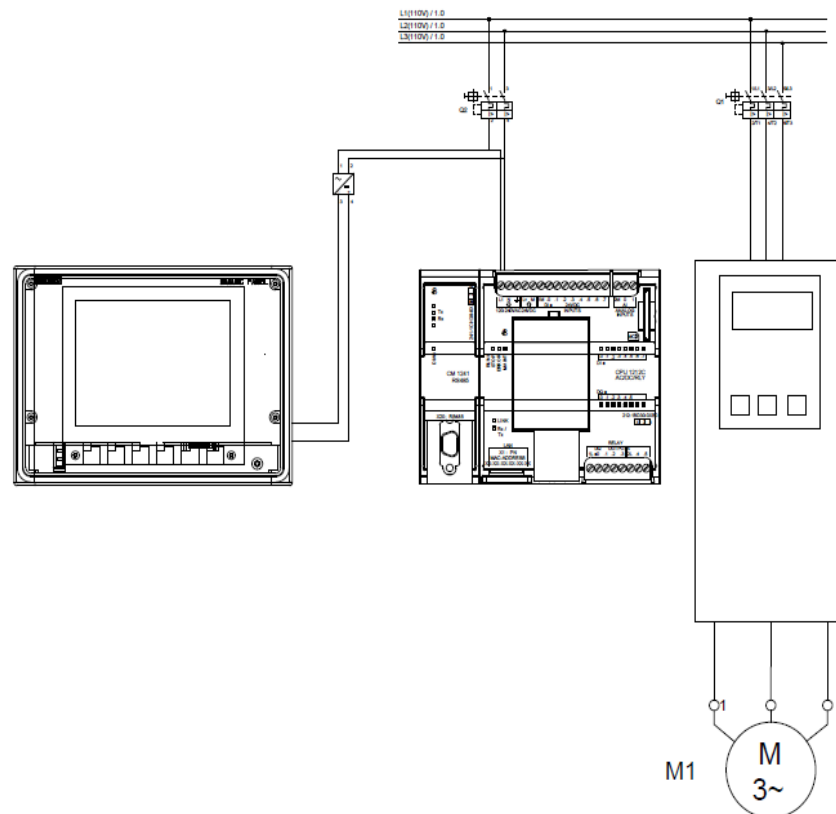


Figura 1. Esquema de conexión

4.2.1. Esquema de conexiones eléctricas

Para realizar la conexión eléctrica del sistema, se requiere una toma trifásica (L1, L2, L3) que permita alimentar el tablero general. En la figura se muestra el esquema general de conexión de los componentes del sistema, incluyendo aquellos que operan en corriente alterna (CA) y en corriente continua (CC):

- El PLC LOGO 230 RCE y el variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2 son alimentados en CA, típicamente entre 110 V y 220 V según especificaciones.
- La pantalla HMI y el switch Ethernet industrial requieren alimentación en 24 V DC, proporcionada por una fuente regulada.

En el esquema se visualizan dos interruptores termomagnéticos:

- Un breaker bipolar, encargado de proteger y alimentar los dispositivos de control (PLC, fuente de 24 V, HMI, switch).
- Un breaker tripolar, que suministra energía al variador y, a través de él, al motor trifásico, el cual está configurado en conexión en triángulo internamente.

4.2.2. Conexión del motor AC al variador de frecuencia

El motor trifásico (M1) se conecta directamente a las salidas del variador de frecuencia a través de un breaker tripolar que protege el sistema frente a sobrecargas o cortocircuitos. El variador es el encargado de regular y suministrar los tres parámetros eléctricos fundamentales para el funcionamiento del motor: tensión (V), corriente (I) y frecuencia (Hz) energizado (L1, L2, L3) el sistema, el variador transforma la entrada de corriente alterna trifásica en una señal modulada en amplitud y frecuencia, permitiendo así el control variable de la velocidad de giro del motor según las condiciones de operación y setpoint.



Figura 2. Conexión del variador CU240E-2 al motor

4.2.3. Conexión del variador al PLC S7-1200

Dado que el variador SINAMICS CU240E-2 utiliza el protocolo Modbus y el PLC LOGO no tiene compatibilidad nativa con este tipo de comunicación, es necesario emplear un módulo de expansión CM 1241 RS422/RS485, que permite realizar la conversión y establecer la comunicación mediante el protocolo Modbus RTU del variador con el PLC.

4.2.4. Conexión de la pantalla HMI

La pantalla HMI se alimenta a través de una fuente de voltaje regulada de 24 V DC, conectada desde el sistema de control. Esta interfaz cumple un rol fundamental dentro del proceso de automatización, ya que permite la interacción directa entre el operador y el sistema de control, facilitando la supervisión, operación y ajuste de parámetros en tiempo real.

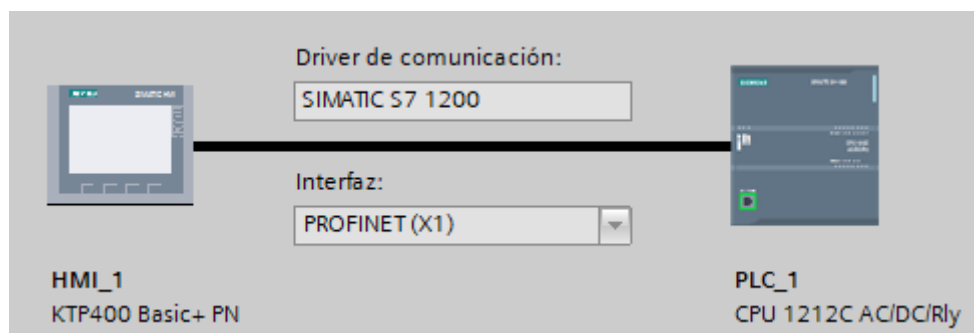


Figura 3. Conexión HMI y PLC S7-1200

4.2.5. Conexión del switch industrial

El switch Ethernet industrial también se alimenta a 24 V DC y permite la interconexión de la HMI, el PLC, el variador y la computadora de programación. A través de este switch, se puede monitorear y programar el sistema la conexión se realiza mediante cables de red Ethernet categoría 6.

4.3. Desarrollo del Programa en TIA Portal

Esta sección detalla el proceso de configuración y programación del controlador lógico programable (PLC) y el variador de frecuencia utilizando el software Siemens TIA Portal. El objetivo es establecer una comunicación robusta y una lógica de control eficiente para el motor trifásico.

4.3.1. Configuración del PLC en el Entorno TIA Portal

La primera etapa en el desarrollo del programa consiste en la correcta identificación e integración de nuestro hardware dentro del entorno de desarrollo TIA Portal.

4.3.1.1. Selección del Automata:

Se selecciona el autómata programable Siemens S7-1200 con CPU 1212C de características AC/DC/RLY.

4.3.1.2. Configuración de Dispositivos y Redes:

Añadido el PLC, se procede a su configuración básica, incluyendo la asignación de direcciones IP para la comunicación Ethernet. Esto es crucial para la interconexión con la pantalla HMI y el switch industrial, permitiendo el monitoreo y la programación remota.

4.3.2. Estructura de Bloques de Programación

Para una organización lógica y eficiente del código, se ha estructurado el programa principal del PLC en varios segmentos dentro del bloque de organización Main [OB1]. Esta modularización facilita la lectura, el mantenimiento y la depuración del programa.

A continuación, se detalla la función de cada segmento:

4.3.2.1.Segmento 1: COMUNICACIÓN

Este segmento es responsable de inicializar y gestionar la comunicación Modbus RTU entre el PLC y el variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2. Se utiliza el bloque de función MB_COMM_LOAD para configurar el puerto serial (RS485 a través del módulo CM 1241) con los parámetros Modbus (velocidad en baudios, paridad, etc.). Es fundamental que estos parámetros coincidan con la configuración del variador para establecer una comunicación exitosa.

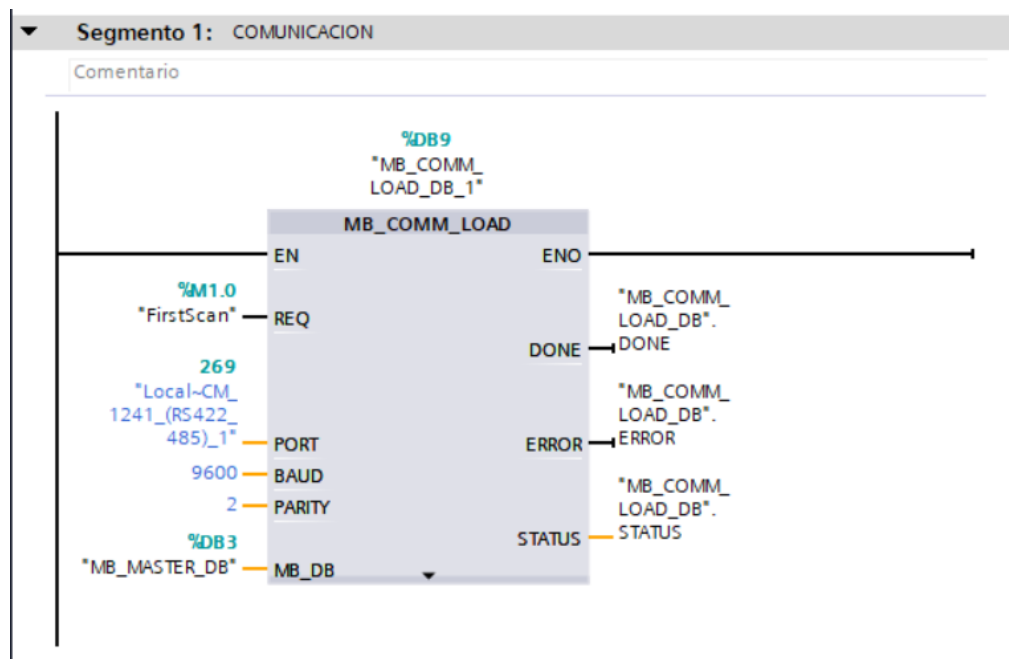


Figura 4. Segmento comunicación

4.3.2.2.Segmento 2: SETEAR VELOCIDAD

Este segmento se encarga de tomar el setpoint de velocidad ingresado por el operador a través de la HMI y enviarlo al variador de frecuencia. Implica el escalado o conversión del valor de la HMI (que puede ser en RPM o una escala porcentual) a la frecuencia en Hz que el variador requiere. Se utiliza un bloque de comunicación Modbus de escritura (MB_MASTER) para enviar este valor al registro Modbus correspondiente en el variador.

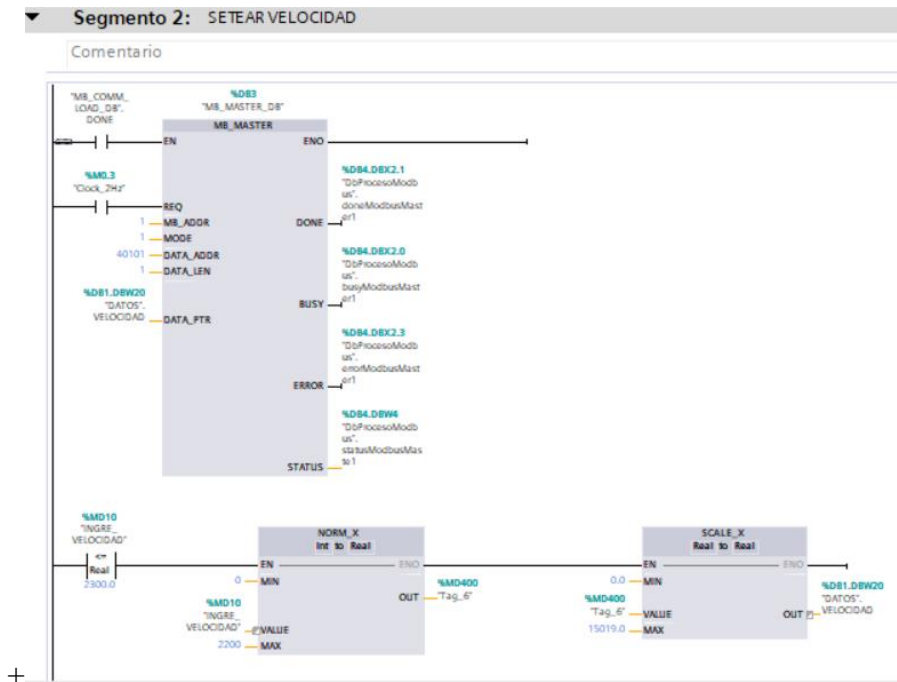


Figura 5. Setear velocidad

4.3.2.3.Segmento 3: PUESTA EN MARCHA

Define la lógica para el arranque del motor. Este segmento procesa la señal de "Marcha" proveniente de la HMI o de un pulsador físico y genera la señal de arranque adecuada que se envía al variador a través de Modbus. Puede incluir condiciones de seguridad o interbloqueos para asegurar un arranque seguro.

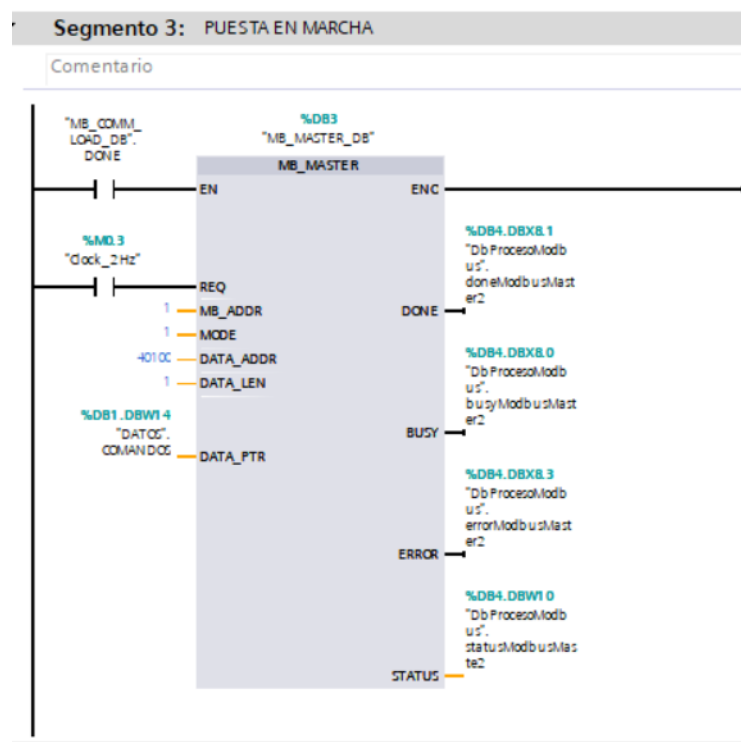


Figura 6. Puesta en marcha

4.3.2.4.Segmento 4: COMANDOS

Este segmento agrupa otros comandos de control, como la parada del motor. Similar al segmento de puesta en marcha, procesa la señal de "Parada" y la transmite al variador mediante Modbus.

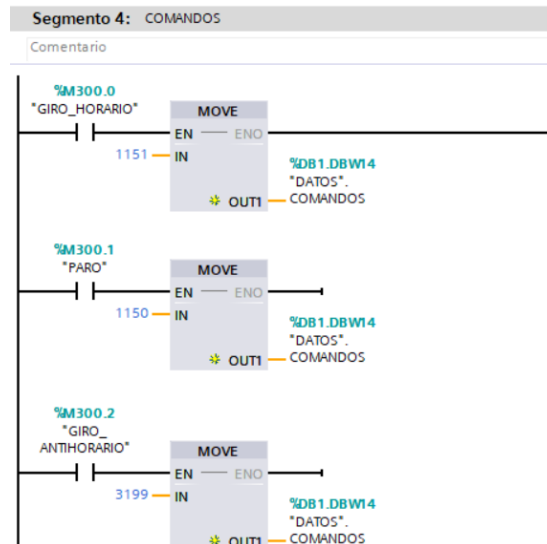


Figura 7. Comandos

4.3.2.5.Segmento 5: LECTURA DE DATOS DEL VARIADOR

Este segmento es fundamental para el monitoreo del sistema. Utiliza bloques de comunicación Modbus de lectura (MB_MASTER) para leer periódicamente los parámetros operativos del variador, como corriente, voltaje, frecuencia de salida y torque estimado. Estos valores se almacenan en un bloque de datos del PLC para ser visualizados en la HMI.

