



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**“IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA  
EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN”**

**PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR(ES):**

Juan Carlos Dias Caisa  
Alisson Dayana Guanocunga Pila

**TUTOR:**

Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez

**LATACUNGA ABRIL 2024**

## DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Nosotros, **DÍAS CAISA JUAN CARLOS** con C.C: **0504351867** y **GUANOCUNGA PILA ALISSON DAYANA** con C.C: **1728742378**, declaramos ser los autores del presente proyecto de Investigación: **“IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN”**, siendo el **Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez** el tutor del presente trabajo; 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 Investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Atentamente,

.....  
**Días Caisa Juan Carlos**

C.C. 0504351867

.....  
**Guanocunga Pila Alisson Dayana**

C.C. 1728742378

## AVAL DEL TUTOR

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN”**, de los estudiantes **Días Caisa Juan Carlos y Guanocunga Pila Alisson Dayana** , de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos–técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 20 de Agosto de 2024

.....  
Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez

**Tutor**

C.C. 1757107907

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **Días Caisa Juan Carlos** con cedula de ciudadanía **C.C: 0504351867** y **Guanocunga Pila Alisson Dayana** con cedula de ciudadanía **C.C: 1728742378**, con el título de Proyecto de titulación: “**IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN**”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Latacunga, 20 de agosto de 2024

Para constancia firman:

.....  
**Lector 1 (presidente)**

Ing. MSc. Marco Aníbal León Segovia  
CC:0502305402

.....  
**Lector 2**

Ing. MSc. Manuel Angel León Segovia  
CC: 0502041353

.....  
**Lector 3**

Ing. MSc. Franklin Hernán Vásquez Teneda  
CC: 1710434497

## CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el tema: “Impacto del control de velocidad en la eficiencia de motores de inducción”, de los estudiantes **Días Caisa Juan Carlos** y **Guanocunga Pila Alisson Dayana**, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencias del 8%; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.



Página 2 of 51 - Descripción general de Integridad

Identificador de la entrega trn:old:::1:2988113283




### 8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

#### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

#### Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Latacunga, 22 de agosto 2024

.....  
Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez  
C.C. 1757107907

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a [Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez] por su guía y apoyo a lo largo de esta investigación. A mi familia y amigos, gracias por su constante aliento y comprensión durante este proceso. Este trabajo es resultado del esfuerzo conjunto de todos ustedes.

*Carlos Días*

## **DEDICATORIA**

A Dios, por iluminar mi camino y darme la fuerza necesaria para alcanzar mis metas. A mi madre, María Luz, cuya fe inquebrantable y amor incondicional han sido mi mayor inspiración. A mis hermanos, por su constante apoyo y por estar siempre a mi lado. Y a mis amigos, por compartir conmigo este viaje y hacer que cada paso valiera la pena.

*Carlos Días*

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a [Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez, Ing. MSc. Marco Aníbal León Segovia] por habernos guiado con su sabiduría a lo largo de esta investigación, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento. A mi familia y amigos, gracias por su inquebrantable aliento y comprensión en cada etapa de este proceso. Su constante apoyo, incluso en los momentos más desafiantes, ha sido un pilar esencial para la culminación de este trabajo. Este logro no es solo el fruto de mi esfuerzo, sino también el reflejo del compromiso, la dedicación y el amor de cada uno de ustedes.

*Alisson Guanocunga*

## **DEDICATORIA**

A mi hijo Jareth, quien ha sido una fuente inagotable de fortaleza y la razón de mi felicidad. A mi madre, Carmen Pila, y a mi hermana, Helina Guanocunga, por ser los pilares que sostienen mi vida, brindándome su apoyo incondicional en cada etapa de mi camino con fe y la bendición de Dios, me han guiado y ayudado a convertirme en una persona de bien. A mi padre, César Guanocunga, quien siempre ha estado a mi lado, velando por mí con sabios consejos y siendo un ejemplo constante de lo que significa ser un buen padre. A mi familia, que ha estado presente en cada uno de mis pasos, compartiendo conmigo tanto los triunfos como las dificultades. A mis amigos, cuyo apoyo y generosidad me han revelado el verdadero valor de la amistad y a mis docentes, quienes no solo me han formado académicamente, sino que también han contribuido a mi crecimiento personal.

***Alisson Guanocunga***

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

## TEMA: “IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN”

### **Autores:**

Días Caisa Juan Carlos

Guanocunga Pila Alisson Dayana

### **RESUMEN**

Este estudio de investigación nace de la necesidad de optimizar la eficiencia de los motores de inducción, que comúnmente operan a una velocidad constante y consumen la misma cantidad de energía independientemente de la carga que utilizan. Dado que estos motores tienen un consumo energético fijo, independientemente de la variabilidad en la carga, se busca explorar algoritmos de control para mejorar su rendimiento a través del control de velocidad. La investigación se centra en analizar el impacto de diferentes algoritmos de control de velocidad en motores de inducción, bajo condiciones de carga variables, utilizando variadores de frecuencia. Estos dispositivos son capaces de modular la energía transmitida al motor, permitiendo así el control preciso de la velocidad y optimizar el consumo energético. El enfoque del estudio es integral, combinando métodos experimentales y descriptivos, apoyados por herramientas analíticas. Se realizan pruebas exhaustivas bajo diversas condiciones de carga para evaluar cómo los diferentes algoritmos de control afectan el rendimiento de los motores de inducción. La investigación examina en detalle cómo cada algoritmo puede optimizar el funcionamiento del motor y mejorar su eficiencia. La comparación y el análisis de los resultados se llevan a cabo mediante herramientas de análisis de datos avanzadas. Los hallazgos de este estudio están orientados a proporcionar directrices prácticas para la selección e implementación de algoritmos de control que optimicen el rendimiento de los motores de inducción.

**Palabras Clave:** Eficiencia, Motor asíncrono, Algoritmo de control, Energía, Cargas variables, Herramientas analíticas.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**  
**ELECTRICAL ENGINEERING CAREER**

**THEME:** “IMPACT OF SPEED CONTROL ON THE EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS”

**Authors:**

Días Caisa Juan Carlos

Guanocunga Pila Alisson Dayana

**ABSTRACT**

This research study stems from the need to optimize the induction motors' efficiency, which commonly operate at a constant speed and consume the same amount of energy regardless of the load they use. Since these motors have a fixed energy consumption, regardless of the load variability, it is sought to explore control algorithms to improve their performance through speed control. The research is focused on analyzing the impact of different speed control algorithms on induction motors under varying load conditions using variable frequency drives. These devices can modulate the energy transmitted to the motor, thus allowing precise speed control and optimizing energy consumption. The study approach is integral, combining experimental and descriptive methods supported by analytical tools. Extensive tests are performed under various load conditions to evaluate how different control algorithms affect the performance of induction motors. The research examines in detail how each algorithm can optimize engine performance and improve engine efficiency. A comparison and analysis of the results is carried out using advanced data analysis tools. This study's findings are aimed at providing practical guidelines for the selection and implementation of control algorithms that optimize the performance of induction motors.

**Keywords:** Efficiency, Asynchronous motor, Control algorithm, Energy, Variable loads, Analytical tools.

## ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. PROBLEMA .....	3
2.1.1. Situación Problemática.....	3
2.1.2. Formulación del Problema .....	4
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	4
2.2.1. Objeto de Investigación:.....	4
2.2.2. Campo de Acción: .....	4
2.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
2.4. BENEFICIARIOS .....	5
2.4.1. Directo .....	5
2.4.2. Indirecto.....	5
2.5. OBJETIVOS.....	5
2.5.1. General .....	5
2.5.2. Específicos.....	6
2.6. HIPÓTESIS Y SISTEMAS DE TAREAS .....	6
2.6.1. HIPÓTESIS .....	6
2.6.2. SISTEMA DE TAREAS .....	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	8
3.1. ANTECEDENTES .....	8
3.2. MOTOR DE INDUCCIÓN.....	13
3.2.1. Los motores asíncronos constan de dos partes fundamentales.....	14
3.2.2. Deslizamiento (S) .....	15
3.2.3. Funcionamiento básico del motor de inducción trifásico.....	16
3.2.4. Arranque de motores asíncronos .....	16
3.3. VARIADOR DE FRECUENCIA.....	17

3.3.1. Control y operación VFD .....	18
3.3.2. Principio de Funcionamiento .....	19
3.3.3. Proceso interno del Variador de Frecuencia.....	20
3.3.4. Características del variador de velocidad .....	20
3.3.5. Tipos de variadores de velocidad .....	21
3.3.6. Ventajas y desventajas de los variadores de frecuencia .....	21
3.3.6.1. Ventajas .....	21
3.3.6.2. Desventajas.....	21
3.3.7. Ahorro energético con variadores de velocidad .....	22
3.4. ESTRATEGIAS DE CONTROL .....	23
3.4.1. Control de Voltaje Frecuencia (V/f).....	23
3.4.2. Control Vectorial sin Sensor (Sensorless Vector Control).....	24
3.4.3. Control Vectorial con Sensor (Vector Control with Encoder) .....	25
3.4.4. Control Directo de Par (Direct Torque Control, DTC) .....	25
3.5. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO.....	26
3.5.1. Lazo abierto .....	26
3.5.1.1. Ventajas y desventajas del sistema.....	26
3.5.2. Sistema de lazo Cerrado .....	27
3.5.2.1. Ventajas y desventajas del sistema.....	27
3.6. VARIADORES UN APORTE A LA EFICIENCIA EN LA INDUSTRIA .....	28
3.6.1. Acerca de la eficiencia energética .....	29
3.6.2. La clave está en los variadores .....	29
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	30
4.1. Gestión de Tareas .....	30
4.2. MATERIALES.....	31
4.3. Diagrama de Flujo .....	32
4.4. Datos Técnicos del motor .....	33

4.5. Selección de variadores .....	33
4.5.1. Manuales de operación .....	33
4.6. Diagrama de conexión .....	34
4.7. Configuración de los parámetros .....	34
4.7.1. Parámetros del variador Siemens .....	34
4.7.2. Parámetros del variador iNVT GD10.....	35
4.8. Obtención de datos .....	36
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
5.1. Escenario de estudio 1 .....	40
5.1.1. Carga de 10kg.....	40
5.1.2. Aumento de carga a 15kg .....	41
5.1.3. Aumento de carga a 20kg .....	43
5.2. Escenario de estudio 2 .....	45
5.2.1. Carga de 10kg.....	45
5.2.2. Aumento de carga a 15kg.....	47
5.3. Aumento de carga a 20kg.....	48
5.3.1. Escenario de estudio 3 .....	50
5.3.1.1. Control V/f del variador iNVT GD10 .....	51
5.3.1.2. Control V/f del variador Siemens Micromaster 440 .....	51
5.3.1.3. Control Vectorial del variador Siemens Micromaster 440.....	52
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	54
6.1. Conclusiones.....	54
6.2. Recomendaciones .....	54
7. REFERENCIAS .....	56
8. ANEXOS .....	62
8.1. Anexo 1 .....	62
8.2. Anexo 2 .....	63

8.3. Anexo 3.....	64
8.4. Anexo 4.....	65
8.5. Anexo 5.....	66
8.6. Anexo 6.....	67

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1. Sistema de tareas. ....	7
Tabla 3.2. Análisis global de estudios sobre controladores de velocidad .....	10
Tabla 3.3. Análisis en Sudamericano sobre controladores de velocidad para motores.....	11
Tabla 3.4. Análisis en Ecuador sobre controladores de velocidad .....	12
Tabla 3.5. Parte del motor: Estator [14]. ....	14
Tabla 3.6. Parte del motor: Rotor [14].....	14
Tabla 4.7. Característica de los Materiales.....	31
Tabla 4.8. Características técnicas del motor. ....	33
Tabla 4.9. Diagrama de conexión de cada variador [39].....	34
Tabla 4.10. Reajuste a valores de fábrica [39]. ....	34
Tabla 4.11. Parámetros configurables [41].....	34
Tabla 4.12. Parámetros de acceso rápido [40].....	35
Tabla 4.13. Base de datos caso 1.....	36
Tabla 4.14. Base de datos caso 2.....	38
Tabla 4.15. Base de datos caso 3.....	39
Tabla 5.16. Datos del algoritmo de control .....	41
Tabla 5.17. Datos de los controles.....	43
Tabla 5.18. Datos de los controles.....	45
Tabla 19. Datos de los controles.....	47
Tabla 20. Datos del sistema de control.....	48
Tabla 21. Datos del control .....	50
Tabla 5.22. Datos de potencia .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Partes del motor de inducción [14].	14
Figura 3.2. Esquema eléctrico del arranque directo [18].	17
Figura 3.3. Corriente vs velocidad [19].	17
Figura 3.4. Variador de Frecuencia [22].	18
Figura 3.5. Estructura general de un variador de frecuencia [23].	19
Figura 3.6. Estructura de control del variador de frecuencia [26].	20
Figura 3.7. Control V/f Lineal [33].	24
Figura 3.8. Sistema de Control de Lazo Abierto [36].	26
Figura 3.9. Sistema de control con retroalimentación [36].	27
Figura 4.10. Diagrama de Flujo.	32
Figura 5.11. Sistemas de control	40
Figura 5.12. Sistema de control	42
Figura 5.13. Sistema de control	44
Figura 5.14. Sistema de control	46
Figura 5.15. Sistema de control	47
Figura 5.16. Sistema de Control	49
Figura 5.17. Potencia vs RPM	51
Figura 5.18. Potencia Vs RPM	52
Figura 5.19. Potencia vs RPM	52
Figura 8.20. Diagrama de bloques siemens	62
Figura 8.21. Organigrama de puesta en servicio rápido	63
Figura 8.22. Diagrama del sistema de control	64
Figura 8.23. Velocidad ajustada a 600	65
Figura 8.24. Velocidad ajustada a 1200 rpm	66
Figura 8.25. Ajuste de velocidad a 1800rpm	67

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** “IMPACTO DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN”

**Modalidad de Titulación:**

Propuestas Tecnológicas

Proyecto de Investigación

**Carrera:** Carrera de Electricidad.

**Equipo de Trabajo de Titulación:**

**POSTULANTE 1:**

**Nombres y Apellidos:** Días Caisa Juan Carlos

**Cedula de Ciudadanía:** 0504351867

**Email:** [juan.dias1867@utc.edu.ec](mailto:juan.dias1867@utc.edu.ec)

**POSTULANTE 2:**

**Nombres y Apellidos:** Guanocunga Pila Alisson Dayana

**Cedula de Ciudadanía:** 1728742378

**Email:** [alisson.guanocunga2378@utc.edu.ec](mailto:alisson.guanocunga2378@utc.edu.ec)

**TUTOR:**

**Nombres y Apellidos:** Dr. Mg. Secundino Marrero Ramírez

**Cedula de Ciudadanía:** 1757107907

**Email:** [secundino.marrero@utc.edu.ec](mailto:secundino.marrero@utc.edu.ec)

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

**Línea de investigación:** Tecnología industrial, gestión de la producción, riesgos y seguridad laboral.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial.

Grupos Temáticos:

1. Eficiencia energética.
2. Optimización de sistemas eléctricos.

## **2. INTRODUCCIÓN**

En la búsqueda constante de optimizar el rendimiento energético y reducir la huella ambiental, la eficiencia de los motores se ha convertido en un elemento crucial en la ingeniería moderna. Dentro de este contexto, el control de velocidad emerge como una herramienta estratégica para mejorar no solo la eficiencia operativa, sino también para adaptar el consumo de energía a las demandas variables de diferentes aplicaciones industriales.

Los variadores de frecuencia son dispositivos que modulan la energía que es transmitida al motor, es decir, ajustan la frecuencia y el voltaje que será entregada al actuador, por ende, la función del variador es controlar la velocidad de los motores eléctricos, mejorando el rendimiento en los procesos industriales y también la eficiencia y optimización en el consumo energético. [1]

Al adentrarnos en este fascinante campo, no solo exploraremos las implicaciones prácticas, sino que también sobre el papel que el control de velocidad juega en el panorama global de la eficiencia energética.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se propone explorar a fondo el impacto del control de velocidad en la eficiencia de motores. Se examinarán las tecnologías actuales de control, los beneficios derivados de la implementación de sistemas de control de velocidad y cómo estas prácticas contribuyen a la optimización de recursos energéticos. A través de un análisis exhaustivo, se busca arrojar luz sobre los factores clave que influyen en la eficiencia de los motores y cómo las estrategias de control pueden ser empleadas de manera efectiva para maximizar su rendimiento.

### **2.1. PROBLEMA**

#### **2.1.1. Situación Problemática**

Los motores de inducción son cruciales para las industrias por su robustez y eficiencia, con el pasar del tiempo ha habido un alto crecimiento del sector industrial y comercial en la elaboración de diferentes productos con la utilización de motores de inducción que satisfagan el mercado. Dentro de las industrias en general, los motores de inducción operan a una velocidad constante, lo que significa que consumen la misma cantidad de energía independientemente de la carga real que están impulsando. Cuando la carga es menor a la capacidad máxima del motor, se desperdicia energía, lo que aumenta los costos de operación.