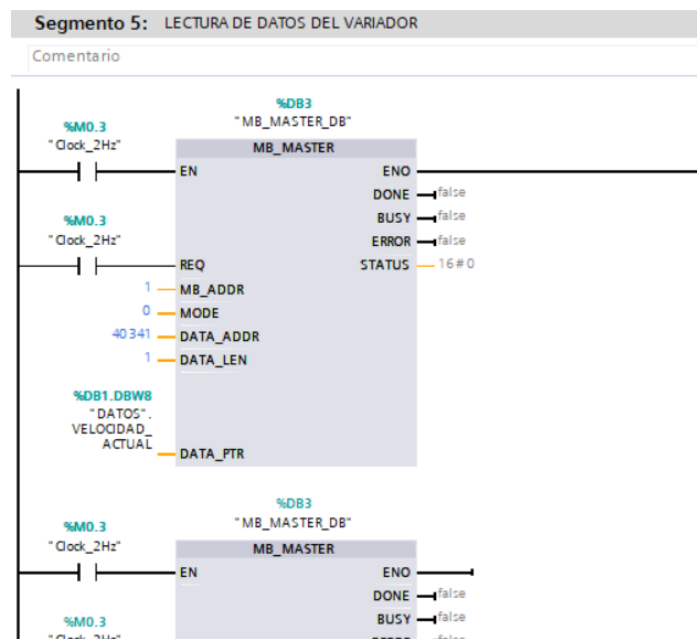


Figura 8. Lectura de datos del variador

En la vista de direcciones pueden mostrarse, en forma de tabla, las direcciones de entrada y salida actualmente utilizadas. La vista de direcciones se encuentra en "Propiedades" de la CPU, dentro de la ventana de inspección que pueden ajustarse y mostrarse en la vista de direcciones a través de distintas casillas opcionales:

- *Entradas*: Visualización de direcciones de entrada
- *Salidas*: Visualización de direcciones de salida
- *Vacío de direcciones*: Visualización de áreas libres de dirección
- *Slot*: Visualización del número de slot

Tabla 1. Direcciones de entrada y salida

	Significado
Tipo	<p>Tipo de área de direcciones. Indica si el área de direcciones es de entrada o salida.</p> <ul style="list-style-type: none"> • I = Dirección de entrada de módulo con espacio de direcciones de periferia de entrada (con longitud > 0) • I* = Dirección de entrada o de diagnóstico de módulos sin espacio de direcciones de periferia de entrada (con longitud = 0). Estas direcciones no permiten intercambiar datos (estados de señal o valores medidos) en el programa de usuario. Se usan para notificar eventos de diagnóstico del sistema operativo (p. ej. en la información de arranque de los OB de error). • Q = Dirección de salida

Vista general de dispositivos							
...	Módulo	Slot	Dirección I	Dirección Q	Tipo	Referencia	Firmware
		103					
		102					
	CM 1241 (RS422/485)_1	101			CM 1241 (RS422/485)	6ES7 241-1CH31-0XB0	V1.0
	▼ PLC_1	1			CPU 1212C AC/DC/Rly	6ES7 212-1BE40-0XB0	V4.1
	DI 8/DQ 6_1	1 1	0	0	DI 8/DQ 6		
	AI 2_1	1 2	64...67		AI 2		
		1 3					
	HSC_1	1 16	1000...1003		HSC		
	HSC_2	1 17	1004...1007		HSC		
	HSC_3	1 18	1008...1011		HSC		
	HSC_4	1 19	1012...1015		HSC		
	HSC_5	1 20	1016...1019		HSC		
	HSC_6	1 21	1020...1023		HSC		
	Pulse_1	1 32		1000...1001	Generador de impulsos..		
	Pulse_2	1 33		1002...1003	Generador de impulsos..		
	Pulse_3	1 34		1004...1005	Generador de impulsos..		
	Pulse_4	1 35		1006...1007	Generador de impulsos..		
	► Interfaz PROFINET_1	1 X1			Interfaz PROFINET		
		2					

Figura 9. Dirección comunicación Modbus

Tabla 2. Parámetros

Nombre	Dirección	Descripción
FRECUENCIA	%IW2	Frecuencia
FRECUENCIA_SALIDA	%MD120	Frecuencia de salida
VELOCIDAD_ACT	%MD100	Velocidad actual del motor ac
VOLTAJE_SALIDA	%MD140	Voltaje de salida
INGRE_VELOCIDAD	%MD10	Setpoint ingreso de RPM (Velocidad)
CORRIENTE_SALIDA	%MD124	Corriente de salida
TORQUE_SALIDA	%MD132	Torque de salida
CORRIENTE_ACT	%MD520	Corriente actual del sistema
VELOCIDAD_SALIDA	%MD136	Velocidad de salida del motor
VEL_ENCODER	%MD220	Velocidad del encoder

4.3.2.6.Segmento 8: INDICADORES

Este segmento se encarga de la lógica para activar y desactivar indicadores visuales (luces o elementos gráficos en la HMI) que reflejan el estado del motor o del sistema (ej. "Motor funcionando", "Alarma", "Parado").

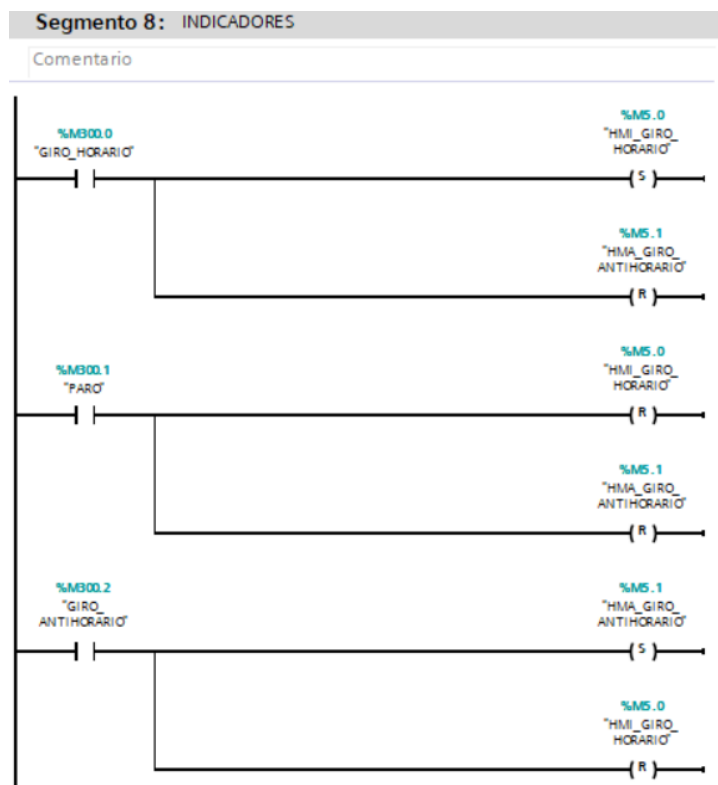


Figura 10. Segmento Indicadores

4.3.2.7.Segmento 9: CÁLCULO TORQUE

Si el variador no proporciona directamente el valor de torque o se requiere un cálculo más preciso basado en otras variables, este segmento realiza las operaciones matemáticas necesarias para estimar o calcular el torque del motor.

4.3.2.8.Segmento 10: TIEMPO LECTURA

Este segmento gestiona los tiempos o frecuencias de lectura de los datos del variador, asegurando que los datos se actualicen de manera oportuna sin sobrecargar el bus de comunicación.

4.3.3. Parámetros Utilizados en el Control Flux-Vector

El control Flux-Vector implementado en el variador SINAMICS CU240E-2 requiere la configuración de diversos parámetros para optimizar el desempeño del motor. Aunque la configuración principal se realiza directamente en el variador o mediante TIA Portal en la vista de parámetros del variador, el PLC interactúa con algunos de estos parámetros clave a través de Modbus.

Se utilizan los siguientes parámetros principales en la lógica de control del PLC:

Tabla 3. Variables del sistema en el autómatas.

Variable	Tipo de Dato	Descripción	Origen/Uso
SET_FRECUENCIA	Int	Define el setpoint de frecuencia deseado para el motor.	Entrada desde la HMI, mapeado al registro Modbus de frecuencia del variador.
VOLTAJE	Int / Real	Valor de voltaje actual consumido por el motor.	Leído desde el variador.
CORRIENTE	Int / Real	Valor de corriente consumida por el motor.	Leído desde el variador.
FRECUENCIA	Int / Real	Frecuencia de salida actual del variador.	Leído desde el variador.
PAR	Int / Real	Torque estimado del motor.	Leído desde el variador.
VELOCIDAD ACTUAL	Int / Real	Velocidad de giro actual del motor.	Encoder
COMANDOS	Int	Utilizada para enviar comandos de control al variador (arranque, parada, etc.).	Envío de comandos al variador.
STATUS	Int	Indica el estado operativo del variador y posibles alarmas.	Leído desde el variador.

Estos parámetros se gestionan en Bloques de Datos (DBs) dentro del PLC para asegurar su persistencia y fácil acceso por parte de la lógica de control y la HMI.

DATOS									
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a..
1	Static								
2	VOLTAJE	Int	0.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	CORRIENTE	Int	2.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	FRECUENCIA	Int	4.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	PAR	Int	6.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	VELOCIDAD_ACTUAL	Int	8.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	POTENCIA ACTIVA	Int	10.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	CONSUMO_ENERGIA	Int	12.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	COMANDOS	Int	14.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	LECTURA	Int	16.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	PUESTA EN SERVICIO	Int	18.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	VELOCIDAD	Int	20.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	STATUS	Int	22.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 11. Variable del PLC

4.3.4. Lógica de Control: Arranque, Parada, Control de Velocidad, Límites

La lógica de control programada en el PLC asegura la operación segura y eficiente del motor.

4.3.4.1. Arranque y Parada:

El arranque del motor se habilita mediante una señal de pulsador en la HMI que activa un bit de control en el PLC. Este bit, a su vez, genera el comando Modbus de arranque para el variador. La parada del motor se implementa de manera similar, con un pulsador de parada en la HMI que desactiva el motor (ver Segmento 4: COMANDOS). Se considera la implementación de un botón de parada.

4.3.4.2. Control de Velocidad (Frecuencia):

El setpoint de velocidad se introduce a través de la HMI y se almacena en la variable SET_FRECUENCIA del PLC.

4.3.4.3. Límites de Operación:

En la programación del variador y/o del PLC, se configuran límites para la frecuencia máxima y mínima de operación del motor, asegurando que no se excedan los rangos seguros de operación.

4.3.4.4. Monitoreo y Diagnóstico:

La lectura continua de parámetros de corriente, voltaje, frecuencia y torque que permite un monitoreo en tiempo real del estado del motor.

4.4. Diseño y Configuración de la Interfaz HMI

La Interfaz Hombre-Máquina (HMI) es el punto de interacción principal entre el operador y el sistema de control. Su diseño intuitivo y la correcta configuración son cruciales para el monitoreo en tiempo real y ajuste de parámetros del motor.

4.4.1. Creación de la Pantalla HMI en TIA Portal

Para este proyecto, se ha utilizado un panel operador Siemens KTP400 Basic PN. Este panel se integra perfectamente con el entorno TIA Portal, lo que permite una configuración sencilla y una comunicación con el PLC S7-1200 a través de PROFINET (Ethernet).

Creación del Proyecto HMI: Dentro del mismo proyecto de TIA Portal, se añade un nuevo dispositivo HMI, seleccionando el modelo KTP400 Basic PN.

Configuración de la Conexión con el PLC: Se establece la conexión entre la HMI y el PLC S7-1200, asegurando que las direcciones IP de ambos dispositivos estén correctamente configuradas dentro de la misma red.

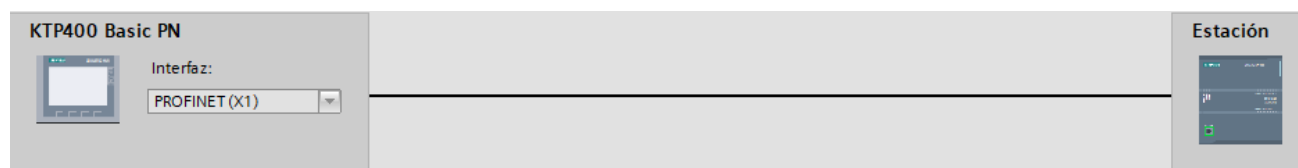


Figura 12. Comunicación HMI

4.4.2. Estructura y Elementos de las Pantallas HMI

El diseño de la HMI se ha estructurado en varias pantallas para organizar la información y los controles de manera lógica, facilitando la navegación y la operación por parte del usuario.

Pantalla Inicial (Imagen Raíz): Esta es la primera pantalla que el usuario ve al encender la HMI. Actúa como una pantalla de bienvenida o de inicio, y puede incluir información del proyecto o de la institución. En este caso, muestra la información del proyecto de "Implementación de un sistema de control FLUX-VECTOR para la optimización de la velocidad en motores de corriente alterna", junto con los nombres de los autores. Cuenta con un botón "CONTROL" que permite al usuario navegar a la pantalla principal de operación.

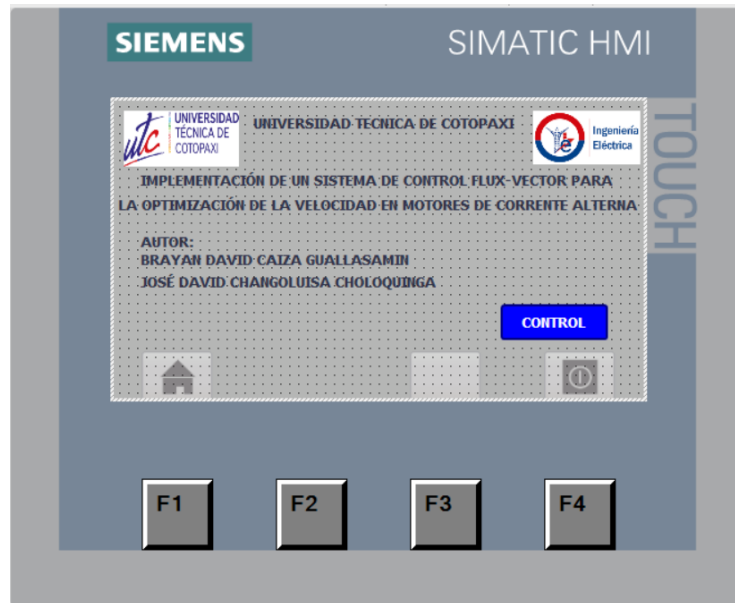


Figura 13. Imagen raíz

Pantalla Principal de Control (CONTROL): Esta es la pantalla de operación central, donde el usuario puede interactuar directamente con el sistema para controlar el motor y monitorear sus parámetros.

4.4.2.1. Área de Control del Motor:

- SET-POINT VELOCIDAD: Un campo de entrada numérico que permite al operador introducir el setpoint deseado para la velocidad del motor. Este valor se envía al PLC y, a través de él, al variador de frecuencia.
- Botones de Dirección (HORARIO/ANTIHORARIO): Permiten cambiar el sentido de giro del motor.
- Botones de Marcha/Parada (INICIO/STOP): Controlan el arranque y la detención del motor.

4.4.2.2. Área de Parámetros del Motor:

- VOLTAJE (V): Muestra el valor en tiempo real del voltaje aplicado al motor.
- CORRIENTE (A): Muestra el valor en tiempo real de la corriente consumida por el motor.
- FRECUENCIA (Hz): Muestra la frecuencia de salida actual del variador, directamente relacionada con la velocidad del motor.
- VELOCIDAD (RPM/EJE): Muestra la velocidad de giro actual del motor en RPM o una unidad de eje.
- TORQUE: Muestra el valor estimado o medido del torque del motor.

4.4.2.3. Navegación a Curvas (Curvas):

- Botones para visualizar las curvas de tendencia de las variables principales: FRECUENCIA, VELOCIDAD, CORRIENTE, VOLTAJE, TORQUE. Al presionar estos botones, el usuario navega a las pantallas de gráficos correspondientes.

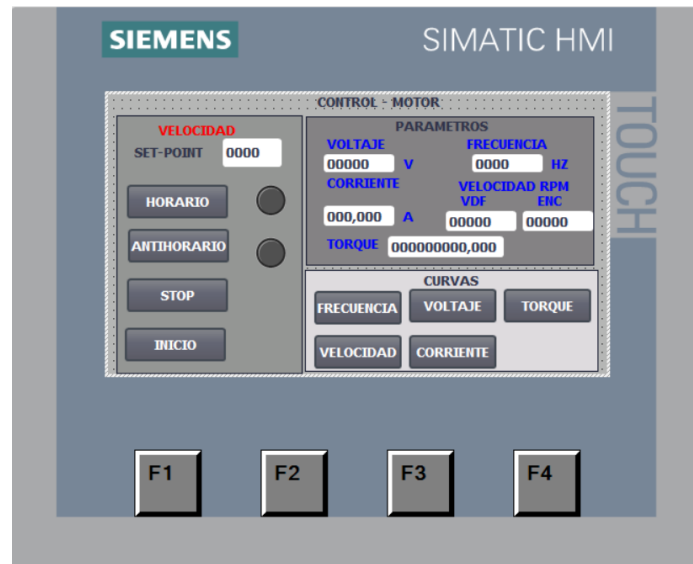


Figura 14. Imagen de operación

Pantallas de Tendencia, estas pantallas permiten al usuario visualizar el comportamiento de las variables clave del motor a lo largo del tiempo, facilitando el análisis y diagnóstico. Cada pantalla de curva muestra el historial de una variable específica (ej. Frecuencia).

- Gráfico de Tendencia: Muestra la evolución del valor de la variable en función del tiempo.
- Botón "REGRESAR": Permite volver a la pantalla principal de control.

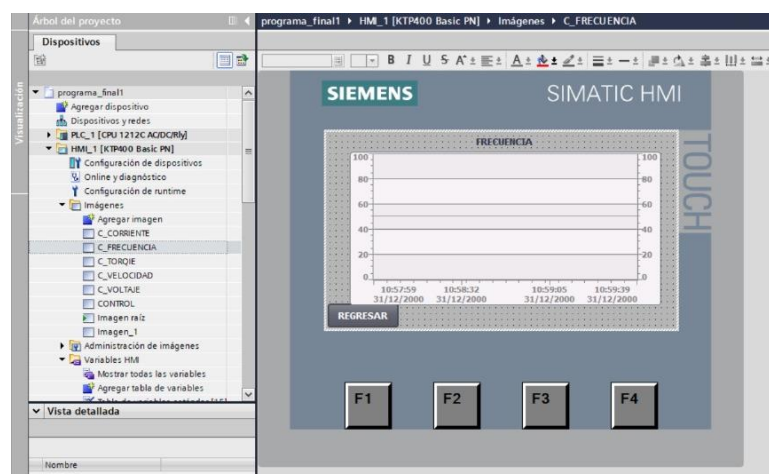


Figura 15. Imagen de grafica de la frecuencia en tiempo real

4.4.3. Variables Monitoreadas y Vinculación HMI-PLC

Para que la HMI pueda interactuar con el PLC y mostrar los datos del sistema, es necesario vincular las variables de la HMI con las variables correspondientes del PLC. Esta vinculación se realiza en la tabla de variables HMI. Las principales variables monitoreadas y controladas desde la HMI incluyen:

Tabla 4. Variables del HMI

Variable	Tipo de Dato	Descripción	Origen
Corriente salida	Real	Corriente	PLC que recibe del variador.
Datos frecuencia	Int	Frecuencia salida del variador	Variable del PLC.
Datos PAR	Int	Torque del motor.	Variable del PLC.
Datos velocidad actual	Int	Velocidad actual del motor.	Variable del PLC.
Datos voltue	Int	Voltaje aplicado al motor.	Variable del PLC.
HMI giro horario	Bool	Variable booleana giro horario	Control desde la HMI.
HMI giro antihorario	Bool	Variable booleana giro antihorario	Control desde la HMI.
Ingre velocidad	Real	Variable Setpoint de velocidad.	Entrada desde la HMI.
Par salida	Real	Variable de salida para el torque.	Si se calcula en el PLC.
Vel encoder	UDInt	Velocidad de un encoder.	Si estuviera presente.

Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Conexión	Nombre del PLC	Variable PLC
CORRIENTE_SALIDA	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	CORRIENTE_SALIDA
DATOS_FRECUENCIA	Tabla de variables estándar	Int	HMI_Conexión_1	PLC_1	DATOS_FRECUENCIA
DATOS_PAR	Tabla de variables estándar	Int	HMI_Conexión_1	PLC_1	DATOS_PAR
DATOS_VELOCIDAD_ACTUAL	Tabla de variables estándar	Int	HMI_Conexión_1	PLC_1	DATOS_VELOCIDAD_ACT...
DATOS_VOLTAJE	Tabla de variables estándar	Int	HMI_Conexión_1	PLC_1	DATOS_VOLTAJE
FRECUENCIA_SALIDA	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	FRECUENCIA_SALIDA
GIRO_ANTHORARIO	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	GIRO_ANTHORARIO
GIRO_HORARIO	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	GIRO_HORARIO
HMA_GIRO_ANTHORARIO	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	HMA_GIRO_ANTHORARIO
HMI_GIRO_HORARIO	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	HMI_GIRO_HORARIO
INGRE_VELOCIDAD	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	INGRE_VELOCIDAD
PAR_SALIDA	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	PAR_SALIDA
PARO	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	PARO
VEL_ENCODER	Tabla de variables estándar	UDInt	HMI_Conexión_1	PLC_1	VEL_ENCODER
VELOCIDAD_ACT	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	VELOCIDAD_ACT
<Agregar>					

Figura 16. Variables de la pantalla HMI

4.4.4. Operación de la Pantalla HMI (Máquina - Hombre)

La operación de la HMI está diseñada para ser intuitiva y permitir un control completo del sistema.

- Inicio del Sistema: Al encender la HMI, se visualiza la pantalla inicial.
- Configuración de Velocidad: Utiliza el campo "SET-POINT " para ingresar la velocidad deseada. El sistema ajustará automáticamente la frecuencia del variador para alcanzar esa velocidad.

- Arranque/Parada: Los botones "sentido HORARIO o ANTIHORARIO" y "STOP" permiten al operador arrancar y detener el motor de manera controlada.
- Monitoreo en Tiempo Real: Los valores en los paneles de "PARÁMETROS" se actualizan constantemente, proporcionando al operador una visión clara del estado de operación del motor (voltaje, corriente, frecuencia, velocidad, torque).
- Visualización de Tendencias: Al seleccionar los botones de "CURVAS", el operador puede analizar el comportamiento histórico de las variables, lo que es útil para las pruebas de experimentación.

4.5.Subida del Programa al PLC y Pruebas de Comunicación

Una vez que el hardware ha sido configurado y el programa desarrollado en TIA Portal, el siguiente paso crítico es cargar la lógica de control al PLC y verificar la correcta comunicación entre todos los componentes del sistema.

4.5.1. Carga del Programa al PLC

El proceso de carga del programa implica transferir el código compilado desde el entorno de TIA Portal en la computadora hacia el PLC S7-1200.

Apertura del Proyecto: Se inicia el software TIA Portal (versión V16 en este caso) y se abre el proyecto existente que contiene la configuración del hardware y la lógica de programación del PLC y la HMI.

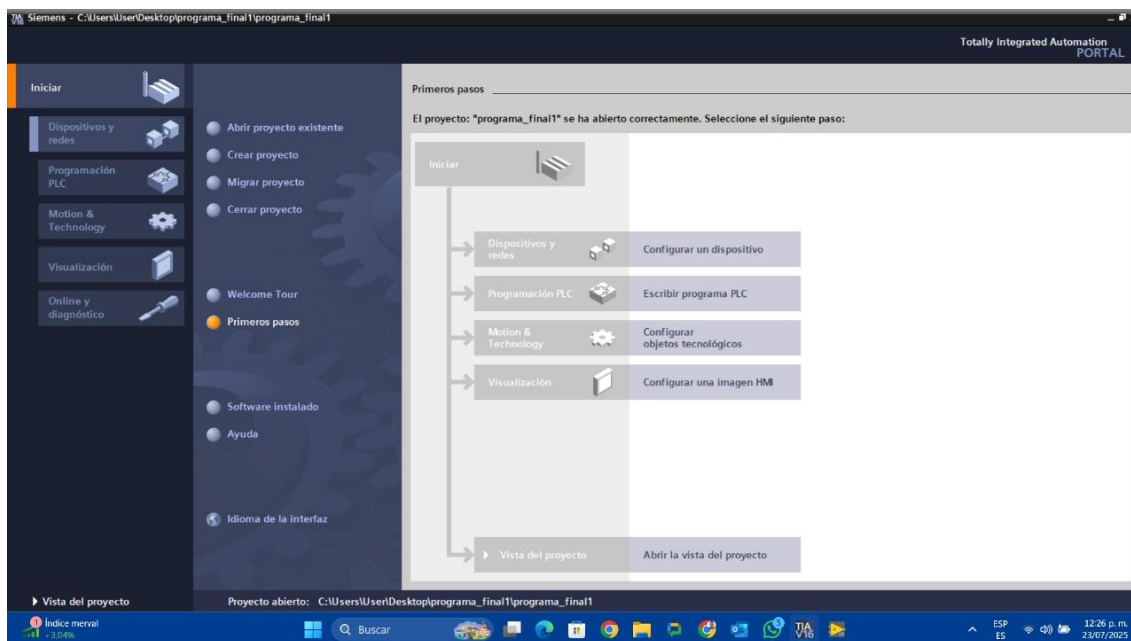


Figura 17. Interfaz de inicio TIA PORTAL V 16

Establecimiento de la Conexión Online: Para cargar el programa, es necesario establecer una conexión online entre la computadora (donde está TIA Portal) y el PLC.

- Desde la vista de Dispositivos y Redes, se selecciona (PLC_1 CPU 1212C AC/DC/RLY).
- Se utiliza la función "Establecer conexión online" (ícono de enchufe con flecha verde o menú "Online"). TIA Portal buscará el dispositivo en la red.
- Es crucial que las direcciones IP de la PC, el PLC y la HMI estén en el mismo rango de red para que la comunicación sea exitosa. En este proyecto, la configuración de red es la siguiente:
 - PLC_1: 192.168.100.50
 - HMI_1 (KTP400 Basic PN): 192.168.100.40
 - PC-System_1 (PC de programación): 192.168.100.4 Estas direcciones IP se configuran previamente en la vista de dispositivos y redes, tal como se muestra en la figura.

Carga del Programa y Hardware: Una vez establecida la conexión, se procede a cargar el programa completo (incluyendo la configuración de hardware) al PLC. Esto se realiza seleccionando el PLC en el árbol del proyecto y haciendo clic en el botón "Download to device" (flecha hacia abajo). El sistema guiará a través de los pasos para sobrescribir la configuración y la lógica existentes en el PLC.

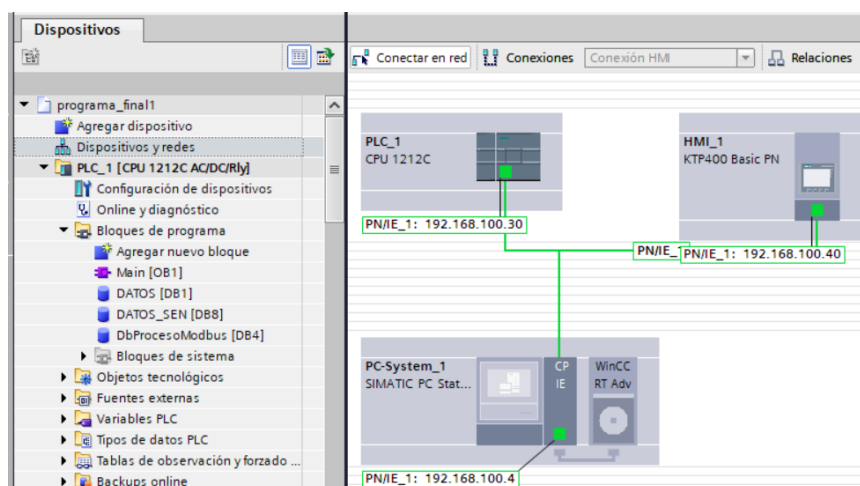


Figura 18. Configuración IP de los equipos

4.5.2. Pruebas de Comunicación

La verificación de la comunicación es un paso esencial para asegurar que todos los componentes del sistema están interactuando correctamente.

4.5.2.1. Estado Online del PLC:

Después de la carga exitosa, el PLC debe mostrarse en estado "Online" en TIA Portal, lo que se indica visualmente con un círculo verde junto al nombre del PLC (PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/RLY]) en el árbol del proyecto. Esto confirma que TIA Portal mantiene una comunicación activa con el controlador.

Para verificar el flujo de datos entre el PLC, el variador y la HMI, se utiliza la "Tabla de variables estándar" en modo de monitoreo online. Al activar las "gafas" (icono de monitoreo online), se pueden observar los valores de las variables en tiempo real.

Es fundamental observar que variables como SET_FRECUENCIA, VOLTUE, CORRIENTE, FRECUENCIA_SALIDA, PAR y VELOCIDAD_ACTUAL se actualizan dinámicamente. Esto no solo confirma la operación de la lógica del PLC, sino también la comunicación Modbus RTU con el variador (al ver los valores leídos del variador) y la comunicación PROFINET con la HMI (al ver los valores cambiados desde la HMI reflejados en el PLC).

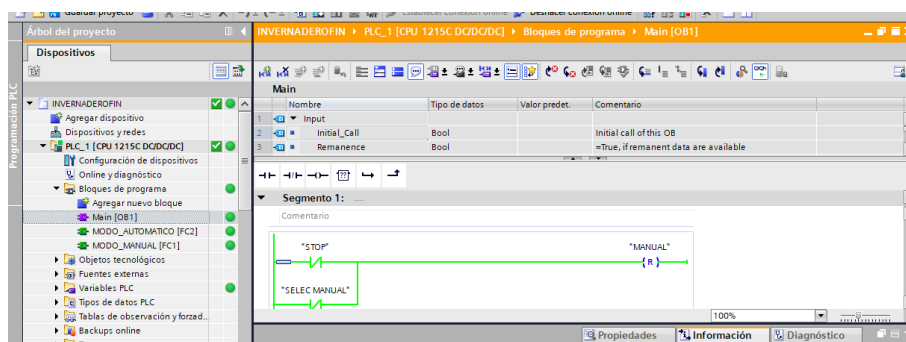


Figura 19. Simulación

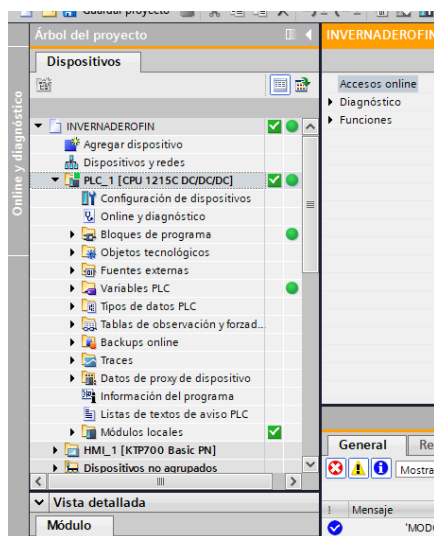


Figura 20. Comprobación de errores

4.5.3. Verificación de la Conexión HMI-PLC en Runtime

La HMI (KTP400 Basic PN) también debe estar comunicándose activamente con el PLC. Al iniciar el runtime de la HMI en el panel físico, se debe observar que los valores de los parámetros del motor (Voltaje, Corriente, Frecuencia, Torque, Velocidad) se actualizan en las pantallas, reflejando los datos leídos por el PLC desde el variador. Asimismo, la interacción con los botones y campos de entrada en

la HMI como el setpoint de velocidad o los comandos de arranque/parada debe provocar una respuesta visible en el motor.

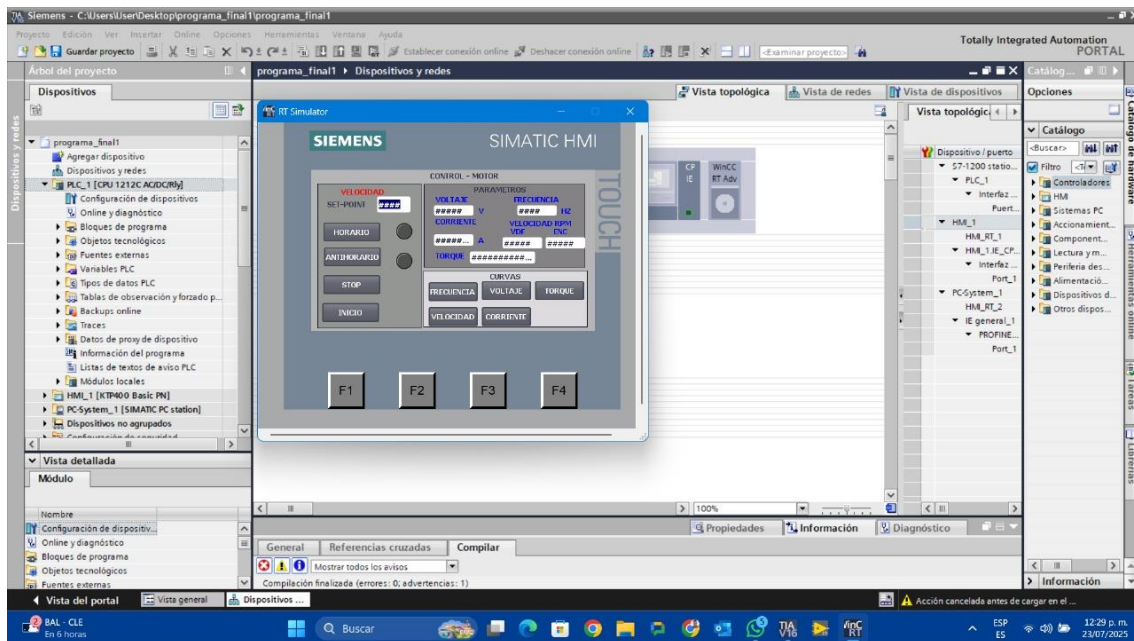


Figura 21. HMI-PLC en Runtime

4.6. Monitoreo del Sistema con la HMI

Una vez que el programa ha sido cargado exitosamente en el PLC y la comunicación entre todos los dispositivos (PLC, Variador, HMI) está establecida, la pantalla HMI se convierte en la herramienta principal para la supervisión y control del sistema. Esta sección describe cómo el operador interactúa con la HMI para monitorear el estado del motor y ajustar sus parámetros.

4.6.1. Ejecución del Programa y Visualización en Tiempo Real

El sistema entra en operación una vez que el PLC está en modo RUN y la HMI está en modo Runtime. Desde la pantalla principal de control de la HMI, el operador tiene una visualización instantánea y actualizada de los parámetros operativos clave del motor.

- **Valores Dinámicos:** Los campos numéricos de la HMI que muestran el Voltaje (V), Corriente (A), Frecuencia (Hz), Velocidad (RPM/EJE) y Torque se actualizan continuamente. Estos valores son leídos por el PLC desde el variador de frecuencia a través de la comunicación Modbus y luego transmitidos a la HMI.
- **Representación Visual:** Además de los valores numéricos, la HMI puede utilizar indicadores visuales como barras de progreso o LEDs virtuales para representar el estado del sistema, por ejemplo, si el motor está en marcha o parado.

- **Acceso:** Los botones de "CURVAS" (FRECUENCIA, VELOCIDAD, CORRIENTE, VOLTAJE, TORQUE) permiten al operador navegar a pantallas dedicadas donde se visualizan gráficos de tendencia históricos de cada variable.

4.6.2. Cambios del Setpoint desde la HMI

La HMI proporciona una interfaz amigable para modificar los parámetros de operación del motor.