Las cargas pueden variar considerablemente durante la operación en algunos procesos productivos. Según lo mencionado anteriormente esto ha empezado a generar un interés sobre como incide el control de velocidad en la eficiencia de motores de inducción en presencia de cargas variables.

Además, es necesario determinar el tipo de sistema de control que emplean los variadores de frecuencia, ya sea un control vectorial lineal u otras tecnologías similares. Este análisis permitirá identificar cuál de estos sistemas es más eficiente en los motores de inducción, contribuyendo así a optimizar su rendimiento.

Mediante el estudio que se llevará a cabo se evaluarán los diferentes sistemas de control que poseen los distintos variadores de frecuencia aplicando cargas variables a cada una de ellas para poder analizar qué control le dará un mejor rendimiento al motor en base a su método de control.

### **2.1.2. Formulación del Problema**

La selección no adecuada del sistema de control para variadores de frecuencia aplicados a motores de inducción afecta la eficiencia energética y los costos de explotación cuando existen diferentes condiciones de carga en sistema.

## **2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.2.1. Objeto de Investigación:**

Motores de Inducción

### **2.2.2. Campo de Acción:**

Eficiencia Energética, Automatización y Control de Motores.

## **2.3. JUSTIFICACIÓN**

Los motores de inducción son ampliamente preferidos en la industria debido a su versatilidad y capacidad para mantener un rendimiento constante frente a variaciones en las condiciones de carga. Esta adaptabilidad los convierte en una opción atractiva, respaldada por su durabilidad y bajos costos de mantenimiento, por lo que las industrias optan por la adquisición de motores de inducción.

No obstante, el uso de motores de inducción con cargas variables conlleva a una ineficiencia energética cuando operan por debajo de su capacidad máxima. Esta ineficiencia se traduce en mayores costos operativos, lo que motiva la implementación de soluciones para mitigar este desperdicio energético. Los variadores de velocidad, al ajustar la velocidad de operación en los motores, se convierten en una herramienta clave para optimizar la eficiencia.

Estos variadores de velocidad ofrecen diferentes sistemas de control, como el Control V/f lineal y el Control vectorial, entre otros, cada uno con sus propias características y capacidad para adaptarse a las demandas variables. Por ello el problema radica en la necesidad de determinar cuál sistema de control es más efectivo para mejorar en los motores de inducción, especialmente en entornos donde las cargas varían dinámicamente. Este estudio permitirá identificar qué variador de frecuencia y método de control son más adecuados para minimizar el consumo de energía y reducir los costos operativos.

## **2.4. BENEFICIARIOS**

### **2.4.1. Directo**

Los beneficiarios directos serán el sector industrial donde se ocupa motores de inducción.

### **2.4.2. Indirecto**

Los estudiantes y docentes de la facultad de CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## **2.5. OBJETIVOS**

### **2.5.1. General**

Analizar la incidencia que tiene el control de velocidad en la eficiencia de motores de inducción con cargas variables.

### **2.5.2. Específicos**

- Recopilar información bibliográfica sobre los variadores de frecuencia y sus configuraciones para el control de motores de inducción.
- Evaluar la eficiencia del motor de inducción con potencia nominal de 0.5HP, sometiéndolos a variaciones de carga en un rango de 0 a 20kg.
- Análisis de resultados del comportamiento de la velocidad del motor ante cargas dinámicas mediante algoritmos de control para diferentes variadores de frecuencia disponibles en el mercado.

## **2.6. HIPÓTESIS Y SISTEMAS DE TAREAS**

### **2.6.1. HIPÓTESIS**

La comparación de diferentes sistemas de control aplicados a variadores de frecuencia en motores de inducción revela diferencias significativas en la eficiencia energética y la capacidad de recuperación de velocidad ante variaciones de carga, permitiendo identificar el sistema de control más eficiente y adecuado para optimizar el rendimiento del motor.

### **2.6.2. SISTEMA DE TAREAS**

La Tabla 2.1 proporciona un desglose detallado de las tareas requeridas para realizar la investigación.

Tabla 2.1. Sistema de tareas.

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad (tareas)</b>	<b>Resultados Esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
Recopilar información bibliográfica sobre los variadores de frecuencia y sus configuraciones para el control de motores de inducción.	Realizar una revisión de trabajos relacionados con el uso de variadores de frecuencia para el control de velocidad en motores asíncronos.	Marco teórico y revisión bibliográfica del efecto que tiene los variadores aplicados a motores y sus diferentes controles.	Repositorios de Tesis. Artículos Científicos. Manual de Fabricación.
Evaluar la eficiencia del motor de inducción con potencia nominal de 0.5HP, sometidos a variaciones de carga en un rango de 0 a 20kg.	Aplicar rangos de carga variable con diferentes ajustes de velocidades y recopilar los datos para su respectivo análisis.	Registro de base de datos de las revoluciones medidas y organizar los resultados de los casos propuestos.	Equipos de Medición. Documentación técnica. Variadores de Frecuencia. Motor de Inducción.
Análisis de resultados del comportamiento de la velocidad del motor ante cargas dinámicas mediante algoritmos de control para diferentes variadores de frecuencia disponibles en el mercado.	Realizar graficas del comportamiento de la velocidad ajustadas a diferentes revoluciones y configuras con diferentes sistemas de control.	Qué sistema de control de cada variador es más eficiente a la hora de mantener sus revoluciones a cargas variables.	Software especializado. Análisis crítico.

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

En este capítulo, se abordan los fundamentos teóricos que sustentan la investigación, proporcionando una base sólida para el análisis posterior. En la Sección 3.1 se revisan los trabajos previos que sientan las bases para esta investigación, la Sección 3.2 se centra en el análisis de los motores de inducción, describiendo detalladamente sus partes, las ecuaciones asociadas y cómo el deslizamiento influye en su operación, La Sección 3.3 analiza el variador de frecuencia, enfocándose en su funcionamiento, componentes principales y aplicaciones, La Sección 3.4 Estrategias de control se discutirán los diferentes tipos de control que utilizan, incluyendo Control V/f (Voltaje/ Frecuencia) y el Control Vectorial sin sensor, La Sección 3.5 Explora los sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado, describiendo sus características, funcionamiento y sus principales ventajas, y La Sección 3.6 analiza cómo los variadores de frecuencia contribuyen a la eficiencia en la industria.

#### **3.1. ANTECEDENTES**

En el año 2018, Herrera Guachamin Jonathan Giovanni [1] en su tema realizó un Análisis de la eficiencia de los motores de inducción que operan bajo diferentes condiciones de fallos con el objetivo de comparar la evolución de la eficiencia de los motores con fallos con la del motor sano para conocer la reducción de la misma a plena carga. Obteniendo como resultado sobre la comparación de todos los ensayos que, para lograr un ahorro de energía efectivo, no es suficiente con utilizar motores de alta eficiencia; también es crucial implementar técnicas de mantenimiento que aseguren su correcto funcionamiento. Como se demostró en el proyecto, los beneficios de un motor de alta eficiencia pueden verse contrarrestados si el motor opera en condiciones de fallo. En este sentido, las aportaciones de este trabajo son significativas ya que, no solamente confirman que la presencia de los fallos estudiados acaba afectando en mayor o menor medida al rendimiento, sino también que el efecto en términos de disminución de eficiencia puede llegar a ser muy notable.

En el año 2015, Francisco Xavier Pilaquina Cantuña [2] en su tema de investigación realizó un Diseño de un arranque y control de velocidad de un motor de inducción jaula de ardilla (mija), que permita optimizar el consumo de energía dentro de un proceso industrial. El análisis del proyecto se realizó en condiciones de vacío y con carga. Se implementó un mecanismo de frenado en el eje del motor y se simuló dos arranques con carga, midiendo el consumo en intervalos de 5 minutos.

El consumo se proyectó para diferentes períodos: una hora, una jornada de 12 horas diarias, y mensual y anualmente, considerando distintos procesos de arranque. El análisis reveló que el uso del variador de frecuencia es eficaz para el control de velocidad y el ahorro energético. Además, se concluyó que un motor asíncrono trifásico con arranque directo consume más energía en comparación con uno equipado con un variador de frecuencia o con un arranque estrella-triángulo, según las mediciones realizadas con el medidor de energía SENTRON PAC3200.

Además, en el estudio llevado a cabo por C. Espinoza y R. Guerrero en el año 2016 en la Universidad Cuenca [3], se realizó el diseño e implementación de un variador de velocidad para un motor de inducción trifásico de baja potencia utilizando control predictivo. La metodología de control avanzado se basa en predecir el comportamiento futuro de las variables controladas mediante la minimización de una función de costo en el algoritmo de control predictivo (MPC). El diseño del variador de velocidad se fundamentó en un análisis teórico del MPC, centrado en las corrientes de carga, y en una revisión de métodos de control para motores. El prototipo desarrollado consta de dos etapas principales: la primera etapa se encarga del control, convirtiendo la corriente alterna (CA) a corriente continua (CD) y filtrando el rizado con capacitores; la segunda etapa, el inversor, convierte la energía en CD nuevamente a CA. La selección del inversor fue crucial para manejar los niveles de potencia del motor, mejorando la respuesta del sistema a las variaciones de carga y reduciendo los costos de consumo energético.

En base a la Universidad Técnica de Cotopaxi, E. Enríquez y J. Quispe [4] en el año 2022 realizaron un Estudio de eficiencia energética en arranques de motores trifásicos de 1hp para sistemas de bombeo, debido a un arranque inadecuado, se produce un consumo excesivo de energía que puede ocasionar daños tanto estructurales como operativos en el motor. Para identificar y registrar los datos iniciales durante la operación del motor, se utilizó un analizador Fluke 435, el cual fue conectado a las líneas de alimentación. Se evaluaron diferentes métodos de arranque para motores, incluyendo estrella, delta y controlado por un variador de frecuencia INVT. El análisis reveló que el arranque estrella directo es el más eficiente, ya que evita picos de corriente elevados y estabiliza el motor en pocos segundos. El uso del variador de frecuencia causó problemas de distorsión armónica en la red, afectando el ciclo de funcionamiento del motor. Los datos operativos se recolectaron durante 60 segundos en intervalos de 10 segundos. El estudio comparó diferentes tipos de arranques y sus aplicaciones en motores de inducción utilizados en bombas y bandas

transportadoras. Se destacó la importancia de verificar las características técnicas y las protecciones en los circuitos de control, y se recomendó consultar el manual del instrumento de medición para asegurar una correcta conexión y obtener datos precisos.

En las siguientes tablas, se presenta un análisis exhaustivo de trabajos, tesis e investigaciones relacionados con el control de velocidad en motores de inducción. Este estudio se refleja en la Tabla 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3, que ofrecen una comparativa de las investigaciones a nivel mundial, en Sudamérica y en Ecuador.

Tabla 3.2. Análisis global de estudios sobre controladores de velocidad

Referencia	Tema	Institución o Revista	Principales contribuciones
[5]	Eficiencia energética de los variadores de velocidad para motores de inducción.	MDPI es una editorial que se especializa en la publicación de revistas académicas de acceso abierto.	La regulación energéticamente eficiente del rendimiento o del modo de funcionamiento, respectivamente, es objeto de esfuerzos específicos. Estos esfuerzos se refieren principalmente a cambios en la velocidad angular del motor, pero también hay una buena cantidad de investigaciones en el área de la distribución racional de la carga, el control del par, los modos de arranque mejorados, etc.
[6]	Increase the Efficiency of an Induction Motor Feed from Inverter for Low Frequencies by Combining Design and Control Improvements.	Instituto de Mecatrónica y Sistemas de Información, Universidad Tecnológica de Lodz, 90-924 Lodz, Polonia.	Para cada uno de estos motores, se investigó el número óptimo de vueltas en serie del devanado del estator de baja frecuencia desde el punto de vista de la eficiencia del motor. Los resultados de los cálculos se obtuvieron con el programa propietario STAT_WIN utilizando el modelo analítico del motor y el método del circuito de campo, mediante el paquete OPERA 2D y se verificaron con los resultados de las mediciones. En general, los resultados se obtienen utilizando un método analítico que permite conversiones rápidas. Como ya se ha mencionado, el método del circuito de campo se utiliza para profundizar en los fenómenos que se producen en el motor. También se utilizó para corregir y verificar la corrección del método analítico (por supuesto, en paralelo con la experimental) en la fase de creación del modelo analítico.

[7]	Analysis of Variable Frequency Drive for Induction Motor using Matlab Software.	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería y Electrónica, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.	La simulación muestra que el uso del VFD reduce significativamente la corriente de arranque. Los picos de corriente de arranque con un VFD se limitan a unos 40 A frente a más de 70 A sin VFD. Esto puede minimizar las pérdidas de potencia durante el arranque del motor, lo que mejorará la eficiencia energética. Hay cambios significativos en el gráfico cuando varía la carga del motor, pero, sin embargo, independientemente de que el motor esté en carga libre, con o sin VFD, la velocidad del motor se mantiene en torno al mismo valor. La velocidad del motor se mantiene alrededor del mismo valor, que en estos casos es de 1480 rpm. Este demuestra cómo el VFD puede controlar la velocidad del motor sin sacrificar la capacidad de carga.
-----	---	--	---

Tabla 3.3. Análisis en Sudamericano sobre controladores de velocidad para motores

Referencia	Tema	Institución o Revista	Principales contribuciones
[8]	Determinación in situ de la eficiencia de un motor eléctrico	Universidad de Buenos Aires (Argentina)	En el laboratorio, se implementaron métodos para calcular la eficiencia de un motor y se compararon con el método directo, que mide la potencia mecánica a partir de la cupla y la velocidad del motor, y luego la compara con la potencia eléctrica. El motor evaluado tiene una potencia de 1.5 kW, 380 V, 4,4 A, 870 rpm y un factor de potencia de 0,75. Se destacaron dos inconvenientes del método del resbalamiento: la incertidumbre de hasta un 20% en la velocidad nominal y la dificultad de medir la velocidad en máquinas de difícil acceso.
[9]	Desarrollo, simulación e implementación de un banco de prueba para variadores de frecuencia, controlado por drive regenerativo.	Universidad del BIO-BIO De Ingeniería Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica (Chile).	Se realizó la puesta en marcha de un banco de pruebas, ajustando la velocidad nominal de operación a 1400 rpm. Esto se hizo porque operar el variador de frecuencia (VDF) a la velocidad nominal del motor (2850 rpm) provocaba alertas de exceso de velocidad en el variador regenerativo, impidiendo su inicio. Durante la prueba, el VDF alcanzó un torque máximo del 112% de su capacidad, con un consumo de potencia real de 4,64 kW. El motor del VDF regenerativo operó con un 19,5% de su capacidad máxima y regeneró 3 kW de potencia. Para verificar los datos mostrados en la pantalla HMI, se utilizó un analizador de red Fluke-435II, comparando la potencia

del VDF en prueba con los datos del instrumento, obteniendo un margen de error del 6,8%.

[10]	Modelo, Simulación y Análisis del Variador de Frecuencia SD700 con Frenado Disipativo.	Escuela de Ingeniería Eléctrica de Pontificia Universidad Católica Valparaíso (Chile).	de la	Se investigó el uso del Variador de Frecuencia (VDF) SD700 con control escalar en lazo abierto. Este tipo de control es más sencillo porque se enfoca en mantener constante el flujo magnético mediante la relación "V/F". Las mediciones mostraron que esta condición se cumplía, excepto en frecuencias muy bajas y altas, donde se observó un debilitamiento del flujo magnético debido a las características inherentes del control escalar.
------	--	--	-------	--

Tabla 3.4. Análisis en Ecuador sobre controladores de velocidad

Referencia	Tema	Institución o Revista	Principales contribuciones
[11]	Diseño e Implementación del Sistema de Control para un Motor Trifásico de 1HP, como Parte del Banco de Pruebas para Montaje y Diagnóstico de Fallas.	Escuela Superior Politécnica De Chimborazo	El presente apartado busca comparar los valores entregados por el variador de frecuencia sobre su velocidad angular y los obtenidos mediante un proceso de medición. Cabe mencionar que Siemens no considera el deslizamiento provocado por la carga. En nuestra interfaz propuesta se dispone de un control para el ingreso de la velocidad angular requerida, así como de un visualizador de esta. Donde su deslizamiento, resulta del cálculo entre la velocidad sincrónica y la velocidad nominal que dispone el motor en su placa de datos. Y la expresión resultante es usada para obtener un valor de frecuencia en función a la velocidad angular requerida y de manera análoga su valor de visualización es obtenido de la misma expresión, pero haciendo uso de la frecuencia real de salida filtrada, correspondiente al parámetro r0024.