- **Ingreso de Setpoint de Velocidad:** El operador puede ingresar el valor deseado para la velocidad del motor en el campo "SET-POINT VELOCIDAD". Este valor numérico (generalmente en RPM o en Hz, dependiendo de la configuración) es enviado directamente al PLC.
- **Comandos de Arranque/Parada y Dirección:** Los botones gráficos de "INICIO" y "STOP" permiten al operador encender y apagar el motor de manera controlada. Asimismo, los botones "HORARIO" y "ANTIHORARIO" facilitan el cambio en el sentido de giro del motor, lo cual es útil en aplicaciones donde se requiere reversibilidad. Cada pulsación de estos botones genera una señal que el PLC interpreta y envía al variador a través de Modbus para ejecutar la acción correspondiente.

4.6.3. Ventajas del Monitoreo en Tiempo Real

El monitoreo constante del sistema a través de la HMI ofrece múltiples ventajas operativas:

- **Control Intuitivo:** Permite a los operadores sin conocimientos de programación interactuar fácilmente con el sistema, reduciendo la curva de aprendizaje y la posibilidad de errores.
- **Diagnóstico Inmediato:** Cualquier anomalía en el funcionamiento del motor (ej. aumento excesivo de corriente, vibraciones) puede ser detectada rápidamente al observar los parámetros en la HMI, lo que facilita la identificación de problemas.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL MOTOR AC

5.1. Control flux vector del sistema de 0 a 1610 rpm sin carga

El control vectorial de flujo (Flux Vector Control) se distingue por su capacidad de mantener un comportamiento estable en motores de corriente alterna que permitiendo el manejo del par y la velocidad en distintas condiciones de carga. Para lograr este tipo de control, se utiliza un variador de frecuencia que, junto con la retroalimentación en tiempo real proporcionada por el encoder, permite ajustar continuamente los parámetros eléctricos del sistema. La velocidad de referencia o set point es ingresada mediante la pantalla HMI, lo que facilita la interacción con el usuario.

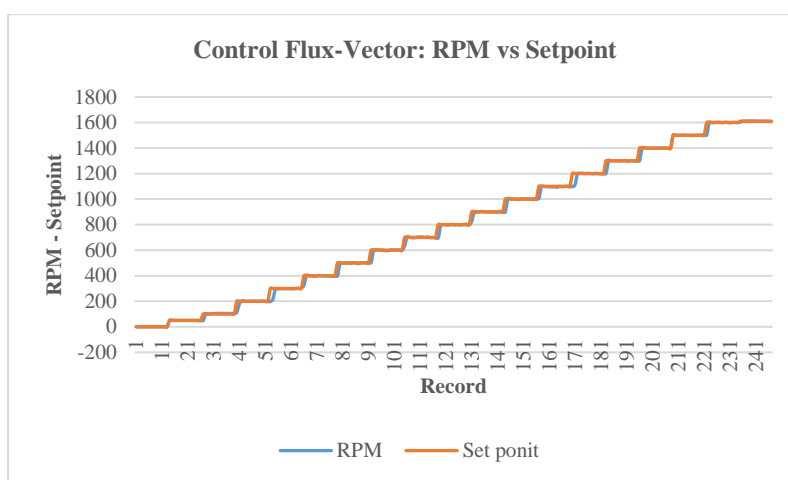


Figura 22. Control Setpoint y rpm

La figura muestra el comportamiento dinámico de la máquina rotativa, la curva naranja indica el setpoint de velocidad introducido mediante la pantalla HMI, mientras que la línea azul representa las RPM reales medidas en el motor, La coincidencia de ambas curvas confirma la capacidad del sistema de control vectorial de flujo para seguir la consigna de velocidad con una desviación mínima que se logra por medio de la retroalimentación, el cual permite una respuesta ante variaciones del setpoint, el control se mantiene estable hasta alcanzar la velocidad nominal de 1610 RPM, tal como indican los datos de placa.

5.1.1. Análisis de la frecuencia

La Figura presenta la relación entre las Revoluciones Por Minuto del motor y la frecuencia de alimentación suministrada por el sistema de control Flux-Vector se observa una relación directamente proporcional a lo largo de todo el rango operativo a medida que la frecuencia se incrementa desde sus valores iniciales, las RPM del motor aumentan de similar forma que valida el principio de control de velocidad en máquinas de corriente alterna. Esta proporcionalidad es fundamental para asegurar el control del flujo magnético y del par motor a distintas velocidades de operación. En el extremo superior

de la experimentación la frecuencia alcanza aproximadamente los 78 Hz, mientras que las RPM se elevan hasta alrededor de 2300 RPM. Finalmente, se registra una disminución simultánea tanto de la frecuencia como de las RPM hasta valores mínimos, comportamiento correspondiente a la activación del mecanismo de salvaguarda del PLC, programado para interrumpir el funcionamiento de la máquina rotativa al detectarse condiciones cercanas o superiores a los límites de operación establecidos por los datos de placa.

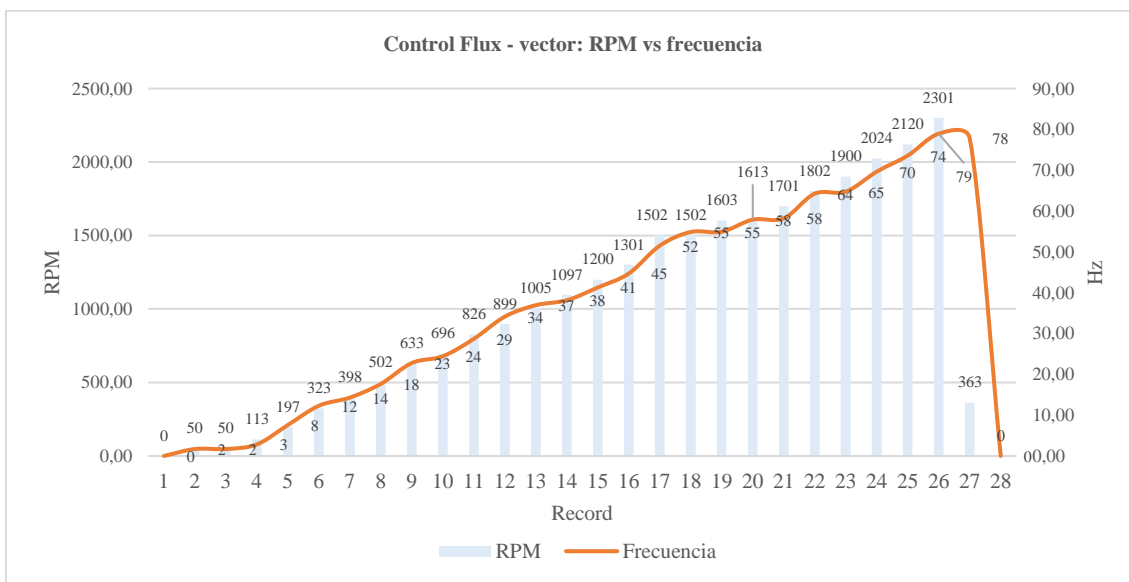


Figura 23. RPM y frecuencia

5.2. Control flux vector del sistema con carga

5.2.1. Control flux vector del sistema de 0 a 2300 rpm

El comportamiento del sistema de control Flux-Vector ante la aplicación de una carga mecánica variable, introducida mediante un mecanismo de frenado manual acoplado a un disco a diferencia de las condiciones de operación sin carga, el desempeño dinámico del motor incluye ahora la respuesta ante perturbaciones de torque, el motor continúa respondiendo al Setpoint de velocidad, la curva azul correspondiente a las RPM reales evidencia oscilaciones con respecto a las pruebas en vacío las fluctuaciones son consecuencia directa de la carga introducida en distintos niveles del Setpoint aunque el sistema de control logra compensar dichas variaciones, restableciendo la velocidad de referencia o manteniéndose dentro de un margen aceptable, la presencia de estas oscilaciones validan el desempeño del algoritmo de control Flux-Vector frente a variaciones de carga.

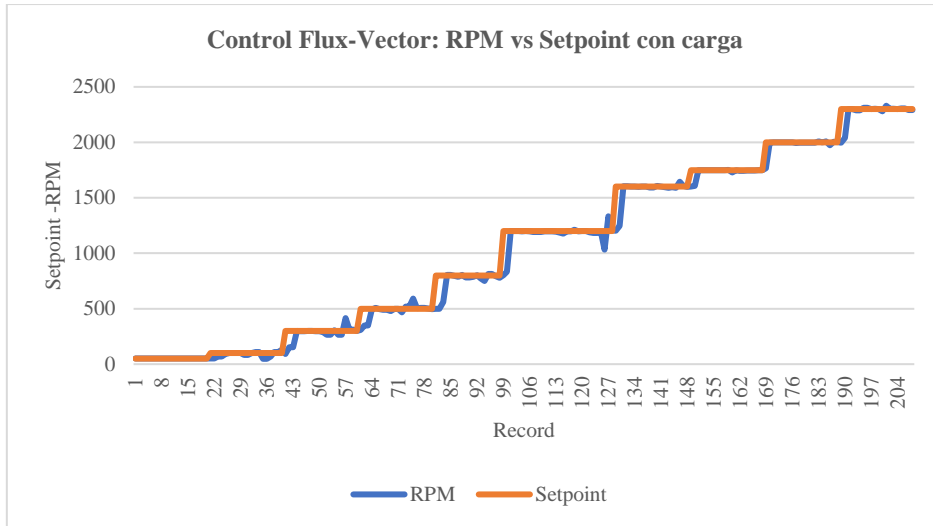


Figura 24. Control Setpoint y rpm con carga

La Figura permite analizar el comportamiento del sistema de control Flux-Vector ante la presencia de una carga mecánica variable el estudio se concentra en valores de referencia como 100, 300, 500 y 800 RPM, con el objetivo de identificar las perturbaciones introducidas por la carga y su impacto sobre la respuesta dinámica del motor al aumentar el Setpoint desde la interfaz HMI se evidencia una separación inicial entre la velocidad de referencia y la velocidad real.

5.2.2. Análisis de la frecuencia

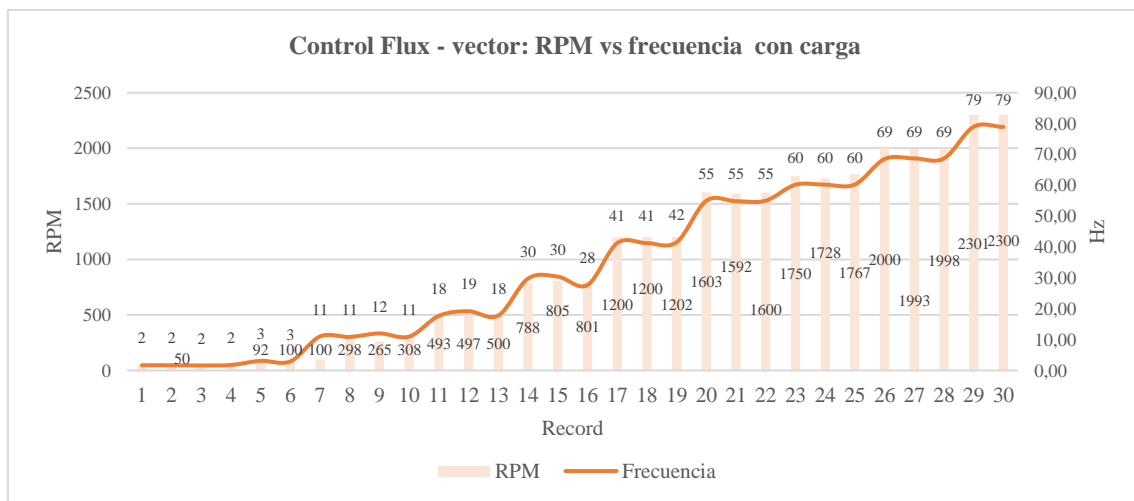


Figura 25. RPM vs frecuencia con carga

La figura muestra la relación directa entre las RPM del motor y la frecuencia de alimentación bajo carga a medida que la frecuencia aumenta, las RPM se eleva que valida el principio de control de velocidad del sistema Flux-Vector, este comportamiento refleja la capacidad del sistema para ajustar la frecuencia según la referencia establecida.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

Anexo B Datos obtenidos desde el PLC sin carga.

Hora	RPM	Set point	Frecuencia	Voltaje	Corriente	Torque
12:32:01	0,00	0,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:32:02	0,00	0,00	0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:03	0,00	0,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:03	0,00	0,00	0,03	21,00	0,68	0,00
12:32:04	0,00	0,00	0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:05	0,00	0,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:32:06	0,00	0,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:06	0,00	0,00	0,03	21,00	0,68	0,00
12:32:07	0,00	0,00	-0,02	21,00	0,68	0,00
12:32:08	0,00	0,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:09	0,00	0,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:10	0,00	0,00	0,01	21,00	0,68	0,00
12:32:10	0,00	0,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:33:01	50,00	50,00	1,71	22,00	0,68	0,00
12:33:02	50,00	50,00	1,67	22,00	0,68	0,00
12:33:03	50,00	50,00	1,68	22,00	0,68	0,00
12:33:04	50,00	50,00	1,66	22,00	0,68	0,00
12:33:05	50,00	50,00	1,72	22,00	0,68	0,00
12:33:05	50,00	50,00	1,66	22,00	0,68	0,00
12:33:06	50,00	50,00	1,68	22,00	0,68	0,00
12:33:07	50,00	50,00	1,62	22,00	0,68	0,00
12:33:08	50,00	50,00	1,62	22,00	0,68	0,00
12:33:09	50,00	50,00	1,64	22,00	0,68	0,00
12:33:10	50,00	50,00	1,66	22,00	0,68	0,00
12:33:10	50,00	50,00	1,68	22,00	0,68	0,00
12:33:11	50,00	50,00	1,69	22,00	0,68	0,00
12:33:49	50,00	100,00	1,70	22,00	0,68	0,00
12:33:50	101,00	100,00	2,83	23,00	0,68	-0,05
12:33:51	100,00	100,00	2,83	23,00	0,68	-0,05
12:33:52	102,00	100,00	2,84	23,00	0,68	-0,06
12:33:53	104,00	100,00	2,87	24,00	0,68	-0,06
12:33:53	104,00	100,00	2,79	24,00	0,68	-0,06
12:33:54	105,00	100,00	2,81	23,00	0,68	-0,06
12:33:55	105,00	100,00	2,84	23,00	0,68	-0,06
12:33:56	105,00	100,00	2,72	23,00	0,68	-0,06
12:33:57	104,00	100,00	2,73	23,00	0,68	-0,06
12:33:58	104,00	100,00	2,83	24,00	0,68	-0,05
12:33:59	105,00	100,00	2,82	23,00	0,68	-0,06
12:33:59	106,00	100,00	2,84	24,00	0,68	-0,05
12:35:02	113,00	200,00	2,83	23,00	0,68	-0,06
12:35:03	177,00	200,00	7,25	27,00	0,50	0,05
12:35:04	203,00	200,00	7,47	26,00	0,49	0,06
12:35:05	202,00	200,00	7,55	26,00	0,48	0,06
12:35:05	198,00	200,00	7,23	26,00	0,48	0,06
12:35:06	201,00	200,00	7,74	26,00	0,48	0,06
12:35:07	201,00	200,00	7,36	27,00	0,48	0,06
12:35:08	202,00	200,00	7,62	26,00	0,48	0,07
12:35:09	198,00	200,00	7,41	26,00	0,48	0,05
12:35:10	202,00	200,00	7,38	26,00	0,48	0,07
12:35:10	201,00	200,00	7,50	26,00	0,48	0,07
12:35:11	199,00	200,00	7,47	26,00	0,48	0,07
12:35:12	199,00	200,00	7,62	27,00	0,48	0,07
12:36:02	197,00	300,00	7,59	26,00	0,48	0,07
12:36:02	217,00	300,00	9,36	34,00	0,48	0,08
12:36:03	297,00	300,00	10,86	35,00	0,48	0,08
12:36:04	297,00	300,00	10,88	34,00	0,48	0,08
12:36:05	299,00	300,00	10,96	34,00	0,48	0,08
12:36:06	299,00	300,00	11,02	34,00	0,48	0,08

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

12:36:07	299,00	300,00	11,12	33,00	0,48	0,08
12:36:08	299,00	300,00	10,90	34,00	0,48	0,08
12:36:09	298,00	300,00	10,82	34,00	0,48	0,08
12:36:09	298,00	300,00	10,94	34,00	0,48	0,08
12:36:10	300,00	300,00	11,12	34,00	0,48	0,08
12:36:11	302,00	300,00	11,30	34,00	0,48	0,08
12:36:12	305,00	300,00	11,08	35,00	0,48	0,07
12:37:02	323,00	400,00	12,31	38,00	0,48	0,08
12:37:03	402,00	400,00	14,21	42,00	0,47	0,08
12:37:04	400,00	400,00	14,33	41,00	0,47	0,09
12:37:05	400,00	400,00	14,39	41,00	0,47	0,08
12:37:06	396,00	400,00	14,32	42,00	0,47	0,08
12:37:07	399,00	400,00	14,29	41,00	0,47	0,08
12:37:08	402,00	400,00	14,40	41,00	0,47	0,08
12:37:09	398,00	400,00	14,47	41,00	0,47	0,08
12:37:09	398,00	400,00	14,37	41,00	0,47	0,08
12:37:10	398,00	400,00	14,50	41,00	0,47	0,09
12:37:11	396,00	400,00	14,23	41,00	0,47	0,07
12:37:12	397,00	400,00	14,37	41,00	0,47	0,08
12:37:13	399,00	400,00	14,27	41,00	0,47	0,08
12:38:03	398,00	500,00	14,31	41,00	0,47	0,07
12:38:04	497,00	500,00	17,76	48,00	0,45	0,08
12:38:05	498,00	500,00	17,99	48,00	0,45	0,08
12:38:06	499,00	500,00	17,72	48,00	0,45	0,08
12:38:07	502,00	500,00	17,56	48,00	0,45	0,08
12:38:08	496,00	500,00	18,05	48,00	0,45	0,08
12:38:09	502,00	500,00	17,79	48,00	0,45	0,08
12:38:10	500,00	500,00	17,61	48,00	0,45	0,08
12:38:11	495,00	500,00	17,85	47,00	0,45	0,09
12:38:12	501,00	500,00	17,89	48,00	0,45	0,08
12:38:12	501,00	500,00	17,96	47,00	0,45	0,08
12:38:13	502,00	500,00	17,79	48,00	0,45	0,09
12:38:14	502,00	500,00	17,86	48,00	0,45	0,09
12:39:02	502,00	600,00	17,67	48,00	0,45	0,08
12:39:03	597,00	600,00	21,38	54,00	0,44	0,10
12:39:04	603,00	600,00	21,22	54,00	0,44	0,10
12:39:05	602,00	600,00	21,16	55,00	0,44	0,10
12:39:06	602,00	600,00	21,18	55,00	0,44	0,10
12:39:07	598,00	600,00	21,28	54,00	0,44	0,09
12:39:08	596,00	600,00	21,20	54,00	0,44	0,09
12:39:09	597,00	600,00	21,29	54,00	0,44	0,09
12:39:09	603,00	600,00	21,22	54,00	0,44	0,09
12:39:10	601,00	600,00	21,03	54,00	0,44	0,09
12:39:11	601,00	600,00	21,05	54,00	0,44	0,09
12:39:12	602,00	600,00	21,23	54,00	0,44	0,09
12:39:13	598,00	600,00	21,07	54,00	0,44	0,09
12:40:04	633,00	700,00	22,78	54,00	0,44	0,09
12:40:05	704,00	700,00	24,39	62,00	0,44	0,10
12:40:06	701,00	700,00	24,58	62,00	0,44	0,09
12:40:07	698,00	700,00	24,38	62,00	0,44	0,09
12:40:07	698,00	700,00	24,58	62,00	0,44	0,09
12:40:08	702,00	700,00	24,48	62,00	0,44	0,09
12:40:09	703,00	700,00	24,44	62,00	0,44	0,09
12:40:10	703,00	700,00	24,48	62,00	0,44	0,09
12:40:11	699,00	700,00	24,35	61,00	0,43	0,09
12:40:12	704,00	700,00	24,55	62,00	0,44	0,09
12:40:13	697,00	700,00	24,39	62,00	0,44	0,09
12:40:14	699,00	700,00	24,59	62,00	0,44	0,09
12:40:15	697,00	700,00	24,44	61,00	0,43	0,09
12:41:02	696,00	800,00	24,44	62,00	0,44	0,09
12:41:03	795,00	800,00	26,07	69,00	0,45	0,10
12:41:04	800,00	800,00	27,83	70,00	0,44	0,10

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

12:41:05	800,00	800,00	27,81	69,00	0,44	0,09
12:41:06	797,00	800,00	27,80	70,00	0,44	0,10
12:41:07	802,00	800,00	27,90	70,00	0,44	0,09
12:41:08	799,00	800,00	27,92	70,00	0,44	0,10
12:41:09	799,00	800,00	27,95	70,00	0,44	0,10
12:41:09	799,00	800,00	27,89	70,00	0,44	0,10
12:41:10	798,00	800,00	28,00	70,00	0,44	0,10
12:41:11	803,00	800,00	28,01	70,00	0,44	0,10
12:41:12	803,00	800,00	27,88	70,00	0,44	0,10
12:41:13	798,00	800,00	28,05	70,00	0,44	0,10
12:42:14	826,00	900,00	28,69	73,00	0,46	0,13
12:42:15	899,00	900,00	31,88	80,00	0,46	0,14
12:42:15	898,00	900,00	32,58	82,00	0,46	0,14
12:42:16	902,00	900,00	32,13	81,00	0,46	0,14
12:42:17	903,00	900,00	31,07	79,00	0,46	0,14
12:42:18	901,00	900,00	31,35	78,00	0,46	0,12
12:42:19	899,00	900,00	32,33	80,00	0,46	0,15
12:42:20	900,00	900,00	31,80	82,00	0,46	0,15
12:42:21	899,00	900,00	30,93	81,00	0,46	0,14
12:42:22	899,00	900,00	30,97	81,00	0,46	0,14
12:42:23	897,00	900,00	31,63	80,00	0,46	0,13
12:42:24	903,00	900,00	32,55	81,00	0,46	0,12
12:42:25	901,00	900,00	32,00	81,00	0,47	0,13
12:43:05	899,00	1000,00	34,14	77,00	0,44	0,10
12:43:06	1001,00	1000,00	34,44	86,00	0,44	0,11
12:43:07	1003,00	1000,00	34,60	87,00	0,44	0,11
12:43:08	1000,00	1000,00	34,70	86,00	0,44	0,11
12:43:09	1001,00	1000,00	34,67	86,00	0,44	0,11
12:43:10	996,00	1000,00	34,81	86,00	0,44	0,11
12:43:11	1002,00	1000,00	34,78	85,00	0,45	0,11
12:43:12	999,00	1000,00	35,07	86,00	0,44	0,11
12:43:13	1003,00	1000,00	34,45	86,00	0,44	0,11
12:43:14	1002,00	1000,00	34,72	86,00	0,44	0,11
12:43:15	998,00	1000,00	34,71	86,00	0,44	0,10
12:43:16	1002,00	1000,00	34,58	86,00	0,45	0,11
12:43:17	1001,00	1000,00	34,81	86,00	0,44	0,11
12:44:06	1005,00	1100,00	36,94	93,00	0,45	0,11
12:44:07	1099,00	1100,00	38,23	94,00	0,45	0,11
12:44:08	1099,00	1100,00	38,23	94,00	0,45	0,11
12:44:09	1097,00	1100,00	38,15	95,00	0,45	0,12
12:44:10	1097,00	1100,00	37,85	94,00	0,44	0,11
12:44:11	1095,00	1100,00	37,89	94,00	0,45	0,11
12:44:12	1096,00	1100,00	37,93	94,00	0,45	0,11
12:44:13	1093,00	1100,00	38,00	94,00	0,45	0,11
12:44:14	1100,00	1100,00	38,00	94,00	0,45	0,12
12:44:15	1097,00	1100,00	38,22	94,00	0,45	0,12
12:44:16	1099,00	1100,00	38,04	94,00	0,45	0,12
12:44:17	1101,00	1100,00	38,17	94,00	0,45	0,12
12:44:18	1100,00	1100,00	38,18	94,00	0,45	0,13
12:45:04	1097,00	1200,00	38,15	94,00	0,44	0,11
12:45:05	1113,00	1200,00	41,20	102,00	0,45	0,11
12:45:06	1199,00	1200,00	41,37	101,00	0,45	0,11
12:45:07	1201,00	1200,00	41,55	102,00	0,45	0,11
12:45:08	1202,00	1200,00	41,48	102,00	0,45	0,11
12:45:09	1200,00	1200,00	41,47	101,00	0,44	0,11
12:45:10	1201,00	1200,00	41,35	102,00	0,44	0,11
12:45:11	1201,00	1200,00	41,54	102,00	0,44	0,11
12:45:12	1198,00	1200,00	41,33	101,00	0,45	0,11
12:45:13	1202,00	1200,00	41,58	102,00	0,44	0,11
12:45:14	1199,00	1200,00	41,39	102,00	0,44	0,11
12:45:15	1198,00	1200,00	41,41	102,00	0,45	0,11
12:45:16	1201,00	1200,00	41,51	102,00	0,45	0,11

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

12:46:03	1200,00	1300,00	41,28	101,00	0,44	0,11
12:46:04	1301,00	1300,00	44,84	110,00	0,44	0,11
12:46:05	1300,00	1300,00	44,77	109,00	0,44	0,11
12:46:06	1300,00	1300,00	44,76	110,00	0,44	0,11
12:46:07	1301,00	1300,00	44,86	109,00	0,44	0,11
12:46:08	1300,00	1300,00	44,72	110,00	0,45	0,11
12:46:09	1298,00	1300,00	44,74	109,00	0,44	0,11
12:46:10	1303,00	1300,00	44,82	109,00	0,44	0,11
12:46:11	1299,00	1300,00	44,68	109,00	0,44	0,11
12:46:12	1299,00	1300,00	44,84	109,00	0,44	0,11
12:46:13	1301,00	1300,00	44,71	109,00	0,45	0,11
12:46:14	1300,00	1300,00	44,74	109,00	0,44	0,11
12:46:15	1300,00	1300,00	44,83	109,00	0,44	0,11
12:47:03	1301,00	1400,00	44,70	110,00	0,45	0,12
12:47:04	1401,00	1400,00	48,31	118,00	0,45	0,12
12:47:05	1401,00	1400,00	48,33	118,00	0,45	0,13
12:47:06	1399,00	1400,00	48,31	118,00	0,45	0,12
12:47:07	1399,00	1400,00	48,27	118,00	0,45	0,13
12:47:08	1398,00	1400,00	48,44	118,00	0,45	0,13
12:47:09	1398,00	1400,00	48,40	118,00	0,45	0,13
12:47:10	1398,00	1400,00	48,46	118,00	0,45	0,13
12:47:12	1398,00	1400,00	48,44	118,00	0,45	0,13
12:47:13	1399,00	1400,00	48,42	118,00	0,45	0,13
12:47:14	1399,00	1400,00	48,36	118,00	0,45	0,13
12:47:15	1399,00	1400,00	48,37	119,00	0,45	0,13
12:47:16	1397,00	1400,00	48,33	119,00	0,45	0,13
12:48:16	1502,00	1500,00	51,53	125,00	0,44	0,12
12:48:17	1499,00	1500,00	51,60	125,00	0,45	0,12
12:48:18	1500,00	1500,00	51,63	125,00	0,45	0,12
12:48:19	1500,00	1500,00	51,56	125,00	0,45	0,12
12:48:20	1501,00	1500,00	51,61	125,00	0,45	0,12
12:48:21	1499,00	1500,00	51,63	125,00	0,45	0,13
12:48:22	1500,00	1500,00	51,66	125,00	0,45	0,12
12:48:23	1498,00	1500,00	51,53	125,00	0,45	0,12
12:48:24	1499,00	1500,00	51,62	125,00	0,45	0,13
12:48:25	1501,00	1500,00	51,62	125,00	0,45	0,13
12:48:26	1499,00	1500,00	51,63	125,00	0,45	0,13
12:48:27	1503,00	1500,00	51,53	125,00	0,45	0,12
12:48:29	1501,00	1500,00	51,75	125,00	0,45	0,13
12:49:12	1502,00	1600,00	54,87	133,00	0,44	0,11
12:49:13	1600,00	1600,00	54,78	132,00	0,44	0,12
12:49:14	1600,00	1600,00	54,77	133,00	0,44	0,12
12:49:15	1600,00	1600,00	54,79	132,00	0,44	0,12
12:49:16	1602,00	1600,00	54,80	132,00	0,44	0,12
12:49:17	1601,00	1600,00	54,83	132,00	0,45	0,12
12:49:18	1599,00	1600,00	54,72	132,00	0,44	0,12
12:49:20	1602,00	1600,00	54,84	132,00	0,44	0,12
12:49:21	1601,00	1600,00	54,88	132,00	0,44	0,12
12:49:22	1598,00	1600,00	54,79	132,00	0,44	0,11
12:49:23	1601,00	1600,00	54,73	132,00	0,44	0,12
12:49:24	1601,00	1600,00	54,78	132,00	0,44	0,12
12:49:25	1600,00	1600,00	54,80	132,00	0,44	0,12
12:50:05	1603,00	1610,00	54,94	133,00	0,44	0,11
12:50:06	1611,00	1610,00	55,11	133,00	0,44	0,11
12:50:07	1610,00	1610,00	55,06	133,00	0,44	0,11
12:50:09	1610,00	1610,00	55,08	133,00	0,44	0,11
12:50:10	1612,00	1610,00	55,14	133,00	0,44	0,11
12:50:11	1610,00	1610,00	55,12	133,00	0,44	0,11
12:50:12	1611,00	1610,00	55,09	133,00	0,44	0,11
12:50:13	1609,00	1610,00	55,13	133,00	0,44	0,11
12:50:14	1609,00	1610,00	55,01	133,00	0,44	0,11
12:50:15	1609,00	1610,00	55,10	133,00	0,44	0,11

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

12:50:16	1610,00	1610,00	55,02	133,00	0,44	0,11
12:50:17	1609,00	1610,00	55,10	133,00	0,44	0,11
12:50:18	1609,00	1610,00	55,15	133,00	0,44	0,11
12:53:03	1613,00	1700,00	57,91	140,00	0,44	0,11
12:53:04	1702,00	1700,00	58,15	140,00	0,44	0,11
12:53:05	1699,00	1700,00	58,06	140,00	0,44	0,11
12:53:06	1699,00	1700,00	58,05	140,00	0,44	0,11
12:53:08	1700,00	1700,00	58,11	140,00	0,44	0,11
12:53:09	1700,00	1700,00	58,07	140,00	0,44	0,11
12:53:10	1702,00	1700,00	58,09	140,00	0,44	0,11
12:53:11	1701,00	1700,00	58,07	140,00	0,44	0,11
12:53:12	1699,00	1700,00	58,05	140,00	0,44	0,11
12:53:13	1700,00	1700,00	58,07	140,00	0,44	0,11
12:53:14	1699,00	1700,00	58,06	140,00	0,44	0,11
12:53:16	1701,00	1700,00	57,97	140,00	0,44	0,11
12:53:17	1703,00	1700,00	58,07	140,00	0,44	0,11
12:54:04	1701,00	1800,00	58,21	140,00	0,44	0,12
12:54:05	1801,00	1800,00	61,46	148,00	0,44	0,12
12:54:06	1799,00	1800,00	61,58	148,00	0,44	0,12
12:54:07	1800,00	1800,00	61,50	148,00	0,44	0,12
12:54:08	1799,00	1800,00	61,51	148,00	0,44	0,12
12:54:09	1800,00	1800,00	61,48	148,00	0,44	0,12
12:54:10	1799,00	1800,00	61,60	148,00	0,44	0,12
12:54:12	1801,00	1800,00	61,57	148,00	0,45	0,12
12:54:13	1799,00	1800,00	61,50	148,00	0,45	0,12
12:54:14	1802,00	1800,00	61,56	148,00	0,44	0,12
12:54:15	1799,00	1800,00	61,53	148,00	0,44	0,12
12:54:16	1802,00	1800,00	61,52	148,00	0,44	0,12
12:54:17	1800,00	1800,00	61,54	148,00	0,45	0,12
12:55:06	1802,00	1900,00	64,27	156,00	0,44	0,12
12:55:07	1899,00	1900,00	64,85	156,00	0,44	0,12
12:55:09	1899,00	1900,00	64,86	156,00	0,44	0,12
12:55:10	1900,00	1900,00	64,81	156,00	0,44	0,11
12:55:11	1901,00	1900,00	64,85	156,00	0,44	0,12
12:55:12	1900,00	1900,00	64,72	156,00	0,44	0,11
12:55:13	1900,00	1900,00	64,80	156,00	0,44	0,11
12:55:14	1901,00	1900,00	64,79	156,00	0,44	0,11
12:55:16	1901,00	1900,00	64,82	156,00	0,44	0,12
12:55:17	1900,00	1900,00	64,85	156,00	0,44	0,12
12:55:18	1900,00	1900,00	64,78	156,00	0,44	0,11
12:55:19	1901,00	1900,00	64,83	156,00	0,44	0,11
12:55:20	1900,00	1900,00	64,77	156,00	0,44	0,11
12:55:37	1900,00	2000,00	64,76	155,00	0,44	0,11
12:55:38	2000,00	2000,00	68,10	163,00	0,44	0,11
12:55:39	1999,00	2000,00	68,15	164,00	0,44	0,12
12:55:40	2000,00	2000,00	68,15	163,00	0,44	0,11
12:55:42	1999,00	2000,00	68,12	163,00	0,44	0,11
12:55:43	2000,00	2000,00	68,12	164,00	0,44	0,11
12:55:44	1999,00	2000,00	68,10	164,00	0,44	0,11
12:55:45	2000,00	2000,00	68,15	163,00	0,44	0,11
12:55:46	2000,00	2000,00	68,08	164,00	0,44	0,12
12:55:48	2001,00	2000,00	68,17	164,00	0,44	0,11
12:55:49	1999,00	2000,00	68,19	164,00	0,44	0,11
12:55:50	2001,00	2000,00	68,13	164,00	0,44	0,12
12:55:51	2000,00	2000,00	68,19	164,00	0,44	0,12
12:56:02	2024,00	2100,00	69,66	164,00	0,44	0,11
12:56:03	2099,00	2100,00	71,57	172,00	0,44	0,12
12:56:04	2100,00	2100,00	71,46	172,00	0,44	0,11
12:56:06	2101,00	2100,00	71,52	172,00	0,44	0,12
12:56:07	2099,00	2100,00	71,52	172,00	0,44	0,12
12:56:08	2100,00	2100,00	71,51	172,00	0,44	0,12
12:56:09	2100,00	2100,00	71,50	172,00	0,45	0,12