[12]	Rediseño y Construcción del Módulo de Pruebas de un Variador de Frecuencia y Elaboración de la Guía de Prácticas para su Uso en el Laboratorio de Control de Movimiento	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.	El variador de frecuencia permite controlar las velocidades de motores, tanto en la industria como en entornos didácticos. Se observó que, mediante su uso, se puede reducir el gasto energético hasta en un 60% en comparación con un accionamiento estándar. Además, ofrece funciones como la estabilidad de RPM y la compensación automática del deslizamiento. Durante el desarrollo del proyecto, se logró una buena comunicación y una rápida respuesta en tiempo real tanto con el panel operador como con el control a través del software.
[13]	Implementación de un módulo didáctico para el control de motores trifásicos utilizando el variador de velocidad Micromaster 440	Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico Espe Latacunga	La implementación del protocolo USS para controlar los variadores de velocidad Micromaster 440 con el PLC S7-200 ofrece una significativa reducción de costos en la automatización de sistemas. Esta economía se logra al eliminar la necesidad de módulos de señales adicionales, acortar los tiempos de instalación y puesta en marcha, reducir el riesgo de fallos y permitir el control centralizado de varios motores desde un solo punto.

### 3.2. MOTOR DE INDUCCIÓN

A diferencia de las máquinas asincrónicas que se utilizan normalmente como generadores, estas han encontrado su uso principal como motores, gracias a la simplicidad de su construcción. Hoy en día, el motor asincrónico trifásico es el tipo más comúnmente utilizado para el accionamiento en redes de distribución.

Este tipo de motor cuenta con un rotor que puede ser de dos tipos: a) jaula de ardilla, y b) bobinado. Además, posee un estator con bobinas inductoras trifásicas, que están desfasadas 120° según el Teorema de Ferraris. Al fluir corrientes trifásicas por estas bobinas, se genera un campo magnético giratorio que induce una tensión en el rotor, de acuerdo con la Ley de Inducción de Faraday.

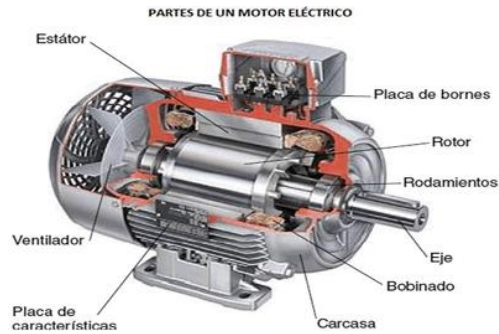


Figura 3.1. Partes del motor de inducción [14].

### 3.2.1. Los motores asíncronos constan de dos partes fundamentales

El estátor es el componente estacionario de una máquina rotativa y uno de los dos elementos esenciales para la transmisión de potencia, en el caso de motores eléctricos, o de corriente eléctrica, en el caso de generadores. El otro elemento clave es su contraparte móvil, el rotor.

Tabla 3.5. Parte del motor: Estator [14].

<p>Devanado trifásico distribuido en ranuras a 120°</p>	<p>Tiene 3 devanados en el estator. Estos devanados están desfasados <math>\frac{2\pi}{3P}</math>, siendo P el número de pares de polos de la máquina.</p>	
---	--	--

El rotor es la parte móvil de una máquina eléctrica, ya sea un motor o un generador, y es responsable de realizar el movimiento de rotación. Junto con su contraparte fija, el estator [14].

Tabla 3.6. Parte del motor: Rotor [14].

<p><b>Bobinado</b></p>	<p>Rotor devanado: Los devanados del rotor son similares a los del estator, aunque no siempre coinciden en el número de fases. Sin embargo, ambos deben tener el mismo número de polos. Estos devanados se conectan a anillos colectores en el mismo eje.</p>	
<p><b>Jaula de ardilla</b></p>	<p>Los conductores del rotor se distribuyen uniformemente en la periferia y sus extremos están cortocircuitados, sin conexión externa. Las ranuras inclinadas mejoran el arranque y reducen el ruido.</p>	

En teoría, si un motor girara sin carga y sin pérdidas, el rotor alcanzaría la velocidad síncrona. Sin embargo, al aplicarse una carga externa, la velocidad del rotor disminuye. Esta reducción es

necesaria para que la corriente inducida, debido a la diferencia de velocidad entre el campo giratorio y el rotor, genere un par electromagnético que equilibre el par de la carga externa [15].

La rotación del eje del motor es expresada por:

$$n_r = \frac{120xf}{p} x(1 - S) \quad (3.1)$$

Donde:

$n_r$ : Rotación del eje del motor (rpm)

f: Frecuencia (Hz)

p: Número de polos

S: Deslizamiento (%)

### 3.2.2. Deslizamiento (S)

El slip es la diferencia de velocidad entre el campo giratorio del estator y el rotor en un motor. Se expresa como un porcentaje basado en la velocidad del campo giratorio. Si el rotor girara a la misma velocidad que el campo del estator, no habría cambio en el flujo magnético y no se generaría par. Por eso, la velocidad del rotor siempre es menor que la del campo giratorio en el funcionamiento del motor [16].

$$S_{\%} = \frac{n_s - n}{n_s} x 100 \quad (3.2)$$

Donde:

$n_s$ : Velocidad síncrona o nominal (rpm)

n: Velocidad del rotor (rpm)

$S_{\%}$ : Deslizamiento

Cuando se aplica una carga mecánica al rotor de un motor, su velocidad disminuye ligeramente. Esta reducción aumenta el deslizamiento, la frecuencia de la corriente en el rotor, su reactancia y la fuerza electromotriz inducida. Como resultado, aumenta la corriente inducida en el rotor y la corriente primaria del estator, lo que mejora el factor de potencia y aumenta la potencia mecánica

producida, demandando más potencia de la línea. A plena carga, el motor de inducción opera con un deslizamiento que equilibra el par desarrollado por el motor con el par resistente de la carga [15].

### **3.2.3. Funcionamiento básico del motor de inducción trifásico.**

El principio de funcionamiento se basa en la Ley de Faraday, la cual establece que al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se genera un campo magnético giratorio conocido como campo rotante. La frecuencia de este campo es igual a la de la corriente alterna que alimenta el motor eléctrico trifásico. En este tipo de equipo, la velocidad del rotor nunca iguala la del campo rotante; si ambas velocidades fueran iguales, no habría inducción y el rotor no produciría par. Esta diferencia de velocidad entre el campo rotante y el rotor se denomina "deslizamiento".

Es fundamental conocer el funcionamiento de un equipo antes de utilizarlo para obtener el máximo rendimiento. Además de entender su operatividad técnica, es crucial evaluar si realmente se ajusta a nuestras necesidades. Familiarizarse con los tipos y clasificaciones del equipo puede ayudar a aclarar cualquier duda que surja. A continuación, se presentan las distintas tipologías disponibles para el motor de inducción trifásico. [17].

### **3.2.4. Arranque de motores asíncronos**

Al encender un motor, el alto voltaje requerido puede provocar una caída de voltaje que afecta el rendimiento del receptor, especialmente si el cable de alimentación no es adecuado. Las normas industriales a veces prohíben el arranque directo de motores con una potencia nominal alta o establecen límites para la corriente de arranque en relación con la tensión. Los motores de jaula son los únicos que se pueden conectar directamente a la red con equipos simples.

#### **Arranque directo**

Este tipo de arrancador permite iniciar el motor de manera sencilla, conectándolo directamente a la línea de alimentación. Al arrancar, el motor produce un par electromagnético máximo, limitando la corriente solo a través de la resistencia del motor. Conforme el motor acelera, la corriente disminuye hasta alcanzar la velocidad nominal. El tiempo necesario para alcanzar esta velocidad depende de la carga máxima, fricción y posible inercia del motor [18].

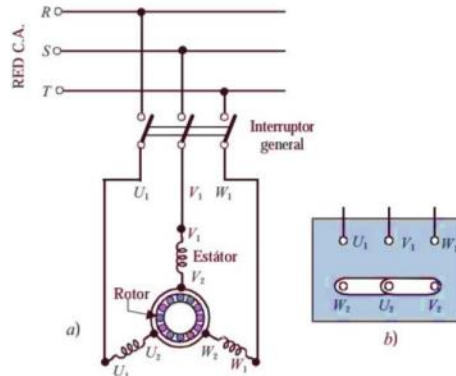


Figura 3.2. Esquema eléctrico del arranque directo [18].

### Arranque en Estrella - Triángulo

Para evitar picos de corriente al arrancar motores trifásicos de jaula de ardilla, el método más común y económico es el arranque estrella-triángulo. Este método arranca el motor en dos etapas: primero, con los bornes conectados en estrella, reduciendo la corriente a un tercio de la nominal. Luego, una vez alcanzada la velocidad y corriente nominales, se conmuta a la configuración triángulo para operar en condiciones normales [19].

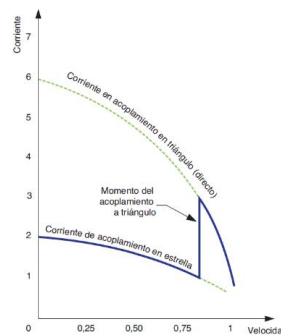


Figura 3.3. Corriente vs velocidad [19].

### 3.3. VARIADOR DE FRECUENCIA

Los variadores de frecuencia son sistemas empleados para regular la velocidad de rotación de un motor de corriente alterna. Los variadores de velocidad, que funcionan de manera similar a los variadores de frecuencia, controlan tanto la velocidad como el flujo de energía suministrada al motor [20].

Los variadores de frecuencia funcionan basándose en el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) depende de la frecuencia de la CA proporcionada y del número de polos en el estator. Esta relación se expresa mediante la fórmula siguiente:

$$RPM = \frac{120 * f}{p} \quad (3.3)$$

Donde:

RPM: Revoluciones por minuto (velocidad sincrónica)

f: frecuencia de suministro desde la red eléctrica (Hertz)

p: Número de polos del motor

En Ecuador, las configuraciones más comunes de motores síncronos y asíncronos incluyen motores con 2, 4, 6 y 8 polos.

El variador de frecuencia ajusta la frecuencia y el voltaje aplicados al motor para controlar su velocidad, previniendo así la saturación del flujo magnético y el aumento dañino de corriente [21].



Figura 3.4. Variador de Frecuencia [22].

### 3.3.1. Control y operación VFD

Constan de dos módulos: uno de control, que gestiona el funcionamiento del variador, y otro de potencia, que suministra energía eléctrica al motor.

**Módulo de control:** Este módulo utiliza un microprocesador para gestionar funciones como configuración, órdenes del operador o del proceso, y datos de medición (velocidad, corriente, etc.). Además, controla las rampas de aceleración y desaceleración, la velocidad y la limitación de corriente mediante señales de control para los componentes de potencia.

**Módulo de Potencia:** Está compuesto principalmente por:

- Componentes de potencia (diodos, transistores, IGBT)
- Interfaces de medida de las tensiones
- En algunos casos un sistema de ventilación

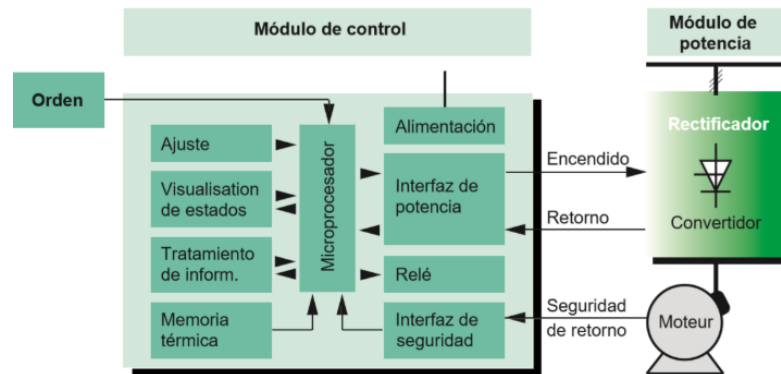


Figura 3.5. Estructura general de un variador de frecuencia [23].

Los componentes de potencia en un módulo de potencia actúan como un convertidor, proporcionando al motor una tensión y frecuencia variables a partir de una entrada fija. Estos componentes son esenciales para ajustar la velocidad del motor [24].

### 3.3.2. Principio de Funcionamiento

El VFD convierte una fuente de alimentación de frecuencia fija (50Hz o 60Hz) en una de frecuencia variable para permitir el ajuste de la velocidad del motor. Su estructura incluye un circuito de control para gestionar el principal, un rectificador para convertir CA en CC, un circuito intermedio para suavizar la salida, y un inversor para transformar la CC de nuevo en CA. El inversor controlado por vectores puede requerir una CPU y circuitos adicionales debido a su complejidad de cálculo [25].

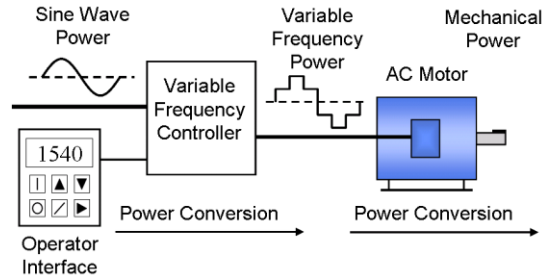


Figura 3.6. Estructura de control del variador de frecuencia [26].

Este tipo de regulador electrónico de velocidad ofrece flexibilidad y control preciso sobre dispositivos eléctricos, con un enfoque particular en la variación de la frecuencia como medio para ajustar la velocidad.

### 3.3.3. Proceso interno del Variador de Frecuencia

Un variador de frecuencia es un regulador industrial que ajusta la energía de la red antes de enviarla al motor, modificando la frecuencia y la tensión según las necesidades del proceso. Reduce la potencia de salida de aplicaciones como bombas o ventiladores al controlar la velocidad del motor, asegurando que no funcione a una velocidad innecesaria [26].

### 3.3.4. Características del variador de velocidad

Los variadores de velocidad ofrecen una serie de características y ventajas que los hacen indispensables en el panorama industrial:

**Ahorro de energía:** Una de las principales ventajas de los variadores de velocidad es su habilidad para ajustar la velocidad del motor según la carga demandada en cada momento.

**Mayor vida útil del equipo:** Los variadores de velocidad permiten arranques y paradas suaves, lo que disminuye el desgaste en los componentes mecánicos y reduce la tensión en el motor y otros elementos, extendiendo la vida útil de los equipos y reduciendo las necesidades de mantenimiento.

**Control preciso:** Los variadores de velocidad ofrecen un control preciso de la velocidad de las máquinas, lo cual es crucial en aplicaciones que requieren ajustes rápidos y suaves, como en mezcla y dosificación [27].

### 3.3.5. Tipos de variadores de velocidad

Existen diferentes tipos de variadores de frecuencia, cada uno diseñado para cumplir con requisitos particulares.

**Variadores de frecuencia de corriente alterna (AC):** Estos son los más utilizados y se aplican en la mayoría de los motores eléctricos.

**Variadores de frecuencia con modulación por ancho de pulso (PWM):** Estos sistemas aseguran un par motor constante mediante la aplicación de pulsos de voltaje de amplitud fija.

**Variadores de frecuencia de vector de flujo con modulación por ancho de pulso:** Estos emplean un microprocesador para gestionar y regular la corriente del motor [28].

### 3.3.6. Ventajas y desventajas de los variadores de frecuencia

#### 3.3.6.1. Ventajas

Implementar un variador de frecuencia en un motor eléctrico requiere coordinar aspectos mecánicos, eléctricos y elementos electrónicos de control, como PLCs.

De forma general las principales ventajas de usar los variadores de velocidad son:

- Reducción del consumo de energía eléctrica: Esto se logra mediante la disminución del pico de par de arranque.
- Extensión de la vida útil de la maquinaria: Al reducir el estrés y el desgaste durante el arranque y operación.
- Aumentar la precisión de control en diversos dispositivos
- Disminuir los costos de mantenimiento y reparación de dispositivos como por ejemplo en su aplicación en bombas de agua.
- Contar con la posibilidad de funciones de PLC básico, y de frenado dinámico.

#### 3.3.6.2. Desventajas

- Instalación, programación y mantenimiento: Estas tareas deben ser llevadas a cabo por personal capacitado y especializado

- El convertidor, formado por semiconductores, cambia rápidamente los circuitos, lo que puede generar variaciones rápidas en corriente o tensión y causar interferencias electromagnéticas en el entorno.
- El convertidor de frecuencia utiliza corrientes no sinusoidales de la red y actúa como un generador de corrientes armónicas
- Reparación de averías del variador: No es posible realizar reparaciones in situ; es necesario enviar el variador al fabricante o a un servicio técnico especializado. Es necesario contar con un variador equivalente o, alternativamente, mantener la instalación fuera de servicio [29].

### **3.3.7. Ahorro energético con variadores de velocidad**

El uso de variadores de frecuencia ofrece importantes ahorros energéticos y mejora la eficiencia del sistema al ajustar la potencia del motor según las necesidades del proceso. Controlan la velocidad del motor y se adaptan a las variaciones en la carga, optimizando las condiciones de operación. Además, permiten un arranque suave, reduciendo la corriente de arranque y ofreciendo un control de velocidad más preciso que un arrancador suave convencional.

Para estimar el ahorro energético de un regulador de velocidad, es crucial entender el proceso industrial donde se instalará. No todos los procesos generan ahorro, especialmente si la demanda de energía no cambia con la velocidad. Es necesario analizar las cargas típicas y su comportamiento para identificar posibles puntos de ahorro.

a) Carga de torque constante

Se denominan cargas de par constante aquellas que mantienen un par resistente uniforme independientemente de la velocidad. Ejemplos de este tipo de cargas incluyen equipos de izaje, cintas transportadoras y bombas de pistón, entre otros [30].

b) Carga de torque cuadrático

El torque variable generalmente se asocia con bombas y ventiladores. Sin embargo, es importante distinguir entre tipos de bombas: las centrífugas, que tienen un torque cuadrático, y las bombas excéntricas de vacío o de desplazamiento positivo, que presentan un torque constante [31].

c) Carga de potencia constante

Este tipo de carga se refiere a situaciones en las que la cantidad de potencia consumida por el sistema se mantiene constante, independientemente de la velocidad del motor. En estos casos, el motor necesita proporcionar una potencia uniforme para realizar su trabajo, lo cual implica que el torque debe ajustarse inversamente a los cambios en la velocidad para mantener constante la potencia de salida.

### **3.4. ESTRATEGIAS DE CONTROL**

El control a lazo abierto del motor de inducción a frecuencia variable es adecuado para aplicaciones con torque estable y sin altas exigencias de velocidad. Sin embargo, para necesidades de respuesta dinámica rápida, alta precisión en la velocidad o control del torque, se requiere un control a lazo cerrado. Esto es necesario cuando el rendimiento dinámico del motor es crucial para el sistema en el que está integrado.

Las técnicas de control de la velocidad del motor de inducción se pueden clasificar en dos categorías:

#### **a) Control Escalar**

Control Voltaje Frecuencia (V/F).

Regulación de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento (también conocido como Control del Deslizamiento).

#### **b) Control Vectorial**

- Control por Campo Orientado (FOC).
- Método Indirecto.
- Método Directo. Control sin Sensores (Speed Control without Sensors).
- Control Directo del Torque (DTC) [32].

#### **3.4.1. Control de Voltaje Frecuencia (V/f)**

Este es el método de control más básico y utilizado, que ajusta la relación entre el voltaje y la frecuencia aplicada al motor para regular su velocidad. Es ideal para aplicaciones sencillas y cargas constantes.

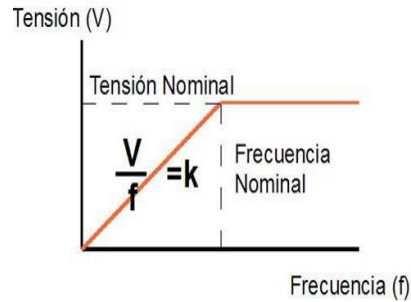


Figura 3.7. Control V/f Lineal [33].

La Relación Lineal Voltaje/Frecuencia: El control V/f lineal mantiene una relación lineal entre el voltaje (V) aplicado al motor y la frecuencia (f) de la corriente de alimentación. Es decir, si la frecuencia aumenta, el voltaje también aumenta proporcionalmente, y viceversa.

Este método es simple y no requiere retroalimentación directa del motor, lo que lo hace relativamente fácil de implementar y menos costoso además No tiene en cuenta la carga aplicada al motor. Cuando la carga aumenta, la velocidad disminuye debido al incremento del deslizamiento, ya que el control no ajusta activamente el voltaje o la frecuencia para compensar la carga adicional.

### 3.4.2. Control Vectorial sin Sensor (Sensorless Vector Control)

En este modo, el VFD calcula la velocidad y la posición del rotor del motor sin necesidad de un sensor de retroalimentación. Proporciona un control más exacto en comparación con el método V/f, y es ideal para aplicaciones que demandan una mayor precisión en la regulación de velocidad y par.

#### Funcionamiento

El control vectorial da lugar a la aparición de una analogía entre la máquina de AC y la máquina de DC con excitación independiente, posibilitando un control independiente (desacoplado) del par y el flujo de la máquina.

El control vectorial se basa en la idea de descomponer las corrientes y tensiones del motor en componentes que pueden ser controladas de manera independiente:

- Eje d (directo): Componente de corriente alineada con el flujo magnético del rotor.
- Eje q (cuadratura): Componente de corriente perpendicular al flujo magnético del rotor, que controla el torque.

El objetivo es controlar el flujo y el torque por separado, lo cual es análogo a controlar un motor de corriente continua, pero aplicable a motores de AC.

En un sistema sin sensores, la posición y velocidad del rotor no se miden directamente, sino que se estiman. Esto se hace usando:

- **Modelo Matemático del Motor:** Utiliza un modelo matemático del motor y de su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. Ajusta el voltaje y la frecuencia de manera más sofisticada, basado en este modelo.
- **Separación de Componentes de Corriente:** El control vectorial separa la corriente del motor en dos componentes: una para la producción de flujo magnético (control de campo) y otra para la producción de par. Esto permite un control más preciso del par y, por ende, de la velocidad.
- **Ausencia de Retroalimentación Directa:** A diferencia del control vectorial con sensor, este método no utiliza retroalimentación directa de la velocidad del motor. Sin embargo, a pesar de la falta de retroalimentación de la posición o velocidad, el control vectorial sin sensor puede estimar la velocidad y ajustar los parámetros del motor para mantener el rendimiento
- **Observadores de Estado:** Métodos matemáticos que estiman variables de estado internas del sistema, como la posición y la velocidad del rotor. Uno de los más comunes es el Observer de Luenberger, que utiliza las mediciones de las corrientes y tensiones del estator para estimar la posición del rotor [34].

#### **3.4.3. Control Vectorial con Sensor (Vector Control with Encoder)**

Incorpora un sensor de retroalimentación, como un encoder, para medir con precisión la posición y velocidad del rotor, lo que facilita un control más exacto. Este sistema es ideal para aplicaciones que requieren alta precisión y manejo de cargas variables.

#### **3.4.4. Control Directo de Par (Direct Torque Control, DTC)**

Este método de control regula el par y la velocidad del motor de manera directa, considerando la carga y las condiciones del sistema. Proporciona un control muy preciso y rápido del motor y es adecuado para aplicaciones que requieren una respuesta dinámica rápida [35].

### 3.5. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO

#### 3.5.1. Lazo abierto

En un sistema de control de lazo abierto, la salida no se mide ni se retroalimenta para compararla con la entrada. Esto significa que la salida no influye en la señal o acción de control. La figura 10 ilustra la implementación de este tipo de sistema.



Figura 3.8. Sistema de Control de Lazo Abierto [36].

En un sistema de control en lazo abierto, los componentes principales son el controlador y el proceso controlado. Se aplica una señal de entrada al controlador, que genera una señal de control para regular el proceso. La variable controlada debe cumplir con ciertas especificaciones. En sistemas simples, el controlador puede ser un amplificador o filtro, mientras que en sistemas complejos puede ser una computadora o microprocesador.

En los sistemas de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por lo tanto, cada entrada de referencia produce una condición de operación predefinida.

Los sistemas de control en lazo abierto son económicos pero inexactos y no responden a perturbaciones. Son útiles solo cuando la relación entre entrada y salida es conocida y no hay perturbaciones significativas [36].

Para este estudio, se decidió utilizar un sistema de control de lazo abierto debido a su simplicidad de implementación y a la menor cantidad de componentes y configuraciones adicionales requeridas en comparación con un sistema de lazo cerrado. Un sistema de lazo abierto se caracteriza por la ausencia de retroalimentación directa desde el proceso al controlador. Esto significa que el variador de frecuencia ajusta la velocidad del motor de inducción basándose únicamente en las entradas predefinidas, sin realizar ajustes automáticos en respuesta a las variaciones de carga que se le aplican al motor.

##### 3.5.1.1. Ventajas y desventajas del sistema

##### Ventajas del sistema

- Simple construcción y fácil mantenimiento.
- Más asequible que un sistema de circuito cerrado equivalente.
- No hay problema de estabilidad.
- Cuando es complicado o costoso medir las salidas del sistema de manera precisa, el control en lazo abierto puede ser preferible, ya que no requiere retroalimentación de la salida.

### Desventaja del sistema

- Perturbaciones y cambios en la calibración causan errores, y la salida puede ser diferente de aquella deseada.
- Para mantener la calidad requerida en la salida, se hace necesario recalibrar de vez en cuando [37].

### 3.5.2. Sistema de lazo Cerrado

En los sistemas de control de lazo cerrado, la salida se realimenta y compara con la entrada de referencia. Se envía una señal de control proporcional a la diferencia entre entrada y salida para reducir el error y corregir la salida.

Un sistema de control de lazo cerrado utiliza la señal de salida para influir directamente en la acción de control. La diferencia entre la entrada y la salida, conocida como señal de error, se usa para ajustar el sistema y alcanzar el valor deseado.

El concepto de lazo cerrado se refiere a la utilización de retroalimentación negativa con el fin de minimizar el error en el sistema. La Figura 13 muestra la relación entrada-salida de un sistema de control de lazo cerrado.

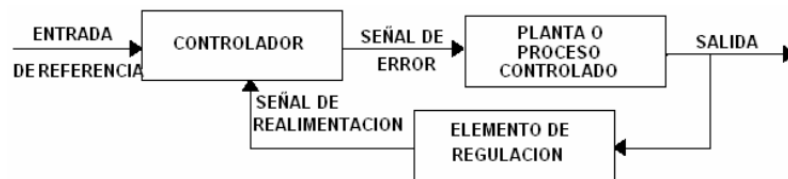


Figura 3.9. Sistema de control con retroalimentación [36].

#### 3.5.2.1. Ventajas y desventajas del sistema

##### Ventajas del sistema

- Al utilizar la realimentación, los sistemas de lazo cerrado ajustan continuamente la salida para minimizar el error, lo que resulta en una mayor precisión.
- Estos sistemas pueden adaptarse a cambios en la carga o condiciones externas, ya que ajustan automáticamente la acción de control en respuesta a las variaciones detectadas.
- La señal de error permite corregir desviaciones y mantener la salida en el valor deseado, lo que es beneficioso para mantener un rendimiento constante.
- Pueden mejorar la estabilidad del sistema al ajustar dinámicamente la salida en función de las perturbaciones.
- Las perturbaciones externas y las variaciones en el proceso son mitigadas, ya que el sistema ajusta la salida para contrarrestar estos efectos.

#### **Desventajas del sistema**

- Estos sistemas son más complejos de diseñar y mantener debido a la necesidad de sensores y mecanismos de realimentación.
- La implementación de sistemas de lazo cerrado puede ser más costosa debido a la necesidad de componentes adicionales como sensores y controladores.
- Pueden tener tiempos de respuesta más lentos en comparación con sistemas más simples, ya que la corrección del error requiere tiempo para medir y ajustar la salida.
- Si no se diseñan adecuadamente, los sistemas de lazo cerrado pueden experimentar oscilaciones o inestabilidad debido a la retroalimentación.
- Requieren un mantenimiento más frecuente para asegurar que los sensores y otros componentes de realimentación funcionen correctamente [36].

### **3.6. VARIADORES UN APOORTE A LA EFICIENCIA EN LA INDUSTRIA**

Los motores eléctricos representan alrededor del 50% del consumo global de energía eléctrica, y en aplicaciones industriales, este porcentaje puede ser aún mayor, entre el 65% y el 75%. La eficiencia de los motores de inducción se ve afectada principalmente por las pérdidas en el cobre, que aumentan cuando el motor opera a carga parcial, desperdiciando energía. Los mayores ahorros se observan en motores con altas pérdidas, especialmente en motores pequeños que operan fuera de sus condiciones óptimas de voltaje o frecuencia.

### **3.6.1. Acerca de la eficiencia energética**

La eficiencia energética se refiere a usar menos energía para lograr el mismo resultado. En fábricas, esto significa que realizan actividades como transporte, envasado o generación de vapor frío utilizando menos energía, lo que reduce el consumo total para producir el producto terminado.

### **3.6.2. La clave está en los variadores**

Los motores de inducción de alta potencia pueden alcanzar hasta un 95% de eficiencia a máxima carga, pero esta eficiencia disminuye con cargas reducidas. El uso de variadores de frecuencia ayuda a mantener la eficiencia al ajustar la frecuencia y el torque del motor para que opere en su punto más eficiente, sin importar la carga. El ahorro de energía también depende del tipo de carga, que se clasifica en aplicaciones de torque variable y constante [38].

## **4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS**

Este capítulo describe la metodología y los procedimientos implementados en la investigación sobre la comparación de variadores aplicados a un motor de inducción con dos controles, evaluando la eficiencia energética y la capacidad de recuperación de velocidad ante variaciones de carga. Se presentan los fundamentos teóricos que respaldan la metodología.

En la Sección 4.1 se especifican las tareas a realizar durante el desarrollo de la investigación. La Sección 4.2 describe los materiales utilizados para la obtención de datos, explicando su relevancia y aplicación en el contexto del estudio. La Sección 4.3 detalla el diagrama de flujo a seguir. La Sección 4.4 proporciona los datos técnicos del motor. En la Sección 4.5 se describe el proceso de selección de los variadores. La Sección 4.6 presenta el diagrama de conexión. La Sección 4.7 explica la configuración de parámetros en los variadores. La Sección 4.8 detalla el proceso de obtención de datos, y finalmente, la Sección 4.9 realiza el análisis de resultados.

### **4.1. GESTIÓN DE TAREAS**

El proceso metodológico de esta investigación comienza con una exhaustiva revisión de trabajos previos relacionados con el uso de variadores de frecuencia para el arranque de motores asíncronos. Se realiza una comparativa de las ventajas y desventajas de diferentes configuraciones y métodos de control, enfocándose en los controles V/f lineal y control vectorial sin sensor. Posteriormente, se seleccionan las marcas de variadores de frecuencia más adecuadas para el estudio, basándose en un examen detallado de la documentación técnica de cada dispositivo, asegurando que sean comparables entre sí. A continuación, se establecen los rangos específicos de variación de carga que se aplicarán a diferentes frecuencias. Paralelamente, se utiliza un tacómetro para recoger datos precisos sobre la velocidad de los motores, con el objetivo de determinar qué tipo de control es más eficiente en un motor de inducción. Finalmente, con los datos recopilados se generan gráficas que muestran el comportamiento de cada control de los variadores bajo diferentes condiciones de carga variable a diferentes revoluciones, estas gráficas son esenciales para el análisis comparativo y la presentación de los resultados de la investigación.

## 4.2. MATERIALES

Tabla 4.7. Característica de los Materiales.

Material	Descripción	Gráfico
Módulo de acción de carga	Es un sistema de poleas acoplado a un motor de inducción de 0.5 HP, diseñado para manejar cargas variables de 0 a 25 kg, con un sistema de poleas para ajustar la carga. Este motor tiene una potencia de 0.40 kW y una corriente de 1.9 A. El diseño del sistema permite no solo la variación precisa de la carga, sino también la regulación de la tensión adecuada de la correa.	
Variador de frecuencia iNVT GD10	El IVNT G10-1R5G-S2-B es un variador de frecuencia de 1.5 kW y 230V (monofásico). Ofrece control V/F y control Multipunto, con capacidad de sobrecarga del 150% durante 60 segundos y una frecuencia de salida de 0.1 Hz a 400 Hz. Incluye protección contra sobrecarga, sobrevoltaje, subtensión y sobre temperatura, comunicación RS485, funciones de PLC, freno dinámico, ahorro de energía, pantalla LCD/LED y enfriamiento por aire forzado.	
Variador de frecuencia Siemens Micromaster 440	El variador Siemens Micromaster 440 es un inversor de frecuencia diseñado para aplicaciones industriales que requieren un control preciso de la velocidad del motor con un rango de potencia: desde 0.4 kW (0.5 HP) hasta 160 kW (281 HP).  Voltajes de Operación: Compatible con voltajes de 1-φ Incluye protección contra sobrecarga, sobrevoltaje, subtensión y sobre temperatura, y dispone de interfaces de comunicación estándar como RS485 y opcionales como Profibus y Ethernet. Cuenta con funciones avanzadas de PLC, pantalla LCD y enfriamiento por aire forzado.	
Tacómetro Digital	Un tacómetro digital es un instrumento que mide la velocidad de rotación de un objeto en revoluciones por minuto (RPM) y muestra la lectura en formato digital. Ofrece precisión en la medición y a menudo incluye características adicionales como almacenamiento de datos, capacidad de comunicación con otros sistemas y funciones de cálculo. Los tacómetros digitales pueden usar sensores ópticos, magnéticos o de contacto para realizar las mediciones y son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, automotrices y de laboratorio para monitorear y controlar la velocidad de rotación de motores y maquinaria.	