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

12:56:10	2102,00	2100,00	71,55	172,00	0,45	0,12
12:56:12	2100,00	2100,00	71,56	172,00	0,44	0,12
12:56:13	2100,00	2100,00	71,53	172,00	0,44	0,12
12:56:14	2101,00	2100,00	71,53	172,00	0,44	0,12
12:56:15	2100,00	2100,00	71,50	172,00	0,44	0,12
12:56:16	2099,00	2100,00	71,55	172,00	0,44	0,12
12:56:32	2120,00	2200,00	73,59	178,00	0,44	0,12
12:56:34	2200,00	2200,00	74,78	180,00	0,44	0,12
12:56:35	2200,00	2200,00	74,79	179,00	0,44	0,12
12:56:36	2201,00	2200,00	74,78	179,00	0,44	0,12
12:56:37	2200,00	2200,00	74,80	180,00	0,45	0,12
12:56:38	2199,00	2200,00	74,86	180,00	0,45	0,12
12:56:40	2198,00	2200,00	74,98	180,00	0,45	0,13
12:56:41	2200,00	2200,00	75,00	181,00	0,45	0,13
12:56:42	2201,00	2200,00	74,91	181,00	0,45	0,13
12:56:43	2199,00	2200,00	74,92	181,00	0,45	0,13
12:56:45	2200,00	2200,00	74,97	181,00	0,45	0,14
12:56:46	2197,00	2200,00	75,13	181,00	0,45	0,15
12:56:47	2198,00	2200,00	75,19	182,00	0,46	0,15
12:57:02	2301,00	2300,00	78,94	186,00	0,46	0,17
12:57:03	2301,00	2300,00	78,94	186,00	0,46	0,17
12:57:04	2301,00	2300,00	78,91	185,00	0,46	0,17
12:57:05	2300,00	2300,00	78,92	186,00	0,45	0,16
12:57:07	2301,00	2300,00	78,90	186,00	0,45	0,16
12:57:08	2300,00	2300,00	78,84	186,00	0,45	0,16
12:57:09	2299,00	2300,00	79,00	186,00	0,46	0,18
12:57:10	2299,00	2300,00	79,17	186,00	0,46	0,18
12:57:12	2300,00	2300,00	79,16	186,00	0,46	0,18
12:57:13	2299,00	2300,00	79,16	186,00	0,47	0,19
12:57:14	2300,00	2300,00	79,16	186,00	0,46	0,19
12:57:15	2298,00	2300,00	79,17	186,00	0,47	0,19
12:57:16	2300,00	2300,00	79,16	186,00	0,46	0,18
12:57:14	363,00	2400,00	77,79	93,00	0,44	0,00
12:57:15	0,00	2400,00	0,02	21,00	0,68	0,00
12:57:16	0,00	2400,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:57:18	0,00	2400,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:57:19	0,00	2400,00	-0,02	21,00	0,68	0,00
12:57:20	0,00	2400,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:57:21	0,00	2400,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:57:22	0,00	2400,00	0,00	21,00	0,68	0,00
12:57:24	0,00	2400,00	-0,02	21,00	0,68	0,00
12:57:25	0,00	2400,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:57:26	0,00	2400,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:57:27	0,00	2400,00	-0,01	21,00	0,68	0,00
12:57:28	0,00	2400,00	0,00	21,00	0,68	0,00

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD
Anexo C. Datos obtenidos desde el PLC con carga

Time	Hora	RPM	Setpoint	Frecuencia	Voltaje	Corriente	Torque
18/7/2025	13:12:14	50	50	1,70	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:14	50	50	1,70	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:14	50	50	1,62	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:15	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:15	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:15	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:15	50	50	1,63	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:16	50	50	1,54	23	0,68	0
18/7/2025	13:12:16	50	50	1,54	23	0,68	0
18/7/2025	13:12:16	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:16	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:17	50	50	1,68	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:17	50	50	1,68	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:17	50	50	1,60	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:17	50	50	1,60	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:18	50	50	1,71	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:18	50	50	1,71	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:18	50	50	1,71	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:18	50	50	1,66	22	0,68	0
18/7/2025	13:12:19	50	50	1,68	22	0,68	0
18/7/2025	13:13:03	50	100	1,78	23	0,68	0
18/7/2025	13:13:03	50	100	1,60	23	0,68	0
18/7/2025	13:13:03	68	100	2,87	23	0,68	0
18/7/2025	13:13:03	68	100	2,87	24	0,68	-0,05
18/7/2025	13:13:04	92	100	3,12	25	0,68	-0,02
18/7/2025	13:13:04	100	100	2,94	25	0,68	-0,02
18/7/2025	13:13:04	100	100	2,94	25	0,68	-0,04
18/7/2025	13:13:17	100	100	3,76	26	0,68	0,05
18/7/2025	13:13:17	100	100	3,76	27	0,68	0,03
18/7/2025	13:13:18	84	100	4,50	30	0,68	0,03
18/7/2025	13:13:18	84	100	4,50	30	0,68	0,08
18/7/2025	13:13:18	101	100	3,74	26	0,68	0,05
18/7/2025	13:13:19	109	100	3,74	26	0,68	0,05
18/7/2025	13:13:19	109	100	4,39	25	0,59	0,19
18/7/2025	13:13:19	48	100	6,82	31	0,61	0,19
18/7/2025	13:13:20	48	100	6,82	31	0,61	0,22
18/7/2025	13:13:20	70	100	5,48	30	0,59	0,26
18/7/2025	13:13:20	110	100	5,48	30	0,59	0,26
18/7/2025	13:13:20	110	100	5,27	28	0,55	0,28
18/7/2025	13:13:21	130	100	5,85	28	0,55	0,28
18/7/2025	13:14:01	91	300	4,08	20	0,48	0,05
18/7/2025	13:14:01	153	300	9,12	20	0,48	0,06
18/7/2025	13:14:02	153	300	9,12	33	0,48	0,07
18/7/2025	13:14:02	301	300	11,03	33	0,48	0,07
18/7/2025	13:14:02	298	300	10,87	35	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:03	298	300	10,87	35	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:03	300	300	11,08	35	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:03	300	300	11,08	35	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:17	298	300	11,23	33	0,49	0,07
18/7/2025	13:14:17	298	300	11,23	33	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:18	288	300	10,74	35	0,48	0,08
18/7/2025	13:14:18	265	300	12,01	40	0,49	0,13
18/7/2025	13:14:18	265	300	12,01	40	0,52	0,28
18/7/2025	13:14:19	304	300	16,20	57	0,52	0,28
18/7/2025	13:14:19	264	300	15,76	57	0,77	0,65
18/7/2025	13:14:19	264	300	15,76	53	0,69	0,25
18/7/2025	13:14:20	416	300	14,79	53	0,69	0,25
18/7/2025	13:14:20	311	300	14,79	36	0,52	0,08

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

18/7/2025	13:14:20	311	300	10,84	35	0,49	0,06
18/7/2025	13:14:21	300	300	10,84	35	0,49	0,06
18/7/2025	13:15:01	308	500	10,99	35	0,48	0,07
18/7/2025	13:15:01	350	500	17,50	48	0,48	0,07
18/7/2025	13:15:01	350	500	17,50	48	0,46	0,09
18/7/2025	13:15:02	493	500	17,71	48	0,45	0,09
18/7/2025	13:15:02	507	500	17,52	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:07	497	500	19,19	55	0,5	0,18
18/7/2025	13:15:07	489	500	18,68	57	0,5	0,21
18/7/2025	13:15:08	489	500	18,68	57	0,52	0,26
18/7/2025	13:15:08	479	500	19,19	58	0,54	0,26
18/7/2025	13:15:08	498	500	20,04	58	0,54	0,28
18/7/2025	13:15:09	498	500	20,04	60	0,59	0,56
18/7/2025	13:15:09	466	500	24,08	70	0,59	0,56
18/7/2025	13:15:09	518	500	19,35	71	0,74	0,54
18/7/2025	13:15:10	518	500	19,35	71	0,89	0,3
18/7/2025	13:15:10	591	500	20,54	55	0,89	0,3
18/7/2025	13:15:10	504	500	17,98	48	0,57	0,09
18/7/2025	13:15:11	508	500	17,52	48	0,47	0,08
18/7/2025	13:15:11	508	500	17,52	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:11	503	500	17,60	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:12	497	500	17,77	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:48	500	800	17,81	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:48	500	800	17,82	48	0,45	0,08
18/7/2025	13:15:49	559	800	20,95	64	0,47	0,11
18/7/2025	13:16:21	805	800	28,64	74	0,47	0,18
18/7/2025	13:16:22	805	800	28,64	74	0,47	0,18
18/7/2025	13:16:22	796	800	29,11	76	0,49	0,21
18/7/2025	13:16:22	788	800	29,79	78	0,52	0,26
18/7/2025	13:16:23	805	800	30,41	84	0,56	0,32
18/7/2025	13:16:23	781	800	31,82	86	0,6	0,37
18/7/2025	13:16:24	781	800	31,82	86	0,6	0,37
18/7/2025	13:16:24	786	800	31,59	89	0,64	0,37
18/7/2025	13:16:24	802	800	32,48	96	0,7	0,51
18/7/2025	13:16:25	774	800	35,40	103	0,79	0,52
18/7/2025	13:16:25	750	800	35,63	103	0,79	0,52
18/7/2025	13:16:26	813	800	35,16	103	0,83	0,57
18/7/2025	13:16:26	813	800	35,16	104	0,84	0,52
18/7/2025	13:16:26	794	800	33,03	105	0,87	0,59
18/7/2025	13:16:27	779	800	32,40	99	0,78	0,41
18/7/2025	13:16:56	801	1200	27,68	70	0,43	0,08
18/7/2025	13:16:57	834	1200	36,70	90	0,48	0,09
18/7/2025	13:16:57	1201	1200	41,36	101	0,45	0,1
18/7/2025	13:16:58	1200	1200	41,27	101	0,45	0,11
18/7/2025	13:16:58	1200	1200	41,27	101	0,44	0,11
18/7/2025	13:17:03	1197	1200	41,61	103	0,44	0,12
18/7/2025	13:17:03	1199	1200	41,92	104	0,45	0,15
18/7/2025	13:17:04	1196	1200	42,07	105	0,46	0,16
18/7/2025	13:17:04	1192	1200	42,14	106	0,47	0,18
18/7/2025	13:17:05	1192	1200	42,53	108	0,48	0,2
18/7/2025	13:17:05	1192	1200	42,53	108	0,49	0,22
18/7/2025	13:17:06	1197	1200	42,73	109	0,52	0,24
18/7/2025	13:17:06	1198	1200	42,97	110	0,53	0,24
18/7/2025	13:17:06	1197	1200	43,22	110	0,53	0,26
18/7/2025	13:17:07	1195	1200	43,59	111	0,55	0,28
18/7/2025	13:17:09	1185	1200	45,25	119	0,67	0,44
18/7/2025	13:17:09	1177	1200	46,17	125	0,77	0,55
18/7/2025	13:17:10	1197	1200	48,80	133	0,88	0,64
18/7/2025	13:17:10	1197	1200	48,80	136	0,93	0,65
18/7/2025	13:17:11	1212	1200	47,22	134	0,88	0,58
18/7/2025	13:17:11	1198	1200	48,24	132	0,84	0,58
18/7/2025	13:17:11	1200	1200	46,21	132	0,84	0,55

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

18/7/2025	13:17:15	1201	1200	41,51	102	0,45	0,11
18/7/2025	13:17:15	1189	1200	41,46	102	0,44	0,12
18/7/2025	13:17:16	1184	1200	41,33	107	0,48	0,22
18/7/2025	13:17:16	1184	1200	42,65	111	0,52	0,27
18/7/2025	13:17:17	1185	1200	43,16	115	0,59	0,39
18/7/2025	13:17:17	1032	1200	46,19	130	0,81	0,39
18/7/2025	13:17:18	1332	1200	44,63	130	0,81	0,34
18/7/2025	13:17:18	1206	1200	44,63	102	0,5	0,1
18/7/2025	13:17:57	1202	1600	41,55	102	0,45	0,12
18/7/2025	13:17:57	1247	1600	44,11	116	0,45	0,12
18/7/2025	13:17:58	1603	1600	55,00	116	0,45	0,22
18/7/2025	13:17:58	1603	1600	55,00	134	0,45	0,13
18/7/2025	13:17:59	1601	1600	55,01	133	0,45	0,14
18/7/2025	13:17:59	1601	1600	55,04	134	0,45	0,14
18/7/2025	13:18:00	1598	1600	55,13	134	0,45	0,14
18/7/2025	13:18:30	1601	1600	54,84	132	0,44	0,11
18/7/2025	13:18:30	1600	1600	54,82	133	0,44	0,12
18/7/2025	13:18:31	1592	1600	54,84	134	0,44	0,12
18/7/2025	13:18:31	1592	1600	54,84	134	0,45	0,18
18/7/2025	13:18:32	1607	1600	55,67	136	0,47	0,16
18/7/2025	13:18:32	1600	1600	55,38	136	0,47	0,2
18/7/2025	13:18:33	1595	1600	55,70	138	0,48	0,24
18/7/2025	13:18:33	1589	1600	56,28	141	0,48	0,24
18/7/2025	13:18:34	1595	1600	56,89	143	0,57	0,34
18/7/2025	13:18:34	1590	1600	57,39	148	0,59	0,34
18/7/2025	13:18:34	1646	1600	58,65	148	0,59	0,3
18/7/2025	13:18:35	1607	1600	54,85	142	0,47	0,11
18/7/2025	13:18:35	1599	1600	54,74	132	0,44	0,11
18/7/2025	13:18:57	1600	1750	55,02	133	0,45	0,13
18/7/2025	13:18:58	1608	1750	58,37	140	0,45	0,13
18/7/2025	13:18:58	1750	1750	60,08	145	0,45	0,14
18/7/2025	13:18:59	1750	1750	60,08	145	0,45	0,14
18/7/2025	13:18:59	1750	1750	60,12	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:00	1750	1750	60,14	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:00	1750	1750	60,14	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:01	1750	1750	60,16	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:03	1750	1750	60,15	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:03	1750	1750	60,18	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:04	1751	1750	60,18	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:19:04	1728	1750	60,20	145	0,46	0,16
18/7/2025	13:19:04	1748	1750	60,20	150	0,49	0,21
18/7/2025	13:19:05	1744	1750	61,07	151	0,5	0,23
18/7/2025	13:19:05	1744	1750	61,21	153	0,52	0,26
18/7/2025	13:19:06	1745	1750	61,67	154	0,53	0,27
18/7/2025	13:19:06	1747	1750	61,98	156	0,54	0,29
18/7/2025	13:19:07	1747	1750	62,16	157	0,56	0,3
18/7/2025	13:19:07	1749	1750	62,25	157	0,57	0,31
18/7/2025	13:19:08	1748	1750	62,31	158	0,57	0,32
18/7/2025	13:20:59	1767	2000	60,24	146	0,45	0,14
18/7/2025	13:21:00	1998	2000	65,42	165	0,46	0,14
18/7/2025	13:21:00	1999	2000	68,31	165	0,45	0,14
18/7/2025	13:21:01	2000	2000	68,50	166	0,45	0,14
18/7/2025	13:21:01	2000	2000	68,47	166	0,46	0,14
18/7/2025	13:21:02	2000	2000	68,51	166	0,45	0,15
18/7/2025	13:21:02	2000	2000	68,51	166	0,45	0,14
18/7/2025	13:21:03	2000	2000	68,51	166	0,46	0,15
18/7/2025	13:21:04	1993	2000	68,72	166	0,46	0,16
18/7/2025	13:21:04	1996	2000	69,03	169	0,47	0,19
18/7/2025	13:21:05	1997	2000	69,20	170	0,49	0,21
18/7/2025	13:21:05	1997	2000	69,28	170	0,49	0,21
18/7/2025	13:21:28	1998	2000	68,92	166	0,46	0,15
18/7/2025	13:21:29	1998	2000	68,75	167	0,46	0,16

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

18/7/2025	13:21:29	2007	2000	69,12	169	0,47	0,18
18/7/2025	13:21:30	2001	2000	68,94	167	0,47	0,18
18/7/2025	13:21:30	2007	2000	69,12	168	0,47	0,16
18/7/2025	13:21:31	1975	2000	68,53	168	0,47	0,18
18/7/2025	13:21:31	2006	2000	68,28	166	0,46	0,16
18/7/2025	13:21:32	2002	2000	68,51	166	0,46	0,16
18/7/2025	13:21:33	1998	2300	68,70	166	0,45	0,14
18/7/2025	13:21:34	2041	2300	72,03	181	0,46	0,16
18/7/2025	13:21:35	2301	2300	78,98	183	0,46	0,17
18/7/2025	13:21:35	2300	2300	78,90	184	0,45	0,18
18/7/2025	13:21:36	2289	2300	78,93	187	0,47	0,2
18/7/2025	13:21:36	2289	2300	79,66	185	0,47	0,21
18/7/2025	13:21:37	2310	2300	79,51	186	0,48	0,2
18/7/2025	13:21:37	2312	2300	79,49	183	0,45	0,16
18/7/2025	13:21:38	2301	2300	79,02	183	0,45	0,15
18/7/2025	13:21:38	2302	2300	78,78	184	0,45	0,15
18/7/2025	13:21:39	2299	2300	78,78	184	0,46	0,19
18/7/2025	13:21:39	2279	2300	79,99	184	0,48	0,22
18/7/2025	13:21:40	2330	2300	79,34	185	0,46	0,17
18/7/2025	13:21:40	2302	2300	78,85	182	0,45	0,15
18/7/2025	13:21:41	2302	2300	78,85	183	0,45	0,16
18/7/2025	13:21:50	2301	2300	78,70	183	0,44	0,13
18/7/2025	13:21:51	2305	2300	78,49	183	0,44	0,14
18/7/2025	13:21:51	2307	2300	78,46	183	0,44	0,14
18/7/2025	13:21:52	2292	2300	78,64	184	0,45	0,19
18/7/2025	13:21:52	2292	2300	79,43	182	0,46	0,19



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA



CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MANUAL DE USUARIO



AUTORES:

Changoluisa Choloquina José David

Caiza Guallasamín Bryan David

TUTOR:

Ing. Marco Aníbal León Segovia Ms.C

LATACUNGA, ABRIL 2025

LABORATORIO DE AUTÓMATAS - CARRERA DE ELECTRICIDAD

Carrera	Código de la asignatura	Nombre de la asignatura
Electricidad		Automatización Industrial / Sistemas de Control Industrial:

Práctica N°	Laboratorio:	Laboratorio de PLC	Duración (horas)
01	Nombre de la práctica:	Análisis dinámico del motor AC mediante control Flux – Vector (Sin carga)	6

Versión	Fecha	Elaborado por:	Elaborado por:	Revisado por:
1.0	Julio 2025			
		Caiza Guallasamin Bryan David	Changoluisa Choloquina Jose David	MSc. Ing. Leon Marco Anibal

Aprobado por:	Aprobado por:	Aprobado por:
MSc. Ing. Corrales Byron	MSc. Ing. Jiménez Diego	MSc. Ing. Leon Segovia Manuel

1	Objetivo de la práctica
	Implementar un sistema de control vectorial Flux-Vector en una máquina rotativa de CA, para analizar su comportamiento dinámico y su estabilidad. El sistema será controlado por un PLC y utilizará un variador de frecuencia con la retroalimentación de un encoder.