### 4.3. DIAGRAMA DE FLUJO

Para realizar esta investigación, se decidió crear un diagrama de flujo, ya que es una herramienta que permite representar visualmente el proceso paso a paso. Esto facilita la comprensión de cada etapa y asegura que se sigan todos los pasos necesarios para llevar a cabo las pruebas correspondientes de manera ordenada y eficiente.

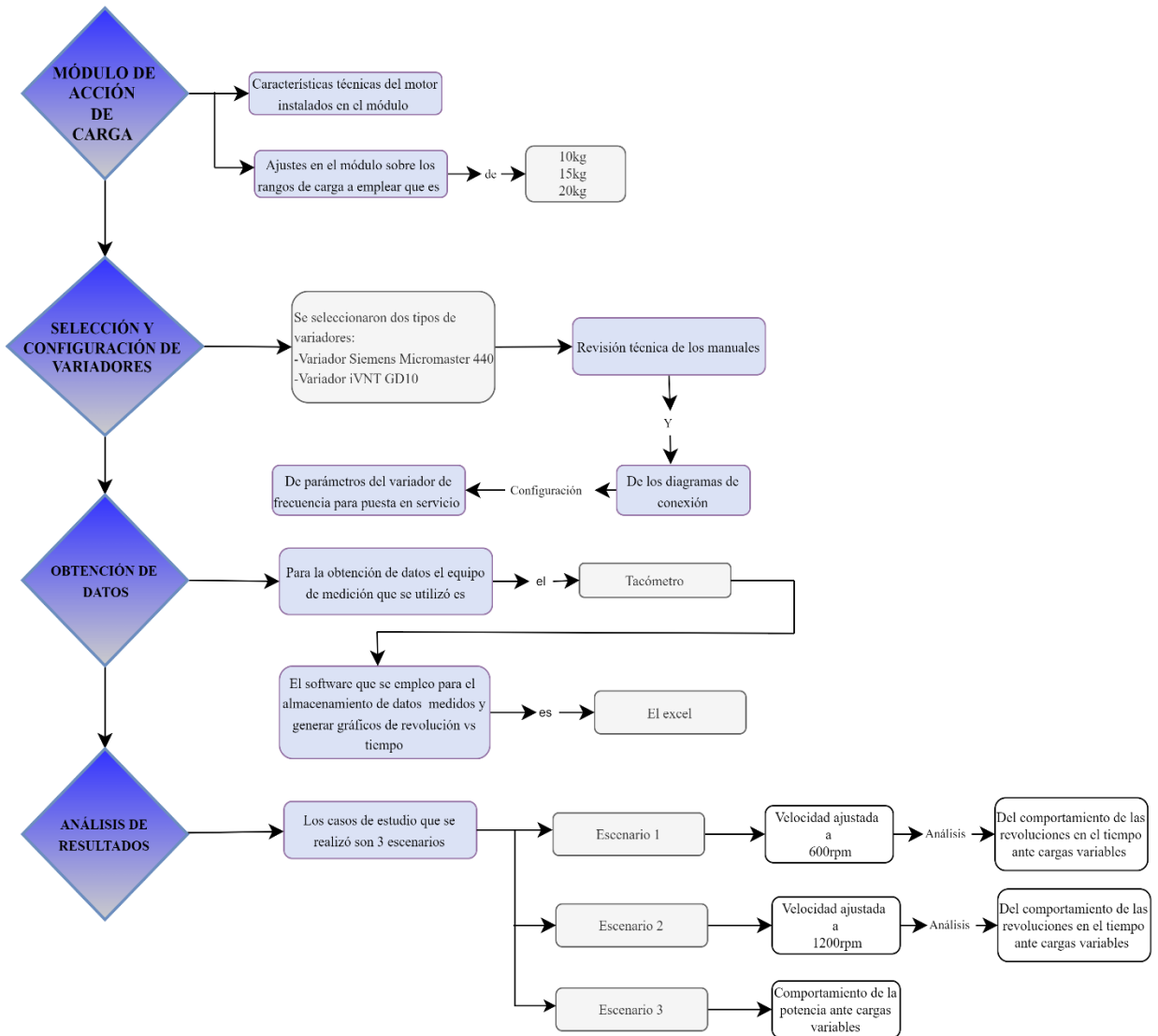


Figura 4.10.Diagrama de Flujo.

#### 4.4. DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR

En la Tabla 4.8, se detalla las características técnicas que posee el motor el cual es necesario para introducir en la configuración de los parámetros del variador.

Tabla 4.8. Características técnicas del motor.

<b>SIEMENS</b>	<b>3-Motor 1LA7 070-4YA60</b>	
	0,5/0,4	HP/Kw
<b>0,71</b>	Form.	Cons.
<b>IP 55</b>	220YY - 440Y	V
<b>4,7 Kg</b>	1,9 - 0,95	A
<b>IEC 34</b>	Cos 0,81	1800 rpm

Para los escenarios de pruebas, se consideraron rangos de carga de 10, 15 y 20 kg. Estos rangos se aplican utilizando un módulo de acción de carga, el cual permite variar y ajustar la carga aplicada al motor de inducción. Esto garantizó que las pruebas se realicen bajo condiciones controladas.

#### 4.5. SELECCIÓN DE VARIADORES

Se seleccionó dos marcas de variadores con característica similares para el estudio:

El primer variador que se utilizó para los escenarios de prueba es de la marca Siemens, modelo Micromaster 440 (SINAMICS), sus características eléctricas se detallan en el manual del fabricante [39].

El segundo variador es de la marca iVNT, modelo GD10, sus características eléctricas se detallan en el manual del fabricante. Este VFD se encuentra instalado en los módulos de control ubicados en los laboratorios de automatización de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

##### 4.5.1. Manuales de operación

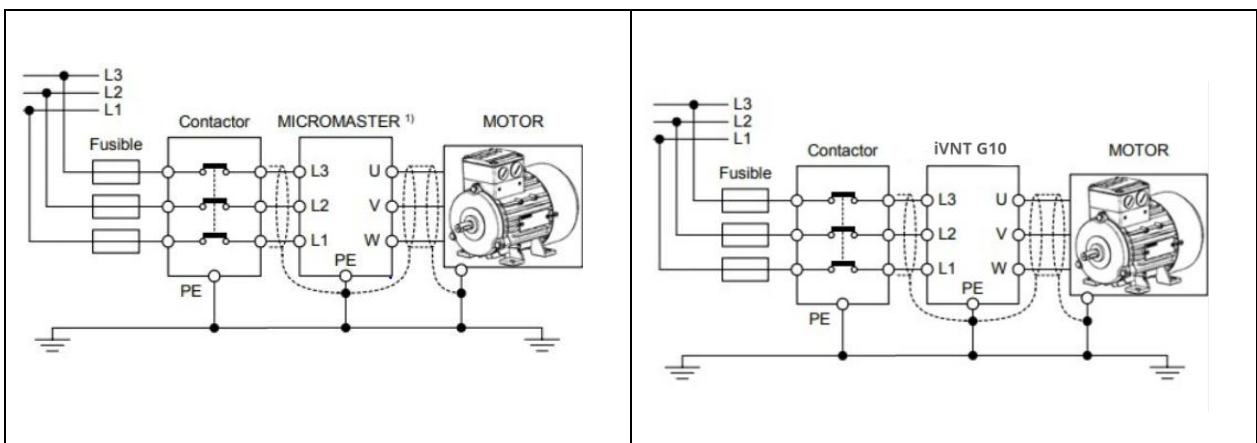
Para la puesta en operación del variador, se siguieron las instrucciones de los manuales técnicos proporcionados por los fabricantes: Siemens [41] [39] e INVT GD10 [40].

En la revisión se enfocó en los tipos de control disponibles en cada variador, como el control V/f y el control vectorial sin sensor.

#### 4.6. DIAGRAMA DE CONEXIÓN

En base al diagrama de conexión de la Tabla 4.9, se procedió a realizar las conexiones para la puesta en funcionamiento del sistema eléctrico. Siguiendo cuidadosamente las indicaciones del diagrama, se verificaron y aseguraron todas las conexiones para garantizar la integridad y seguridad del sistema. Esto incluyó la correcta instalación de cables, terminales y componentes, así como la comprobación de las tensiones y corrientes en cada punto crítico. Además, se realizaron pruebas preliminares para confirmar que el sistema cumplía con los requisitos operativos y de seguridad.

Tabla 4.9. Diagrama de conexión de cada variador [39].



#### 4.7. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Para la configuración de los parámetros, se siguieron las instrucciones de los manuales de cada variador. A continuación, se detallan los parámetros más importantes que se deben configurar.

##### 4.7.1. Parámetros del variador Siemens

En la Tabla 4.10, se detalla los parámetros para establecer los datos de fábrica del variador, y en la Tabla 4.11, se encuentran los parámetros de puesta en servicio.

Tabla 4.10. Reajuste a valores de fábrica [39].

Reajuste de Valores de Fabrica		
Parámetro	Opción	Descripción
P0010	30	Ajustes de Fábrica
P0970	1	Cálculo del motor en base a los datos

Tabla 4.11. Parámetros configurables [41].

Puesta a Servicio Rápido	
--------------------------	--

Parámetro	Opción	Descripción
P0003	3	Nivel de acceso de usuario. (Experto)
P0010	1	Filtro para puesta a servicio. (Guía Básica)
P0100	2	Potencia en kW; Frecuencia Estándar 60Hz
P0205	0	Aplicación del convertidor (Par Constante)
P0300	1	Selección del tipo de motor. (M. Asíncrono)
P0304	220	Tensión nominal del motor. (V)
P0305	1,9	Corriente nominal del motor. (A)
P0307	0,4	Potencia nominal del motor. (kW)
P0308	0,81	Cos Phi nominal del motor.
P0310	60	Frecuencia nominal del motor. (Hz)
P0311	1800	Velocidad nominal del motor. (rpm)
<b>Configuración del modo de control</b>		
P0700	1	Fuente de orden. (BOP/AOP)
P1000	1	Consigna de frecuencia.
P1300	0	Control V/f Lineal
	20	Control vectorial sin sensor
<b>Parámetros Complementarios</b>		
P1080	0	Frecuencia mínima.
P1082	60	Frecuencia máxima.
P1120	0	Tiempo de aceleración.
P1121	5	Tiempo de deceleración.
P3900	2	Fin de puesta a servicio rápido

#### 4.7.2. Parámetros del variador iNVT GD10

En la Tabla 4.12, se detalla los parámetros para establecer la puesta en servicio del variador para el control del motor de inducción.

Tabla 4.12. Parámetros de acceso rápido [40].

<b>Grupo P00_Funciones Básicas</b>		
Parámetro	Opción	Descripción
P00.00	2	Modo de control de velocidad
P00.01	0	Canal de comando de operación por consola.
P00.03	60	Frecuencia máxima de salida.
P00.04	60	Límite superior de frecuencia.
P00.05	0	Límite inferior de frecuencia.
P00.07	0	Ajuste por consola
P00.08	0	Máxima frecuencia de salida
P00.11	0	Tiempo de aceleración.
P00.12	5	Tiempo de deceleración.
P00.13	0	Opera en la dirección por defecto
<b>Grupo P02_Datos del Motor</b>		

<b>P02.01</b>	0,4	Potencia nominal del motor. (kW)
<b>P02.02</b>	60	Frecuencia nominal del motor. (Hz)
<b>P02.03</b>	1800	Velocidad nominal del motor. (rpm)
<b>P02.04</b>	220	Tensión nominal del motor. (V)
<b>P02.05</b>	1,9	Corriente nominal del motor. (A)
<b>P02.26</b>	2	Motor especial para variación de frecuencia
<b>Grupo P04_ Configuración del modo de control</b>		
<b>P04.00</b>	0	Curva V/F lineal.
<b>P04.10</b>	10	Factor de control de la vibración a baja frecuencia
<b>P04.26</b>	1	Ahorro de energía automático en condición de poca carga

#### 4.8. OBTENCIÓN DE DATOS

Para la obtención de datos necesarios para el desarrollo de los escenarios de prueba, se utilizó un equipo de medición capaz de registrar las revoluciones por minuto (RPM) en tiempo real, mediante un tacómetro de alta precisión. Estos datos fueron registrados y almacenados en una base de datos en Excel, facilitando así un análisis detallado del rendimiento del motor bajo diversas condiciones de carga y diferentes esquemas de control.

Después de realizar las conexiones eléctricas entre el variador y el motor, y configurar los parámetros correspondientes del VFD, se ajustaron las velocidades a 600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm.

La prueba comenzó con el variador INVT GD10, configurado con el control V/f lineal y una velocidad ajustada a 600 rpm. Inicialmente, se realizaron mediciones sin carga. Después de un tiempo, se aplicó una carga de 10 kg al motor de inducción, registrando los datos mientras el sistema operaba bajo esta carga. Tras 3 minutos, la carga se incrementó a 15 kg, y después de otros 3 minutos, se aumentó a 20 kg.

Este procedimiento se llevó a cabo también para las velocidades de 1200 y 1800 rpm, aplicando las mismas cargas y manteniendo los mismos intervalos de tiempo. Las mediciones se realizaron cuatro veces para el caso 1, y los resultados se promediaron para generar los datos que se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Base de datos caso 1.

<b>VARIADOR INVT GD10</b>				
<b>CONTROL V/f LINEAL</b>				
<b>CARGA (kg)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>600 r.p.m (20,90 Hz)</b>	<b>1200 r.p.m ( 40,60Hz)</b>	<b>1800 r.p.m (60,00Hz)</b>

<b>0kg</b>	0:00:00	600,9	1200,1	1775,6
	0:20:00	600,8	1199,2	1775,7
	0:40:00	600,3	1198,3	1775,7
	1:00:00	600,5	1199,8	1775,6
<b>10kg</b>	1:20:00	552,4	1155,7	1737,3
	1:40:00	554,1	1157,5	1738,5
	2:00:00	558,4	1163,9	1740,6
	2:20:00	563,1	1165	1744
	2:40:00	563,9	1165,5	1743,7
	3:00:00	565,5	1166,2	1742,8
	3:20:00	565,9	1166,8	1742
	3:40:00	566,4	1167	1743,9
	4:00:00	567,8	1167,5	1742,8
<b>15kg</b>	4:20:00	508,4	1126,2	1700,8
	4:40:00	510,6	1128,5	1701,3
	5:00:00	515,3	1133	1703,7
	5:20:00	516,1	1134	1704,9
	5:40:00	517,3	1134,5	1708,8
	6:00:00	516,5	1136,1	1708,6
	6:20:00	517,9	1136,5	1709,8
	6:40:00	518,5	1135,6	1709,9
<b>20kg</b>	7:00:00	519,1	1136,2	1710,5
	7:20:00	415,7	998,5	1602,2
	7:40:00	412,3	999,2	1603,8
	8:00:00	367,5	1005,6	1608,5
	8:20:00	367,9	1008,7	1612,4
	8:40:00	363,4	1014,6	1615,7
	9:00:00	368,4	1016,4	1623,5
	9:20:00	373,4	1018,6	1622,6
	9:40:00	369,6	1019,1	1624,5
	10:00:00	357,4	1020,8	1625,7

La prueba se realizó con el variador Siemens, configurado con el control V/f lineal y una velocidad ajustada a 600 rpm. Primero, se llevaron a cabo mediciones sin carga. Luego, se aplicó una carga de 10 kg al motor de inducción, registrando los datos mientras el sistema operaba bajo esta carga. Después de 3 minutos, la carga se aumentó a 15 kg, y tras otros 3 minutos, a 20 kg.

Este mismo procedimiento se aplicó para las velocidades de 1200 y 1800 rpm, utilizando las mismas cargas y manteniendo los intervalos de tiempo consistentes. Las mediciones se realizaron cuatro veces para el caso del variador Siemens, y los resultados se promediaron para obtener los datos presentados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Base de datos caso 2.

<b>VARIADOR SIEMENS 440</b>				
<b>CONTROL V/f LINEAL</b>				
<b>CARGA (kg)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>600 r.p.m (21.10 Hz)</b>	<b>1200 r.p.m (40.70 Hz)</b>	<b>1800 r.p.m (60,00Hz)</b>
<b>0kg</b>	0:00:00	600,1	1200	1781,8
	0:20:00	600,2	1201,2	1779,2
	0:40:00	600,4	1200,7	1779,2
	1:00:00	596,9	1200,2	1779,3
<b>10kg</b>	1:20:00	575,3	1179,2	1750,5
	1:40:00	576,5	1180,1	1751,5
	1:59:00	579,3	1186,2	1751,2
	2:20:00	583,5	1186,8	1752,1
	2:40:00	590,7	1187	1752,3
	2:59:00	590,8	1187,2	1752,7
	3:20:00	591,9	1187,4	1753,3
	3:40:00	593,6	1187,4	1753,2
	4:00:00	592,8	1187,2	1752,9
<b>15kg</b>	4:20:00	538,5	1139,1	1713
	4:40:00	539,8	1140,5	1712,5
	4:59:00	545,6	1145,5	1715
	5:20:00	549,4	1146,3	1719,5
	5:40:00	549,5	1147,3	1722,3
	5:59:00	550,2	1147,5	1724,4
	6:20:00	549,9	1147,9	1724
	6:40:00	549,7	1148,2	1726,2
<b>20kg</b>	7:00:00	549,6	1148,6	1725,5
	7:20:00	376,1	1052,2	1658,2
	7:40:00	377,5	1054,4	1668,9
	7:59:00	380,4	1057	1671
	8:20:00	382,9	1059,9	1671,5
	8:40:00	378,7	1060,2	1672,6
	8:59:00	370,1	1060,6	1673,5
	9:20:00	362,3	1061	1676,6
<b>20kg</b>	9:40:00	349,1	1059,5	1676,9
	10:00:00	337,1	1061,6	1677,3

La prueba se realizó con el variador Siemens, configurado con el control vectorial sin sensor, con la velocidad ajustada a 600 rpm. Primero, se llevaron a cabo mediciones sin carga. Luego, se aplicó una carga de 10 kg al motor de inducción, registrando los datos mientras el sistema operaba bajo esta carga. Después de 3 minutos, la carga se aumentó a 15 kg, y tras otros 3 minutos, a 20 kg.

Este mismo procedimiento se aplicó para las velocidades de 1200 y 1800 rpm, utilizando las mismas cargas y manteniendo los intervalos de tiempo consistentes. Las mediciones se realizaron cuatro veces para el caso del variador Siemens, y los resultados se promediaron para obtener los datos presentados en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Base de datos caso 3.

<b>VARIADOR SIEMENS 440</b>				
<b>CONTROL VECTORIAL SIN SENSOR</b>				
<b>CARGA (kg)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>600 r.p.m (20 Hz)</b>	<b>1200 r.p.m (40 Hz)</b>	<b>1800 r.p.m (60,00Hz)</b>
0kg	0:00:00	600,4	1199,4	1778,7
	0:20:00	599,2	1199,5	1777,5
	0:40:00	599,4	1199,2	1778,5
	1:00:00	599,5	1199,7	1777,5
10kg	1:20:00	588	1188,4	1766,2
	1:40:00	590,6	1192,5	1768,9
	2:00:00	594,9	1197	1771,9
	2:20:00	594,6	1194,9	1773,5
	2:40:00	594,1	1193,4	1773
	3:00:00	594,3	1195,5	1773,9
	3:20:00	595,6	1195,6	1773,7
	3:40:00	595,8	1195,8	1773,7
15kg	4:00:00	595,3	1196,2	1773,5
	4:20:00	573,5	1178,6	1752,7
	4:40:00	574,6	1181,4	1754,1
	5:00:00	579,7	1185,5	1760,2
	5:20:00	585,8	1188,6	1763,5
	5:40:00	585,9	1188,8	1766,9
	6:00:00	586	1188,6	1766,6
	6:20:00	586,2	1188,9	1768,3
20kg	6:40:00	586,4	1189,2	1768,6
	7:00:00	586,9	1190,1	1768,5
	7:20:00	561,2	1166,9	1750
	7:40:00	563,4	1167,2	1752,5
	8:00:00	569,1	1170,4	1755,6
	8:20:00	575,6	1177,8	1759,5
	8:40:00	575,8	1177,2	1758,3
	9:00:00	572,7	1177,5	1757,8
9:20:00	574	1177,8	1759,5	
9:40:00	575,4	1178,5	1759,9	
10:00:00	576,2	1181,2	1762,6	

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con diferentes variadores de frecuencia, evaluando su desempeño en sistemas de control con cargas variables aplicadas a un motor asíncrono.

### 5.1. ESCENARIO DE ESTUDIO 1

#### 5.1.1. Carga de 10kg

El análisis de la respuesta ante cargas variables se aprecia en la Figura 5.11, las pruebas se realizaron con un ajuste de las revoluciones a 600 rpm, en donde se aplicó una carga de 10kg al motor de inducción.

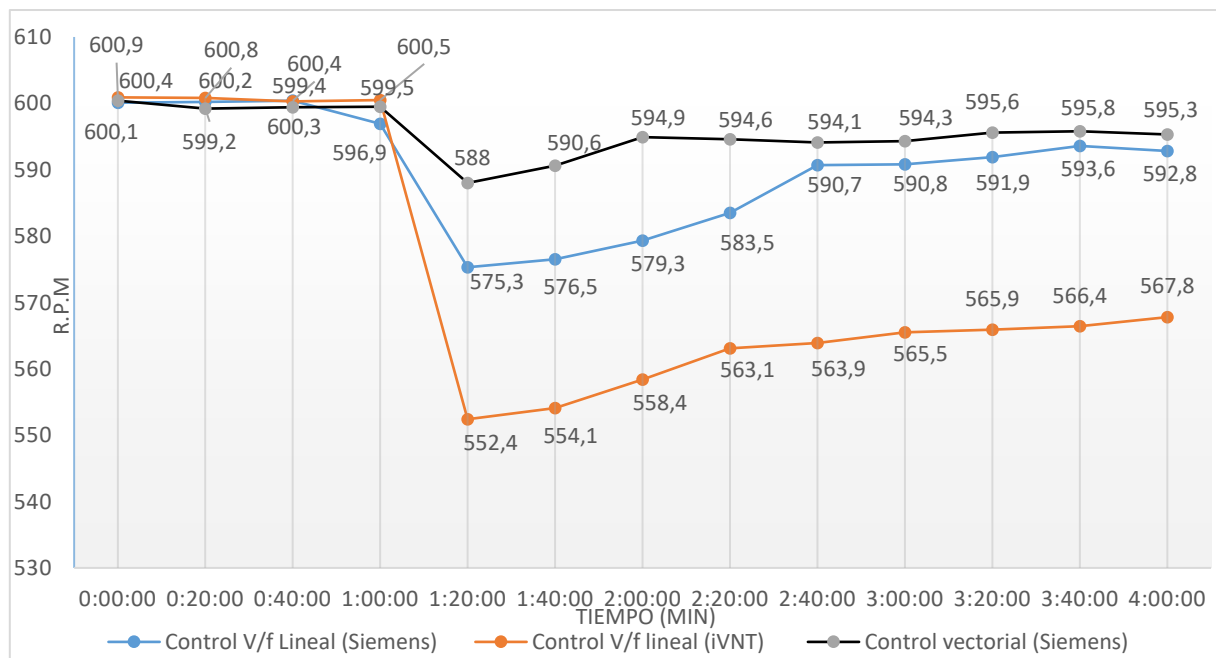


Figura 5.11. Sistemas de control

Con el control V/f lineal del variador iVNT, las revoluciones disminuyen a 552 RPM en 1 min 20 seg al aplicar una carga de 10 kg. En los siguientes 100 segundos, se observa una ligera recuperación hasta 565 rpm, y luego varía ligeramente hasta alcanzar 567 rpm, teniendo un porcentaje de disminución de velocidad del 5,5%. Esto indica que el sistema no ajusta dinámicamente el voltaje y la frecuencia para mantener la velocidad de ajuste de 600 rpm en presencia de carga.

En contraste, el control V/f lineal del variador Siemens también muestra una disminución en las revoluciones a 575 rpm en 1 min 20 seg bajo la misma carga. Sin embargo, la recuperación es algo mejor, ya que en 80 seg la velocidad sube a 590 rpm, y finalmente varía hasta alcanzar 592 rpm, teniendo un porcentaje de disminución de la velocidad del 1.33%. Esto sugiere una ligera mejora en la capacidad de ajuste en comparación con el iNVT.

Por otro lado, el control vectorial sin sensor del variador Siemens inicialmente reduce las revoluciones a 588 rpm en 1 min 20 seg. con la carga aplicada. Posteriormente, en 80 seg, muestra una recuperación más notable, alcanzando 594 rpm, y finalmente varía hasta 595 rpm. Obteniendo un porcentaje reducción de velocidad del 0,83%. Esto se debe a la capacidad del control vectorial para ajustar el voltaje y la frecuencia de manera más eficiente, mejorando la respuesta a cambios de carga a lo largo del tiempo. Aunque no cuenta con retroalimentación, se aproxima más a las 600 rpm ajustadas para la prueba.

Tabla 5.16. Datos del algoritmo de control  
Sistemas de control de los Variadores de frecuencia

Algoritmo de control	Carga (Kg)	Velocidad ajustada (RPM)	Tiempo (s)	Nueva Velocidad (RPM)	% Reducción de las RPM
Control v/f Lineal (Variador iNVT)	10	600	100	567	5,5
Control v/f Lineal (Variador Siemens)	10	600	80	592	1,33
Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)	10	600	80	595	0,83

El control vectorial sin sensor del variador Siemens es el más eficiente de los tres en términos de mantener la velocidad del motor bajo condiciones de carga variable. Su capacidad para ajustar dinámicamente el voltaje y la frecuencia le permite manejar de manera más efectiva los cambios en la carga, resultando en un porcentaje menor de disminución de las revoluciones.

### 5.1.2. Aumento de carga a 15kg

En la Figura 5.12 se observa el comportamiento de las revoluciones del motor de inducción después de aplicar una carga de 15 kg, lo cual provoca una disminución en su velocidad.

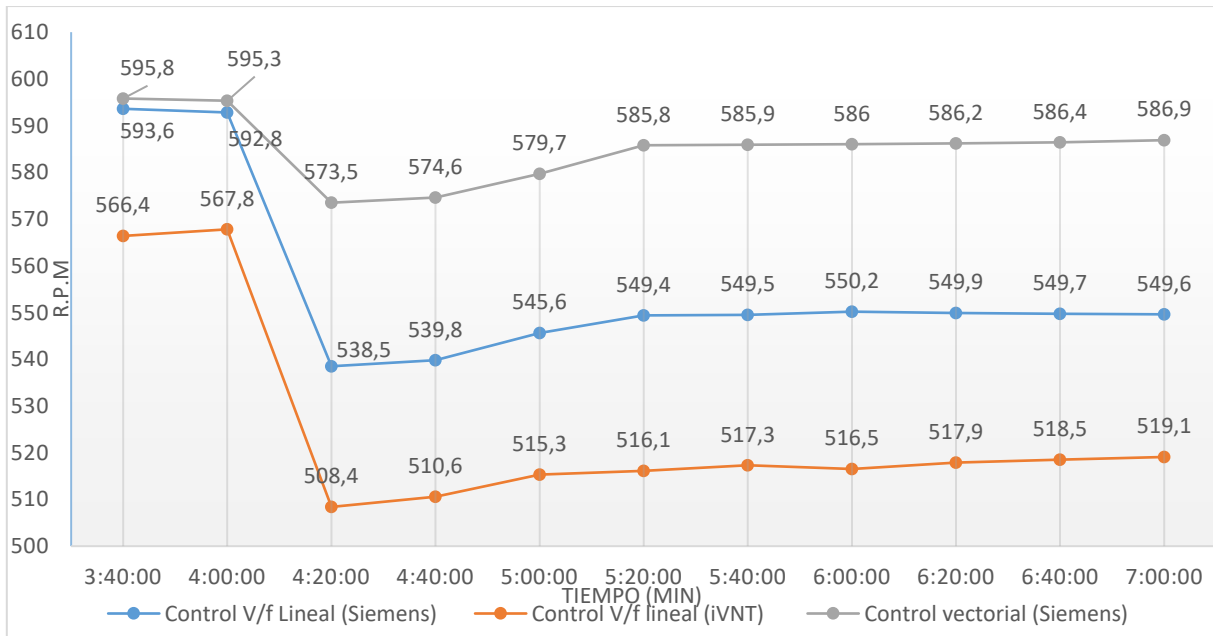


Figura 5.12. Sistema de control

Con la carga de 15 kg aplicada, se observan variaciones más pronunciadas en la velocidad del motor, lo que pone de manifiesto las diferencias en el rendimiento de los distintos métodos de control.

Con el control V/f lineal del variador iNVT, las revoluciones disminuyen drásticamente a 508 rpm en 4 min y 20 seg. Luego, en los siguientes 40 seg, muestran una leve recuperación hasta 515 rpm, y finalmente varían hasta alcanzar 519 rpm, teniendo una reducción de su velocidad del 13.5%, considerablemente alejado de las 600 rpm ajustadas inicialmente. Esto evidencia la limitada capacidad del sistema para ajustar dinámicamente el voltaje y la frecuencia ante cambios de carga.

Por otro lado, el control V/f lineal del variador Siemens también experimenta una caída de la velocidad a 538 rpm en el mismo tiempo de 4 min y 20 seg. No obstante, presenta una recuperación más notable, alcanzando 549 rpm en 60 seg, con un porcentaje de disminución del 8.5%. Esto sugiere una mejor capacidad de ajuste en comparación con el iNVT.

En contraste, el control vectorial del variador Siemens reduce las revoluciones a 573 rpm en 4 min y 20 seg. En los siguientes 60 seg, logra una recuperación hasta 586 rpm, con un porcentaje de disminución de 2.33%. Este comportamiento demuestra una capacidad superior del control vectorial para ajustar el voltaje y la frecuencia, optimizando la respuesta del sistema ante la carga

añadida. A pesar de no contar con retroalimentación, se aproxima más a la velocidad ajustada inicialmente.

Tabla 5.17. Datos de los controles

<b>Sistemas de control de los Variadores de frecuencia</b>					
<b>Algoritmo de control</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Velocidad ajustada (RPM)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Nueva Velocidad (RPM)</b>	<b>% Reducción de las RPM</b>
<b>Control v/f Lineal (Variador iNVT)</b>	15	600	40	519	13,5
<b>Control v/f Lineal (Variador Siemens)</b>	15	600	60	549	8,5
<b>Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)</b>	15	600	60	586	2,33

Comparando con la carga de 10 kg, donde los efectos de la carga eran menos pronunciados, se puede concluir que el control vectorial ofrece un control mucho más robusto y preciso bajo condiciones de carga variables, mientras que los sistemas de control V/f, especialmente el del variador iNVT, muestran limitaciones más claras en su capacidad para mantener la velocidad del motor.

### **5.1.3. Aumento de carga a 20kg**

En la Figura 5.13, se observa el comportamiento de las revoluciones del motor de inducción después de aplicar una carga de 20 kg, lo cual provoca una disminución en su velocidad.

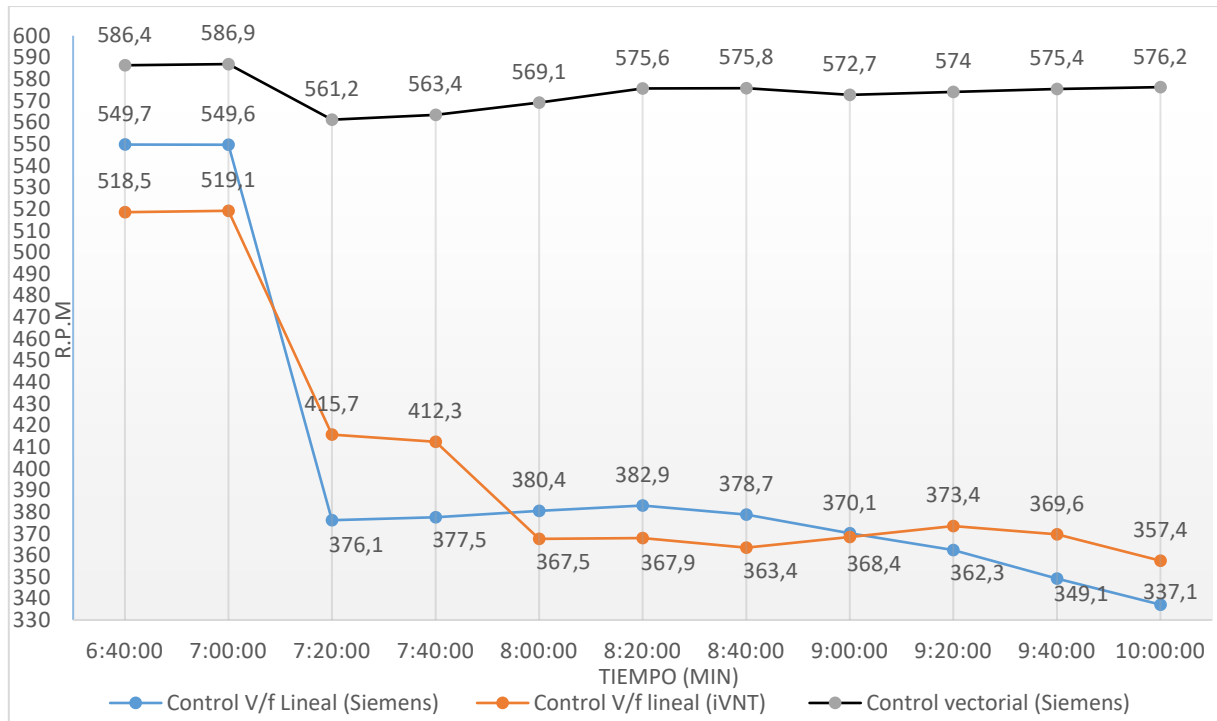


Figura 5.13. Sistema de control

Con la carga de 20 kg, se evidencia una clara distinción en la capacidad de los diferentes métodos de control para gestionar cargas pesadas a bajas revoluciones.