2	Introducción
	<p>El proyecto implementa un sistema de control Flux-Vector para regular la velocidad de un motor trifásico de CA utilizando un PLC Siemens S7-1200 como control principal, conectado a un variador de frecuencia mediante protocolo MODBUS para el manejo del accionamiento del motor, la pantalla HMI se comunica con el PLC para la visualización en tiempo real de parámetros como velocidad, torque, corriente y voltaje mientras que el módulo CM 1241 (RS485) gestiona la comunicación con los dispositivos externos para la conexión entre equipos se emplea un switch industrial con cableado CAT6 para la integración de señales con un encoder que proporciona realimentación de velocidad mediante señales, la configuración y programación se realiza en TIA Portal V 16 por medio del diagrama bloques para la lógica de control, el software facilita la programación, el monitoreo en tiempo real y la ejecución de pruebas con la finalidad de guiar al operador del control donde los resultados obtenidos se tomen como referencia aplicaciones industriales que requieran un manejo de motores de corriente alterna que demuestre la viabilidad del proyecto [1].</p>

PLC S7-1200

El autómata programable Siemens S7-1200 AC/DC/RLY seleccionado para implementar el control flux-vector, es alimentada por corriente alterna de 120 V – 230 V con entradas digitales 24 V en corriente directa y salidas a relé 10 A, la programación del CPU se realiza mediante TIA Portal con el lenguaje Ladder y bloques funcionales (FBs), con capacidad de comunicación Profinet para sincronización en tiempo real con variadores de frecuencia [2].



Figura 1. PLC S7-1200

Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

El variador SINAMICS CU240E-2 PN forma parte de la familia SINAMICS G120 de Siemens, diseñado para aplicaciones que requieren control vectorial de flujo (Flux-Vector Control) en motores de inducción o motores síncronos, en el presente proyecto cumple la función de permitir el ajuste dinámico y la velocidad del motor que gestiona los parámetros eléctricos en tiempo real [3].



Figura 2. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

3 Equipos, instrumentos y materiales

Equipos

- PLC: Siemens S7-1200 (modelo CPU 1214C)
- Interfaz HMI: Pantalla táctil KTP700 Basic de Siemens
- Módulo de comunicación: CM 1241 (RS485) para protocolo Modbus RTU
- Encoder: Incremental de 2500 pulsos por revolución (PPR)

Materiales

- Conductor: THHN calibre N12 – N16 para alimentación
- Switch: Conmutador Ethernet industrial para red PROFINET
- Cable UTP cat 6

Software

- Plataforma TIA Portal V17 (programación de PLC y HMI)

Instrumentos de Medición

- Multímetro digital (para verificación de voltajes y continuidad)

4 Medidas de seguridad

Durante todas las fases de interacción con el sistema (montaje, operación, mantenimiento y pruebas), es imperativo adherirse estrictamente a las siguientes normas de seguridad para prevenir accidentes y garantizar la integridad del personal y del equipo:

1. Prohibiciones y Advertencias:

Riesgo Eléctrico:

- **Prohibido:** El ingreso de alimentos o bebidas en las proximidades del tablero eléctrico.
- **Advertencia:** No manipular ni introducir las manos en los bornes energizados del sistema. Existe riesgo de descarga eléctrica severa.

Riesgo Mecánico:

- **Advertencia:** Mantenerse alejado de cualquier componente rotativo o en movimiento de la máquina. Nunca introducir las manos u otras partes del cuerpo en la máquina cuando esté en funcionamiento o si hay riesgo de arranque inesperado.
- **Advertencia Disco Giratorio:** Dada la presencia de un disco giratorio diseñado para simular carga mecánica sobre el motor, se deben extremar las precauciones. Este componente puede generar riesgos físicos significativos si se manipula o se acerca sin las debidas medidas de seguridad.

2. Elementos Personales:

- Prohibido el uso de pulseras, collares, anillos o cualquier otro elemento metálico suelto que pueda causar un cortocircuito o atrapamiento.
- Mantener el cabello largo completamente recogido y asegurado para evitar enganches con partes móviles.

3. Equipo de Protección Personal (EPP) Obligatorio:

Siempre utilizar el equipo de protección personal (EPP) adecuado y en buen estado antes de iniciar cualquier tarea:

- **Guantes Dieléctricos:** Para protección contra riesgos eléctricos.
- **Gafas de Seguridad:** Para proteger los ojos de partículas, chispas o salpicaduras.
- **Calzado Aislante / de Seguridad:** Con suela antideslizante y propiedades aislantes.

5 Trabajo preparatorio

1. Motor Asíncrono

¿Cuál es la característica principal de un motor asíncrono (o de inducción)?

- Su rotor gira exactamente a la misma velocidad que el campo magnético del estator.
- Requiere escobillas y colector para su funcionamiento.
- La velocidad de su rotor es ligeramente inferior a la velocidad del campo magnético del estator.
- Solo funciona con corriente continua (DC).

2. Control Flux Vector

¿Qué ventaja fundamental ofrece el control Flux Vector sobre un motor asíncrono en comparación con un control escalar (V/F) simple?

- Reduce drásticamente el consumo de energía en todas las aplicaciones.
- Permite un control preciso del par y la velocidad, similar al de un motor DC.
- Elimina la necesidad de un variador de frecuencia.
- Solo se utiliza para motores de muy baja potencia.

3. Variador Siemens SINAMICS CU240E-2

En un variador Siemens SINAMICS G120, la Control Unit CU240E-2 es el "cerebro" del sistema. ¿Cuál de las siguientes es su función principal?

- Suministrar directamente la potencia eléctrica al motor.
- Contener los algoritmos de control del motor y las interfaces de comunicación.
- Actuar como un simple fusible de protección.
- Generar la energía necesaria para todo el sistema de automatización.

4. Switch Industrial

¿Cuál es la razón principal para utilizar un switch industrial en lugar de un switch comercial en un entorno de automatización?

- Los switches industriales son más económicos.
- Los switches industriales pueden transmitir datos más rápido que los comerciales.
- Están diseñados para soportar condiciones ambientales severas (temperatura, vibraciones, ruido).
- Solo los switches industriales pueden conectarse a variadores de frecuencia.

5. Comunicación Modbus

Si una HMI necesita enviar un setpoint de frecuencia a un variador y leer la corriente del motor, ¿qué tipo de comunicación se describe en el contexto del protocolo Modbus?

- Modbus es un protocolo exclusivo para dispositivos inalámbricos.
- Modbus permite la comunicación entre dispositivos (maestro-esclavo) para intercambio de datos.
- Modbus solo se usa para programación de PLCs.
- Modbus es un tipo de cable de conexión física.

6. HMI KTP400

La HMI Siemens KTP400 es un Panel Básico. ¿Qué significa "HMI" en el contexto de un sistema de automatización?

- High Motor Input (Entrada de Alto Motor).
- Human Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina).
- Home Monitoring Integration (Integración de Monitoreo del Hogar).
- Hardware Main Indicator (Indicador Principal de Hardware).

7. Realizar un diagrama de conexión detallado que ilustre la interconexión de estos componentes. Su diagrama debe mostrar la interconexión de eléctrica y protocolos:

- PLC Siemens S7-1200 (control principal)
- Variador de Frecuencia Siemens SINAMICS G120 (con Control Unit CU240E-2)
- HMI Siemens KTP400

- Módulo de Comunicación Siemens CM 1241 (RS485)
- Motor Asíncrono Trifásico
- Switch Industrial
- Encoder

6 Actividades para desarrollar

Para la presente guía práctica se han identificado los elementos de control, así como la conexión de cada uno de los equipos y recursos utilizados en el módulo de análisis dinámico de un motor trifásico controlado mediante la técnica Flux-Vector. Por tanto, es necesario revisar casos de estudio que deberán ser considerados conforme al desarrollo de la guía, con el propósito de cumplir los objetivos establecidos.

Caso de estudio flux vector sin carga

Control flux vector del sistema de 0 a 500 rpm sin carga

El control vectorial de flujo (Flux Vector Control) se distingue por su capacidad de mantener un comportamiento estable en motores de corriente alterna que permitiendo el manejo del par y la velocidad en distintas condiciones de carga. Para lograr este tipo de control, se utiliza un variador de frecuencia que, junto con la retroalimentación en tiempo real proporcionada por el encoder, permite ajustar continuamente los parámetros eléctricos del sistema. La velocidad de referencia o set point es ingresada mediante la pantalla HMI, lo que facilita la interacción con el usuario.

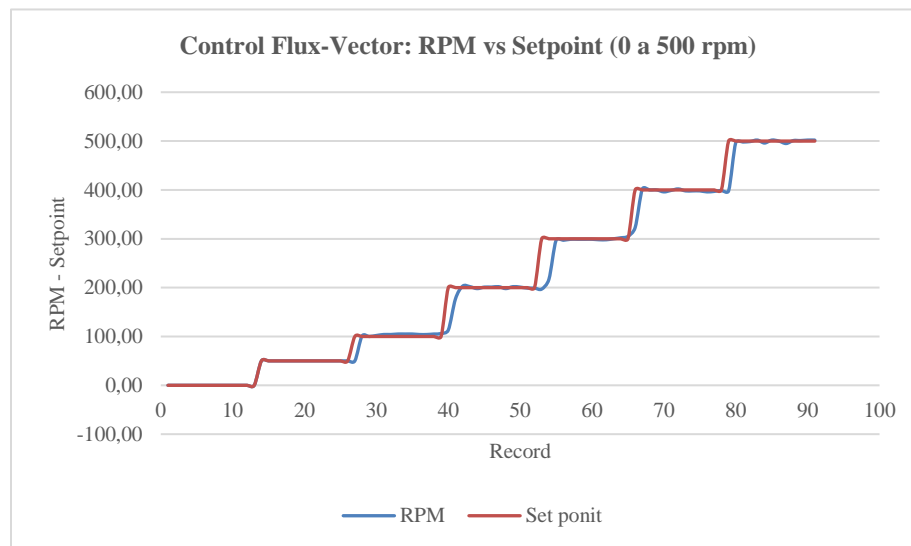


Figura 3. RPM y setpoint de 0 a 500 rpm

La figura muestra el comportamiento dinámico de la máquina rotativa, la curva naranja indica el setpoint de velocidad introducido mediante la pantalla HMI, mientras que la línea azul representa las RPM reales medidas en el motor, La coincidencia de ambas curvas confirma la capacidad del sistema de control vectorial de flujo para seguir la consigna de velocidad con una desviación mínima que se logra por medio de la retroalimentación, el cual permite una respuesta ante variaciones del setpoint, el control se mantiene estable hasta alcanzar las 500 RPM.

Análisis de la frecuencia

La Figura presenta la relación entre las Revoluciones Por Minuto del motor y la frecuencia de alimentación suministrada por el sistema de control Flux-Vector se observa una relación directamente

proporcional a lo largo de todo el rango operativo a medida que la frecuencia se incrementa desde sus valores iniciales, las RPM del motor aumentan de similar forma que valida el principio de control de velocidad en máquinas de corriente alterna. Esta proporcionalidad es fundamental para asegurar el control del flujo magnético y del par motor a distintas velocidades de operación. En el extremo superior de la experimentación la frecuencia alcanza aproximadamente los 78 Hz, mientras que las RPM se elevan hasta alrededor de 2300 RPM. Finalmente, se registra una disminución simultánea tanto de la frecuencia como de las RPM hasta valores mínimos, comportamiento correspondiente a la activación del mecanismo de salvaguarda del PLC, programado para interrumpir el funcionamiento de la máquina rotativa al detectarse condiciones cercanas o superiores a los límites de operación establecidos por los datos de placa.

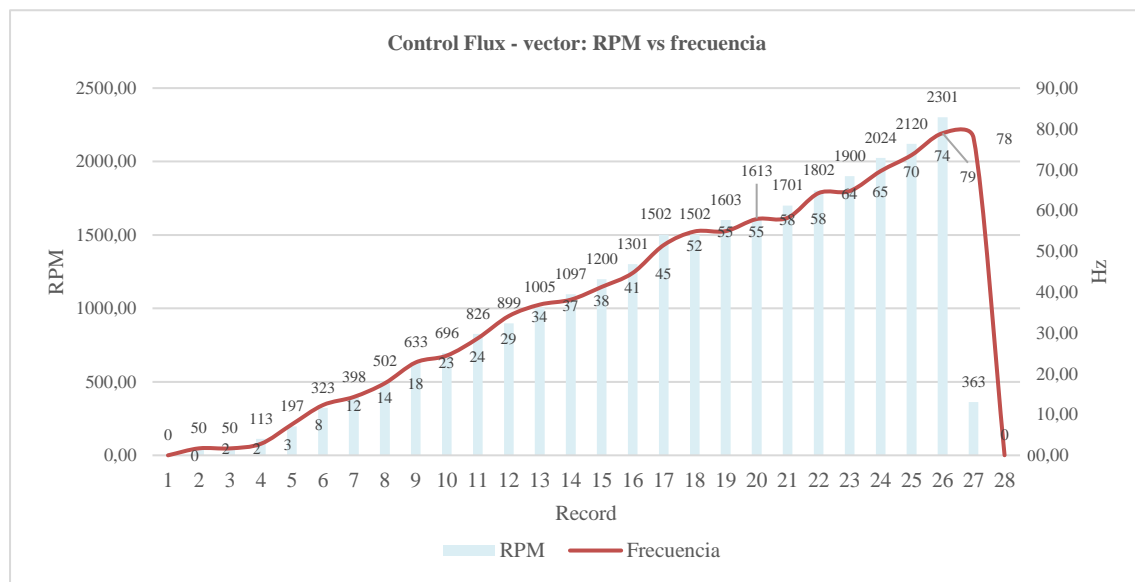


Figura 4. RPM y frecuencia

Actividades

Caso de Estudio del Control Flux-Vector sin Carga:

- Configurar el setpoint del motor de 0 a 1610 RPM en incrementos de 300 RPM.
- En cada paso, analizar el comportamiento de las variables de rendimiento: corriente, frecuencia, voltaje y torque.

7 Referencia

- [1] S. L. Jeng, W. H. Chieng, and Y. Chen, “Web-Based Human-Machine Interfaces of Industrial Controllers in Single-Page Applications,” *Mobile Information Systems*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6668843.
- [2] J. Wei, “Convergence of IoT and PLC in Industrial Automation: A Systematic Review of Emerging Trends, Technical Challenges, and Prospects,” *Applied and Computational Engineering*, vol. 150, no. 1, pp. 89–94, Apr. 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.22249.
- [3] L. Yang, S. Wang, and J. Feng, “Electromagnetic interference modeling and suppression techniques in variable-frequency drive systems,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 329–353, Sep. 2018, doi: 10.1007/S11465-018-0466-1.

LABORATORIO DE AUTÓMATAS - CARRERA DE ELECTRICIDAD

Carrera	Código de la asignatura	Nombre de la asignatura
Electricidad		Automatización Industrial / Sistemas de Control Industrial:

Práctica N°	Laboratorio:	Laboratorio de PLC	Duración (horas)
01	Nombre de la práctica:	Análisis dinámico del motor AC mediante control Flux – Vector (con carga)	6

Versión	Fecha	Elaborado por:	Elaborado por:	Revisado por:
1.0	Julio 2025			
		Caiza Guallasamin Bryan David	Changoluisa Choloquina Jose David	MSc. Ing. Leon Marco Anibal

Aprobado por:	Aprobado por:	Aprobado por:
MSc. Ing. Corrales Byron	MSc. Ing. Jiménez Diego	MSc. Ing. Leon Segovia Manuel

1	Objetivo de la práctica
	Implementar un sistema de control vectorial Flux-Vector en una máquina rotativa de CA, para analizar su comportamiento dinámico y su estabilidad. El sistema será controlado por un PLC y utilizará un variador de frecuencia con la retroalimentación de un encoder.

2	Introducción
	<p>El proyecto implementa un sistema de control Flux-Vector para regular la velocidad de un motor trifásico de CA utilizando un PLC Siemens S7-1200 como control principal, conectado a un variador de frecuencia mediante protocolo MODBUS para el manejo del accionamiento del motor, la pantalla HMI se comunica con el PLC para la visualización en tiempo real de parámetros como velocidad, torque, corriente y voltaje mientras que el módulo CM 1241 (RS485) gestiona la comunicación con los dispositivos externos para la conexión entre equipos se emplea un switch industrial con cableado CAT6 para la integración de señales con un encoder que proporciona realimentación de velocidad mediante señales, la configuración y programación se realiza en TIA Portal V 16 por medio del diagrama bloques para la lógica de control, el software facilita la programación, el monitoreo en tiempo real y la ejecución de pruebas con la finalidad de guiar al operador del control donde los resultados obtenidos se tomen como referencia aplicaciones industriales que requieran un manejo de motores de corriente alterna que demuestre la viabilidad del proyecto [1].</p>

PLC S7-1200

El autómata programable Siemens S7-1200 AC/DC/RLY seleccionado para implementar el control flux-vector, es alimentada por corriente alterna de 120 V – 230 V con entradas digitales 24 V en corriente directa y salidas a relé 10 A, la programación del CPU se realiza mediante TIA Portal con el lenguaje Ladder y bloques funcionales (FBs), con capacidad de comunicación Profinet para sincronización en tiempo real con variadores de frecuencia [2].



Figura 1. PLC S7-1200

Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

El variador SINAMICS CU240E-2 PN forma parte de la familia SINAMICS G120 de Siemens, diseñado para aplicaciones que requieren control vectorial de flujo (Flux-Vector Control) en motores de inducción o motores síncronos, en el presente proyecto cumple la función de permitir el ajuste dinámico y la velocidad del motor que gestiona los parámetros eléctricos en tiempo real [3].



Figura 2. Variador de frecuencia SINAMICS CU240E-2

3 Equipos, instrumentos y materiales

Equipos

- PLC: Siemens S7-1200 (modelo CPU 1214C)
- Interfaz HMI: Pantalla táctil KTP700 Basic de Siemens
- Módulo de comunicación: CM 1241 (RS485) para protocolo Modbus RTU
- Encoder: Incremental de 2500 pulsos por revolución (PPR)

Materiales

- Conductor: THHN calibre N12 – N16 para alimentación
- Switch: Conmutador Ethernet industrial para red PROFINET
- Cable UTP cat 6

Software

- Plataforma TIA Portal V17 (programación de PLC y HMI)

Instrumentos de Medición

- Multímetro digital (para verificación de voltajes y continuidad)

4 Medidas de seguridad

Durante todas las fases de interacción con el sistema (montaje, operación, mantenimiento y pruebas), es imperativo adherirse estrictamente a las siguientes normas de seguridad para prevenir accidentes y garantizar la integridad del personal y del equipo:

1. Prohibiciones y Advertencias:

Riesgo Eléctrico:

- **Prohibido:** El ingreso de alimentos o bebidas en las proximidades del tablero eléctrico.
- **Advertencia:** No manipular ni introducir las manos en los bornes energizados del sistema. Existe riesgo de descarga eléctrica severa.

Riesgo Mecánico:

- **Advertencia:** Mantenerse alejado de cualquier componente rotativo o en movimiento de la máquina. Nunca introducir las manos u otras partes del cuerpo en la máquina cuando esté en funcionamiento o si hay riesgo de arranque inesperado.
- **Advertencia Disco Giratorio:** Dada la presencia de un disco giratorio diseñado para simular carga mecánica sobre el motor, se deben extremar las precauciones. Este componente puede generar riesgos físicos significativos si se manipula o se acerca sin las debidas medidas de seguridad.

2. Elementos Personales:

- Prohibido el uso de pulseras, collares, anillos o cualquier otro elemento metálico suelto que pueda causar un cortocircuito o atrapamiento.
- Mantener el cabello largo completamente recogido y asegurado para evitar enganches con partes móviles.

3. Equipo de Protección Personal (EPP) Obligatorio:

Siempre utilizar el equipo de protección personal (EPP) adecuado y en buen estado antes de iniciar cualquier tarea:

- **Guantes Dieléctricos:** Para protección contra riesgos eléctricos.
- **Gafas de Seguridad:** Para proteger los ojos de partículas, chispas o salpicaduras.
- **Calzado Aislante / de Seguridad:** Con suela antideslizante y propiedades aislantes.

5 Trabajo preparatorio

1. Motor Asíncrono

¿Cuál es la característica principal de un motor asíncrono (o de inducción)?

- Su rotor gira exactamente a la misma velocidad que el campo magnético del estator.
- Requiere escobillas y colector para su funcionamiento.
- La velocidad de su rotor es ligeramente inferior a la velocidad del campo magnético del estator.
- Solo funciona con corriente continua (DC).

2. Control Flux Vector

¿Qué ventaja fundamental ofrece el control Flux Vector sobre un motor asíncrono en comparación con un control escalar (V/F) simple?

- Reduce drásticamente el consumo de energía en todas las aplicaciones.
- Permite un control preciso del par y la velocidad, similar al de un motor DC.
- Elimina la necesidad de un variador de frecuencia.
- Solo se utiliza para motores de muy baja potencia.

3. Variador Siemens SINAMICS CU240E-2

En un variador Siemens SINAMICS G120, la Control Unit CU240E-2 es el "cerebro" del sistema. ¿Cuál de las siguientes es su función principal?

- Suministrar directamente la potencia eléctrica al motor.
- Contener los algoritmos de control del motor y las interfaces de comunicación.
- Actuar como un simple fusible de protección.
- Generar la energía necesaria para todo el sistema de automatización.

4. Switch Industrial

¿Cuál es la razón principal para utilizar un switch industrial en lugar de un switch comercial en un entorno de automatización?

- Los switches industriales son más económicos.
- Los switches industriales pueden transmitir datos más rápido que los comerciales.
- Están diseñados para soportar condiciones ambientales severas (temperatura, vibraciones, ruido).
- Solo los switches industriales pueden conectarse a variadores de frecuencia.

5. Comunicación Modbus

Si una HMI necesita enviar un setpoint de frecuencia a un variador y leer la corriente del motor, ¿qué tipo de comunicación se describe en el contexto del protocolo Modbus?

- Modbus es un protocolo exclusivo para dispositivos inalámbricos.
- Modbus permite la comunicación entre dispositivos (maestro-esclavo) para intercambio de datos.
- Modbus solo se usa para programación de PLCs.
- Modbus es un tipo de cable de conexión física.

6. HMI KTP400

La HMI Siemens KTP400 es un Panel Básico. ¿Qué significa "HMI" en el contexto de un sistema de automatización?

- High Motor Input (Entrada de Alto Motor).
- Human Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina).
- Home Monitoring Integration (Integración de Monitoreo del Hogar).
- Hardware Main Indicator (Indicador Principal de Hardware).

7. Realizar un diagrama de conexión detallado que ilustre la interconexión de estos componentes. Su diagrama debe mostrar la interconexión de eléctrica y protocolos:

- PLC Siemens S7-1200 (control principal)
- Variador de Frecuencia Siemens SINAMICS G120 (con Control Unit CU240E-2)
- HMI Siemens KTP400
- Módulo de Comunicación Siemens CM 1241 (RS485)
- Motor Asíncrono Trifásico
- Switch Industrial
- Encoder

6 Actividades para desarrollar

Para la presente guía práctica se han identificado los elementos de control, así como la conexión de cada uno de los equipos y recursos utilizados en el módulo de análisis dinámico de un motor trifásico controlado mediante la técnica Flux-Vector. Por tanto, es necesario revisar casos de estudio que deberán ser considerados conforme al desarrollo de la guía, con el propósito de cumplir los objetivos establecidos.

Caso de estudio flux vector con carga

Control flux vector del sistema de 0 a 2300 rpm

El comportamiento del sistema de control Flux-Vector ante la aplicación de una carga mecánica variable, introducida mediante un mecanismo de frenado manual acoplado a un disco a diferencia de las condiciones de operación sin carga, el desempeño dinámico del motor incluye ahora la respuesta ante perturbaciones de torque, el motor continúa respondiendo al Setpoint de velocidad, la curva azul correspondiente a las RPM reales evidencia oscilaciones con respecto a las pruebas en vacío las fluctuaciones son consecuencia directa de la carga introducida en distintos niveles del Setpoint aunque el sistema de control logra compensar dichas variaciones, restableciendo la velocidad de referencia o manteniéndose dentro de un margen aceptable, la presencia de estas oscilaciones validan el desempeño del algoritmo de control Flux-Vector frente a variaciones de carga.

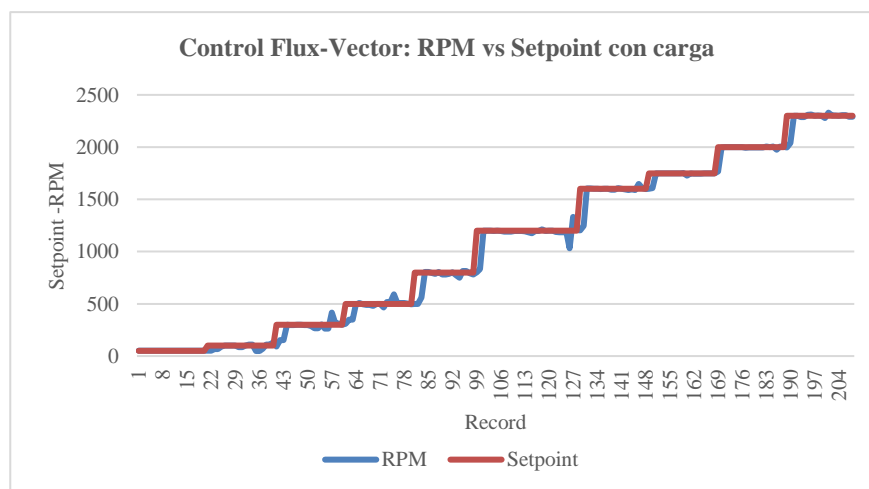


Figura 5. RPM y frecuencia

Control Flux - Vector con carga de 0 a 2300 rpm

Análisis del voltaje

La figura representa la relación entre las RPM del motor y el voltaje aplicado en presencia de carga mecánica, el voltaje incrementa conjuntamente con las RPM, que mantiene la relación directa para alcanzar la velocidad deseada bajo condiciones de perturbación, este comportamiento valida la modulación del voltaje por parte del control Flux-Vector, lo que permite entregar el torque necesario.

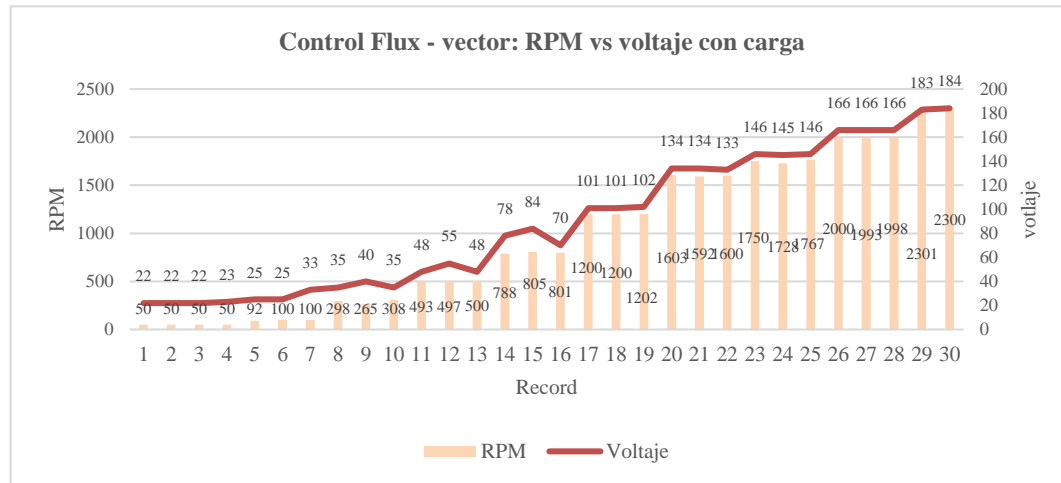


Figura 6. RPM vs voltaje con carga

Análisis del Control Flux-Vector con Carga:

- Establecer el motor en sus revoluciones nominales de 1610 RPM.
- Aplicar carga mecánica y analizar cómo responden las variables de control (corriente, frecuencia, voltaje, y torque) para mantener la velocidad estable.

7 Referencia

- [1] S. L. Jeng, W. H. Chieng, and Y. Chen, "Web-Based Human-Machine Interfaces of Industrial Controllers in Single-Page Applications," *Mobile Information Systems*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6668843.
- [2] J. Wei, "Convergence of IoT and PLC in Industrial Automation: A Systematic Review of Emerging Trends, Technical Challenges, and Prospects," *Applied and Computational Engineering*, vol. 150, no. 1, pp. 89–94, Apr. 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.22249.
- [3] L. Yang, S. Wang, and J. Feng, "Electromagnetic interference modeling and suppression techniques in variable-frequency drive systems," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 329–353, Sep. 2018, doi: 10.1007/S11465-018-0466-1.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Nombre del estudiante: Bryan David Caiza Guallasamin

AVAL DE TRADUCCIÓN - Profesional Externo

Cintya Nataly Martinez Mallitasig con cédula de identidad número: 050385772-4 Licenciada en: Pedagogía del Idioma Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020 – 2023 - 2649298; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen de la propuesta tecnológica con el título: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA”** de: **Bryan David Caiza Guallasamin**, egresado de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, perteneciente a la Facultad de: Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, agosto 2025


.....

Lic. Cintya Nataly Martinez Mallitasig

CI: 050385772-4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Nombre del estudiante: José David Changoluisa Choloquina.

AVAL DE TRADUCCIÓN - Profesional Externo

Cintya Nataly Martinez Mallitasig con cédula de identidad número: 050385772-4 Licenciada en: Pedagogía del Idioma Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020 – 2023 - 2649298; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen de la propuesta tecnológica con el título: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL FLUX-VECTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA”** de: **José David Changoluisa Choloquina**, egresado de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, perteneciente a la Facultad de: Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, agosto 2025

.....


Lic. Cintya Nataly Martinez Mallitasig

CI: 050385772-4

Quito, 01/08/2025

CERTIFICADO DE REGISTRO DE TÍTULO

La Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, SENESCYT, certifica que MARTINEZ MALLITASIG CINTYA NATALY, con documento de identificación número 0503857724, registra en el Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador (SNIESE), la siguiente información:

Nombre: MARTINEZ MALLITASIG CINTYA NATALY
Número de documento de identificación: 0503857724
Nacionalidad: Ecuador
Género: FEMENINO

Título(s) de tercer nivel de grado

Número de registro	1020-2023-2649298
Institución de origen	UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
Institución que reconoce	
Título	LICENCIADO/A EN PEDAGOGIA DEL IDIOMA INGLES
Tipo	Nacional
Fecha de registro	2023-04-26
Área o Campo de	EDUCACION
Observaciones	

OBSERVACIÓN:

- Los títulos de tercer nivel de grado ecuatorianos están habilitados para el ingreso a un posgrado.
- Los títulos registrados tanto nacionales como extranjero han sido otorgados por instituciones de educación superior vigentes al momento de la emisión de la titulación.
- El cambio de nivel de formación de educación superior de los títulos técnicos y tecnológicos emitidos por instituciones de educación superior nacionales se ejecutó en cumplimiento a la Disposición Transitoria Octava de la Ley Orgánica Reformatoria a la LOES, expedida el 2 de agosto de 2018.

IMPORTANTE: La información proporcionada en este documento es la que consta en el SNIESE, que se alimenta de la información suministrada por las instituciones del sistema de educación superior, conforme lo disponen los artículos 126 y 129 de la Ley Orgánica de Educación Superior y 56 de su Reglamento. El reconocimiento/registro del título no habilita al ejercicio de las profesiones reguladas por leyes específicas, y de manera especial al ejercicio de las profesiones que pongan en riesgo de modo directo la vida, salud y seguridad ciudadana conforme el artículo 104 de la Ley Orgánica de Educación Superior. Según la Resolución RPC-SO-16-No.256-2016.

En caso de detectar inconsistencias en la información proporcionada de titulaciones nacionales, se recomienda solicitar a la institución de educación superior nacional que emitió el título, la rectificación correspondiente y de ser una titulación extranjera solicitar la rectificación a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación.

Para comprobar la veracidad de la información proporcionada, usted debe acceder a la siguiente dirección:
www.educacionsuperior.gob.ec



María José Amores Oleas
Directora de Registro de Títulos
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



GENERADO: 01/08/2025 8.10 AM