Con el control V/f lineal del variador iVNT, a los 7 min 20 seg, las revoluciones caen dramáticamente a 415 rpm, y continúan disminuyendo hasta una velocidad de 357 rpm en 160 seg, teniendo un porcentaje de disminución 40,5%. Esto indica una incapacidad crítica del sistema para mantener la velocidad bajo cargas pesadas, mostrando una falta de ajuste dinámico del voltaje y la frecuencia.

Por otro lado, el control V/f lineal del variador Siemens presenta una situación similar, con una reducción a 337 rpm teniendo un porcentaje de disminución de 43,8%, reflejando una respuesta insuficiente ante la carga aplicada.

En contraste, el control vectorial del variador Siemens demuestra una capacidad notablemente superior. Después de una disminución inicial a 561 rpm en 7 min 20 seg, muestra una recuperación progresiva, alcanzando los 576 rpm en 100 seg, con un porcentaje de disminución de 4%. El control vectorial destaca por su habilidad para ajustar el voltaje y la frecuencia de manera más eficiente,

manteniendo una mayor estabilidad bajo cargas variables, y se aproxima considerablemente a las 600 rpm ajustadas inicialmente.

Tabla 5.18. Datos de los controles

Sistemas de control de los Variadores de frecuencia					
Algoritmo de control	Carga (Kg)	Velocidad ajustada (RPM)	Tiempo (s)	Nueva Velocidad (RPM)	% Reducción de las RPM
Control v/f Lineal (Variador iNVT)	20	600	160	357	40,5
Control v/f Lineal (Variador Siemens)	20	600	160	337	43,8
Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)	20	600	100	576	4

Al comparar estos resultados con las cargas variables de 10 kg y 15 kg, se observa que el control V/f del variador iNVT presenta una tendencia consistente a la caída de velocidad sin recuperación significativa debido a las bajas revoluciones ajustadas, especialmente bajo cargas más pesadas, lo que evidencia su limitación en el manejo de variaciones de carga.

El variador Siemens con control V/f también muestra deficiencias, aunque con una recuperación ligeramente mejor en cargas menores, pero insuficiente bajo cargas de 20 kg. Por otro lado, el control vectorial del variador Siemens muestra una ventaja clara en todas las condiciones de carga, manteniendo una mejor estabilidad de la velocidad y una capacidad de recuperación significativa incluso bajo cargas más pesadas.

Este análisis confirma la superioridad del control vectorial en términos de precisión y capacidad de respuesta, especialmente cuando se enfrenta a variaciones de carga importantes, destacando su eficiencia en el ajuste dinámico del sistema para mantener la velocidad deseada.

## 5.2. ESCENARIO DE ESTUDIO 2

### 5.2.1. Carga de 10kg

El análisis de la respuesta ante cargas variables se aprecia en la Figura 5.14, las pruebas se realizaron a una velocidad ajustada de 1200 rpm, en donde se aplicó una carga de 10kg al motor de inducción.

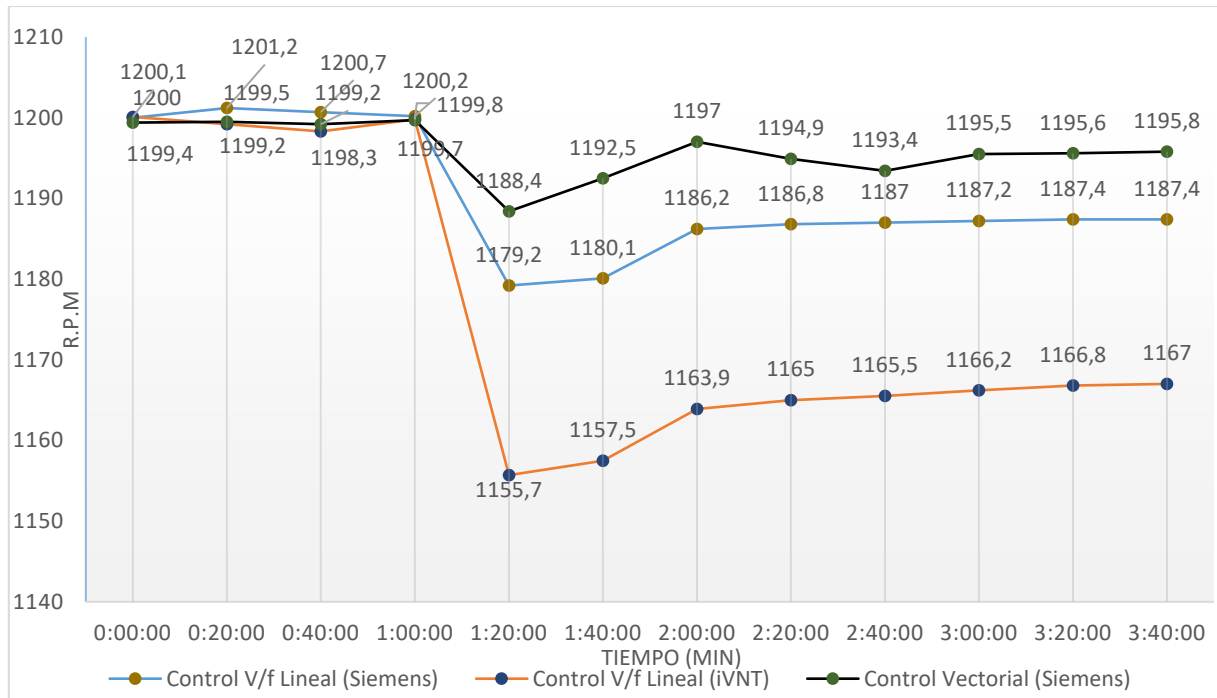


Figura 5.14. Sistema de control

Con el control V/f lineal del variador iNVT, a los 1 min 20 seg las revoluciones disminuyen a 1155 rpm. En los siguientes 80 segundos, se observa una ligera recuperación hasta 1165 rpm, y la velocidad varía hasta alcanzar un nuevo punto de estabilización de alrededor de 1167 rpm, con un porcentaje de disminución 2,75%. Esto indica que el sistema tiene una capacidad limitada para ajustar el voltaje y la frecuencia de manera dinámica y poder llegar a la velocidad de ajuste de 1200 rpm en presencia de carga.

En comparación, el control V/f lineal del variador Siemens presenta una menor caída inicial a 1179 rpm en el mismo tiempo de 1 min 20 seg. Además, en 80seg se produce una recuperación hasta 1187 rpm, teniendo un porcentaje de disminución 1.08%.

Por otro lado, el control vectorial del variador Siemens muestra una respuesta más eficiente. La velocidad inicial se reduce a 1188 rpm en 1 min 20 seg, y en 100seg alcanza 1195 rpm. Esto representa un porcentaje del 0.42%. Esta eficiencia se debe a la capacidad del control vectorial para ajustar el voltaje y la frecuencia de manera más precisa, mejorando la respuesta a cambios de carga a lo largo del tiempo, incluso sin retroalimentación.

Tabla 19. Datos de los controles

Sistemas de control de los Variadores de frecuencia					
Algoritmo de control	Carga (Kg)	Velocidad ajustada (RPM)	Tiempo (s)	Nueva Velocidad (RPM)	% Reducción de las RPM
Control v/f Lineal (Variador iNVT)	10	1200	80	1167	2,75
Control v/f Lineal (Variador Siemens)	10	1200	80	1187	1,08
Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)	10	1200	100	1195	0,42

Comparando estos resultados con los casos de cargas menores, se observa que, aunque todos los sistemas presentan una caída en las revoluciones al aplicar la carga, el control vectorial sin sensor mantiene una mayor estabilidad y capacidad de recuperación.

### 5.2.2. Aumento de carga a 15kg.

En la Figura 5.15, se observa el comportamiento de las revoluciones del motor de inducción después de aplicar una carga de 15 kg, lo cual provoca una disminución en su velocidad.

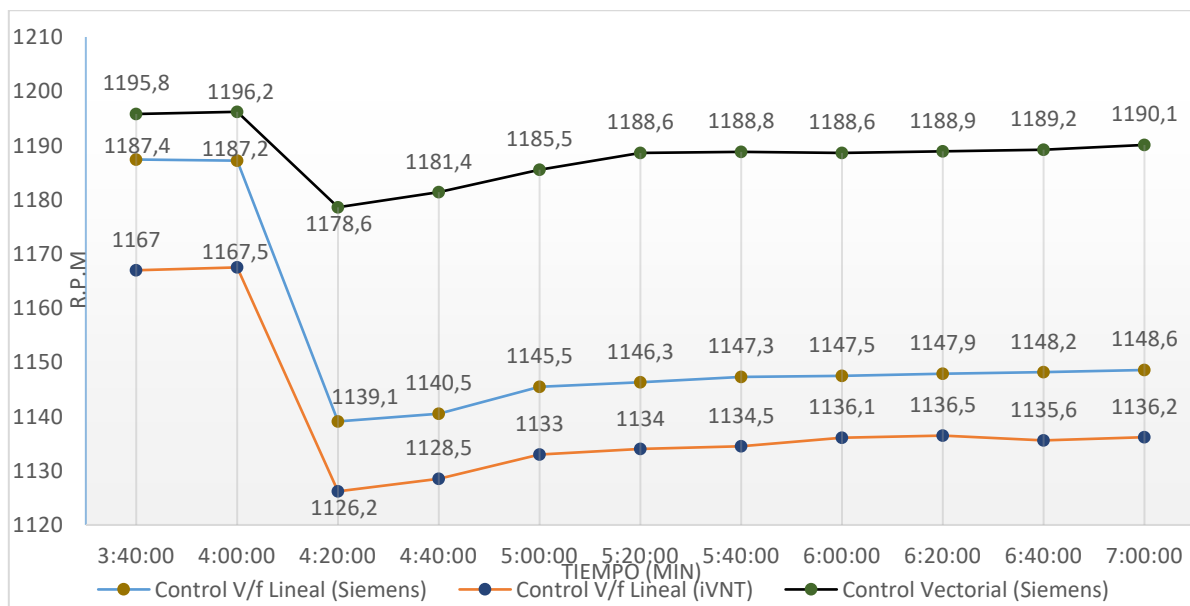


Figura 5.15.Sistema de control

El control V/f lineal del variador iNVT muestra una reducción en las revoluciones hasta 1126 rpm en 4 min 20seg. y una ligera recuperación a 1136 rpm en 60seg, teniendo un porcentaje de

reducción de 5,33%, lo que indica una limitada capacidad de ajuste dinámico del voltaje y la frecuencia para mantener la velocidad bajo cargas elevadas.

En comparación, el control V/f lineal del variador Siemens presenta una menor caída inicial a 1139 rpm en el tiempo de 4 min 20seg. y una recuperación más significativa a 1148 rpm en 100seg, Teniendo un porcentaje de reducción de velocidad de 4,33%, demostrando una mejora relativa en la capacidad de adaptación ante cambios de carga respecto al iNVT.

Por otro lado, el control vectorial del variador Siemens destaca por su eficiencia superior, con una reducción inicial a 1178 RPM en 4 min 20seg. y una recuperación considerable hasta 1188 en 60seg, teniendo un porcentaje de reducción de velocidad del 0,83%. Este comportamiento se atribuye a la capacidad del control vectorial de ajustar el voltaje y la frecuencia con mayor precisión, lo que optimiza la respuesta del sistema a las variaciones de carga, a pesar de la ausencia de retroalimentación directa.

Tabla 20. Datos del sistema de control

<b>Sistemas de control de los Variadores de frecuencia</b>					
<b>Algoritmo de control</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Velocidad ajustada (RPM)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Nueva Velocidad (RPM)</b>	<b>% Reducción de las RPM</b>
<b>Control v/f Lineal (Variador iNVT)</b>	15	1200	60	1136	5,33
<b>Control v/f Lineal (Variador Siemens)</b>	15	1200	100	1148	4,33
<b>Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)</b>	15	1200	160	1190	0,83

Comparando estos resultados con los obtenidos bajo una carga de 10 kg, se observa que, aunque todos los sistemas sufren una disminución en las revoluciones al aplicar la carga, el control vectorial sin sensor se mantiene como la opción más efectiva para minimizar la caída de velocidad.

### **5.3. AUMENTO DE CARGA A 20KG.**

En la Figura 5.16, se observa el comportamiento de las revoluciones del motor de inducción después de aplicar una carga de 20kg, lo cual provoca una disminución en su velocidad.

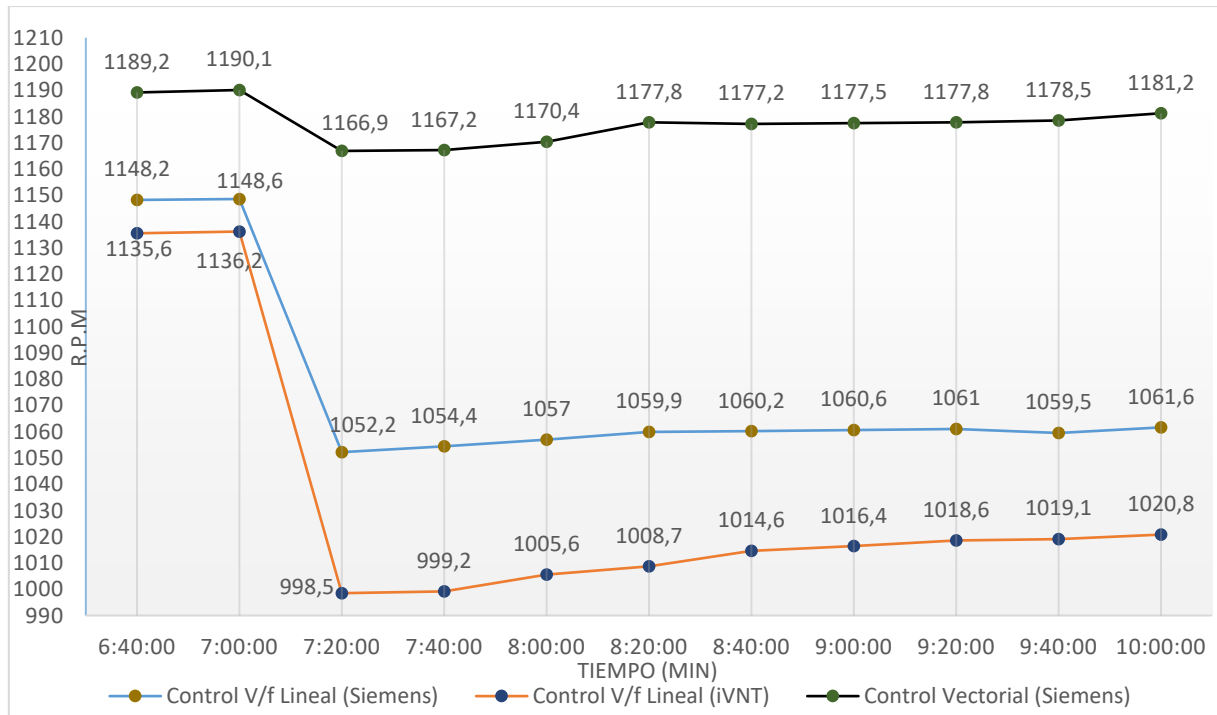


Figura 5.16. Sistema de Control

El control V/f lineal del variador iNVT presenta una reducción significativa en las revoluciones, descendiendo a 998 rpm en 7 min 20seg, con una ligera recuperación hasta 1020 en 140seg, Teniendo un porcentaje de reducción de la velocidad del 15%, lo que sugiere una limitada capacidad de ajuste dinámico del voltaje y la frecuencia para mantener la velocidad ante una carga considerable.

En comparación, el control V/f lineal del variador Siemens muestra una menor disminución inicial a 1052 rpm en 7 min 20 s y se recupera gradualmente a 1061 rpm en un tiempo de 120seg, teniendo una reducción de velocidad del 11.6%.

Por otro lado, el control vectorial del variador Siemens demuestra una eficiencia notable, con una reducción inicial a 1166 rpm y una recuperación significativa hasta 1177 rpm en un tiempo de 100seg, con una reducción de su velocidad del 1.6%. Este comportamiento se debe a la capacidad del control vectorial sin sensor para ajustar el voltaje y la frecuencia de manera más precisa y eficiente.

Tabla 21. Datos del control

Sistemas de control de los Variadores de frecuencia					
Algoritmo de control	Carga (Kg)	Velocidad ajustada (RPM)	Tiempo (s)	Nueva Velocidad (RPM)	% Reducción de las RPM
Control v/f Lineal (Variador iNVT)	20	1200	140	1020	15
Control v/f Lineal (Variador Siemens)	20	1200	120	1061	11,6
Control Vectorial sin sensor (Variador Siemens)	20	1200	100	1181	1,6

En conclusión, el Control V/f Lineal puede tener dificultades para mantener la velocidad a bajas revoluciones con cargas pesadas debido a limitaciones en el ajuste del torque y la potencia mientras que el control vectorial sin sensor ofrece una mejor estabilidad y adaptabilidad en respuesta a cambios en la carga y la velocidad, gracias a su capacidad para ajustar el torque y el flujo del motor de manera más precisa.

Con esto se aprecia que el control vectorial sin sensor es superior en su capacidad para minimizar la caída de velocidad y trata de restablecer al valor nominal, incluso bajo cargas más pesadas, destacándose como la mejor opción entre los métodos de control evaluados para mantener la estabilidad y eficiencia del sistema.

### 5.3.1. Escenario de estudio 3

En este escenario de estudio se observa el comportamiento de la potencia con los diferentes algoritmos de control aplicado a variaciones de cargas.

### 5.3.1.1. Control V/f del variador iNVT GD10

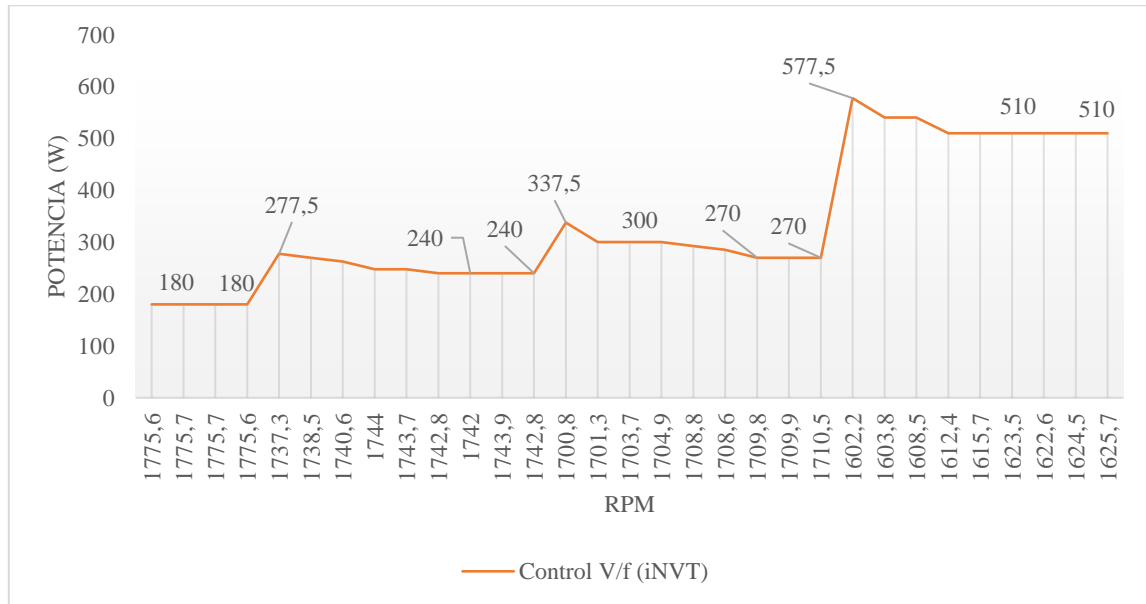


Figura 5.17. Potencia vs RPM

Como se observa en la Figura 5.17, la potencia inicial sin carga a 1775 rpm es de 180 W. Al aplicar una carga de 10 kg, la velocidad disminuye a 1737 rpm, lo que provoca un pico de potencia de 277 W debido a que el motor necesita más torque para compensar esa fuerza. A medida que la velocidad aumenta, la potencia se estabiliza en un rango de 240 W.

Luego, se aplicó una carga de 15 kg, alcanzando un pico de potencia de 337 W. A medida que la velocidad se incrementa, la potencia se estabiliza alrededor de 270 W.

Finalmente, al aplicar una carga de 20 kg, el pico de potencia registrado fue de 577 W, y a medida que la velocidad aumenta, la potencia se mantiene alrededor de 510 W.

### 5.3.1.2. Control V/f del variador Siemens Micromaster 440

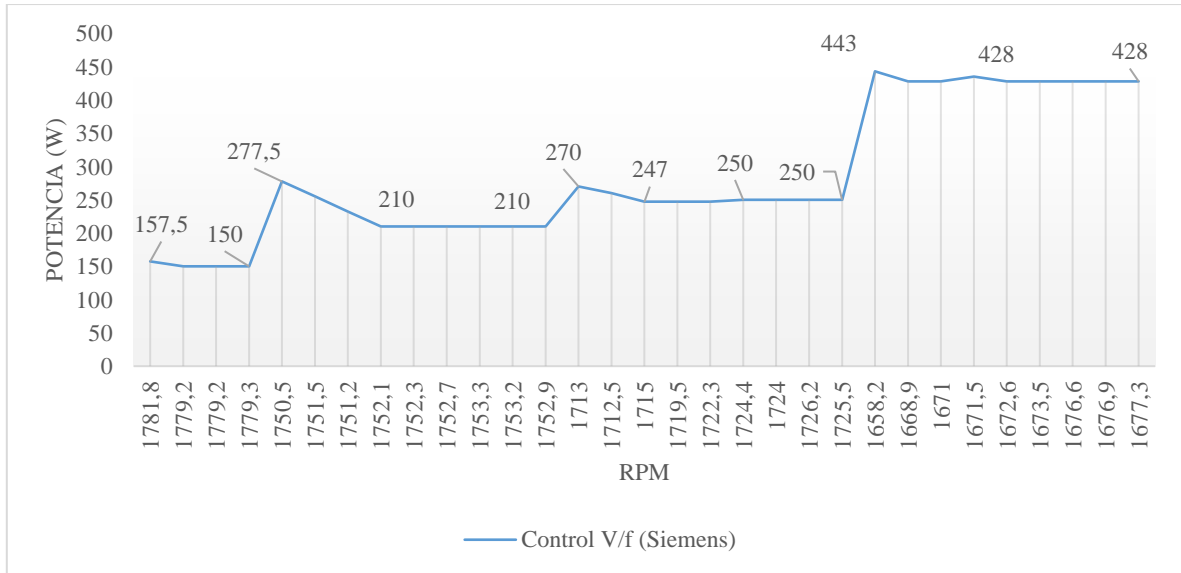


Figura 5.18. Potencia Vs RPM

En el caso del control V/f lineal de Siemens, aunque el consumo de potencia es menor, se considera energéticamente más favorable, pero no tan eficiente, ya que las revoluciones se mantienen por debajo de la velocidad nominal.

**5.3.1.3. Control Vectorial del variador Siemens Micromaster 440**

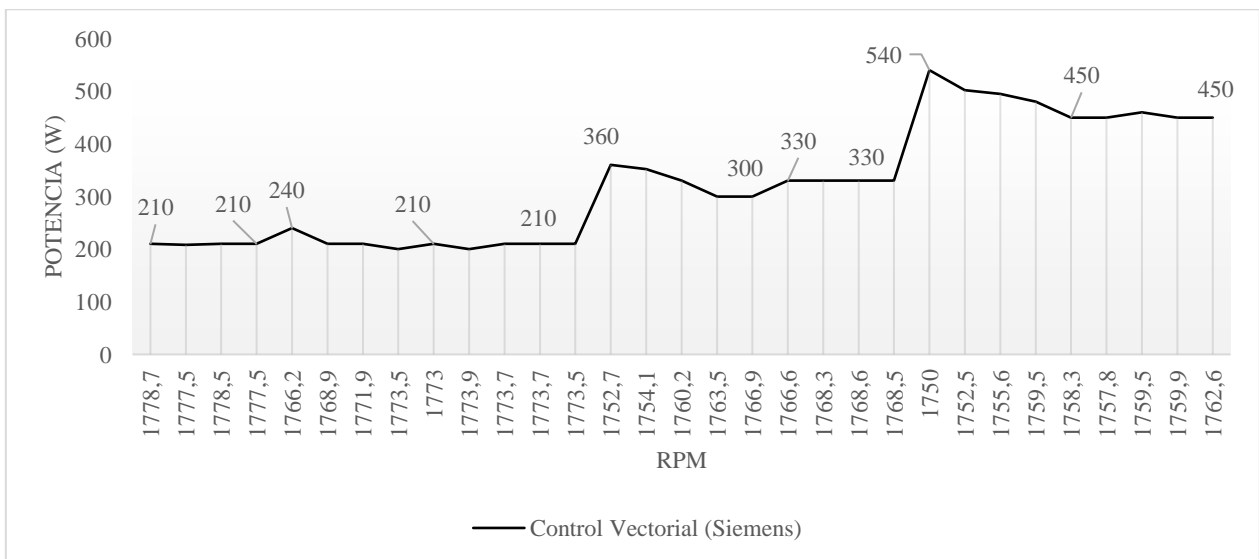


Figura 5.19. Potencia vs RPM

Por otro lado, el control vectorial consume considerablemente más potencia debido a que requiere un par elevado, esto se debe a que el control vectorial ajusta el par de manera precisa para compensar cualquier cambio en la carga, lo que permite que el motor mantenga su velocidad cerca de la nominal, lo que puede considerarse menos eficiente energéticamente. Sin embargo, es más eficiente para el motor, ya que mantiene la velocidad muy cerca de la nominal, asegurando un rendimiento óptimo.

En la Tabla 5.22, se detalla la velocidad y potencia de cada control, se puede evidenciar que cuando la carga se varia a 20kg la potencia aumenta y eso hace que el motor trabaje por encima de su capacidad nominal, esto hace que salte los códigos de error en el variador siemens, este código advierte que existe una sobre temperatura debido a la carga muy alta.

Tabla 5.22. Datos de potencia

Sistemas de control de los Variadores de frecuencia					
Algoritmo de control	Carga (Kg)	Velocidad (RPM)	Potencia W	Potencia Nominal del motor W	Código de alarma
<b>Control v/f (Variador iNVT)</b>	0	1775	180	400	
	10	1742	240	400	
	15	1710	270	400	
	20	1625	510	400	
<b>Control v/f (Variador Siemens)</b>	0	1781	157	400	
	10	1752	210	400	
	15	1725	250	400	
	20	1677	428	400	<b>A0511</b>
<b>Control Vectorial (Variador Siemens)</b>	0	1778	210	400	
	10	1773	210	400	
	15	1768	330	400	
	20	1762	450	400	<b>A0511</b>

Se puede concluir que el control vectorial del variador Siemens es el más eficaz para mantener una velocidad constante bajo diversas condiciones de carga. No obstante, es menos eficiente energéticamente, ya que consume más potencia para mantener las revoluciones cerca del valor nominal. Este método de control resulta especialmente adecuado en aplicaciones donde la estabilidad y la precisión de la velocidad son cruciales.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- La recopilación de información bibliográfica sobre los variadores de frecuencia y sus configuraciones para el control de motores de inducción ha permitido entender en profundidad las diversas estrategias de control, las características técnicas de los variadores y su impacto en el rendimiento de los motores.
- Con una carga de 10 kg, el control V/f redujo la velocidad del motor a 552.2 rpm y se recuperó hasta 567 rpm (una caída del 5.5%), mientras que el control vectorial la redujo a 588 rpm y luego se estabilizó en 595 rpm (una reducción mínima del 0.83%).
- Con una carga de 15 kg, el control V/f cayó a 508 rpm recuperando su velocidad hasta 519 rpm (una disminución del 13.5%), en tanto que el control vectorial descendió a 573 rpm y luego se recuperó hasta 586 rpm (una disminución del 2.33%).
- Con una carga máxima de 20 kg, el control V/f mostró la mayor disminución, reduciendo la velocidad a 357 rpm (una reducción del 40%), mientras que el control vectorial cayó a 561 rpm y luego se recuperó a 576 rpm (una reducción del 4%). Estos resultados evidencian que el control vectorial es más eficaz en mantener la estabilidad y la recuperación de la velocidad del motor frente a variaciones de carga.
- A medida que la carga aplicada al sistema aumenta, la velocidad tiende a disminuir haciendo que los controles actúen incrementado el torque del motor y por ende consuman potencia, de manera que algunos controles son eficientes en el consumo energético y otros sean eficientes en el motor para mantener la velocidad cercana a la nominal.

### 6.2. RECOMENDACIONES

- Invertir en la formación continua de los estudiantes y docentes sobre las últimas tecnologías y prácticas en variadores de frecuencia, asegurando que estén al tanto de las innovaciones y mejoras en el campo industrial.
- Para obtener la base de datos de las mediciones de revoluciones, se recomienda utilizar dispositivos de medición modernos que registren los datos automáticamente y permitan su descarga directa a un ordenador.

- Para optimizar el rendimiento de los motores bajo carga, se recomienda priorizar el uso del control vectorial, así también si se necesita un ajuste más preciso en las revoluciones se opta por implementar el sistema de retroalimentación para un mejor rendimiento del motor.

## 7. REFERENCIAS

- [1] H. G. J. Giovanni, «ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN QUE OPERAN BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE FALLOS».
- [2] F. X. P. Cantuña, «“DISEÑO DE UN ARRANQUE Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA (MIJA), QUE PERMITA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE ENERGÍA DENTRO DE UN PROCESO INDUSTRIAL”».
- [3] L. E. Pilaguano Gavilanez, «Diseño e implementación de un módulo didáctico con variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná, año 2015», bachelorThesis, LA MANÁ / UTC / 2016, 2016. Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/3395>
- [4] E. Tello y E. Ismael, Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UTC\\_955a2c49d474b2494b029d25768ff2db](https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UTC_955a2c49d474b2494b029d25768ff2db)
- [5] P. Dinolova, V. Ruseva, y O. Dinolov, «Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations», *Energies*, vol. 16, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2023, doi: 10.3390/en16207136.
- [6] M. Dems, K. Komez, J. Szulakowski, y W. Kubiak, «Increase the Efficiency of an Induction Motor Feed from Inverter for Low Frequencies by Combining Design and Control Improvements», *Energies*, vol. 15, n.º 2, pp. 530-530, ene. 2022, doi: 10.3390/en15020530.
- [7] M. Z. Hamim, S. Salimin, y A. A. Bakar, «Analysis of Variable Frequency Drive for Induction Motor using Matlab Software», *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 116, n.º 1, Art. n.º 1, abr. 2024, doi: 10.37934/aram.116.1.117129.
- [8] J. P. Robbiano y F. Ferreyra, «de la eficiencia de un motor eléctrico».
- [9] F.- fdo barahona s@gmail com Barahona Suazo y C.- clquevedop@gmail com Quevedo Pérez, «Desarrollo, simulación e implementación de un banco de prueba para variadores de frecuencia, controlado por drive regenerativo», 2016, Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3378>

- [10] R. M. L. Zuleta, «Modelo, Simulación y Análisis del Variador de Frecuencia SD700 con Frenado Disipativo.».
- [11] A. I. N. Estrella, «AUTORES: EDWIN DAVID SACA LLAMBA.».
- [12] U. H. Molina Alvarado y C. C. Cruz Freire, «Rediseño y construcción del módulo de pruebas de un variador de frecuencia y elaboración de la guía de prácticas para su uso en el laboratorio de control de movimiento.», 2012, Accedido: 8 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/8584>
- [13] P. R. Taipanta Serna, «Implementación de un Módulo Didáctico para el Control de Motores Trifásicos utilizando el Variador de Velocidad Micromaster 4.», bachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Electrónica Mención Instrumentación y Aviónica., 2011. Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/7406>
- [14] L. X. A. Suarez, «“VARIADORES DE FRECUENCIA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES ASÍNCRONOS JAULA DE ARDILLA”.».
- [15] «MOTORES ASÍNCRONOS DE INDUCCION». Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.potenciaelectromecanica.com/motores-asincronos-de-induccion/>
- [16] JS TECHNK, «Cálculo de deslizamiento de motores eléctricos!», JS-Technik. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.js-technik.de/es/calculadora-online/calculos-slip/>
- [17] Reptil.mx, «Motor de inducción trifásico», Industrias GSL. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://industriagsl.com/blogs/automatizacion/motor-de-induccion-trifasico>
- [18] T. E. Cando Cando y J. D. Murillo Rivera, «Análisis del comportamiento de un motor asíncrono.», bachelorThesis, Ecuador : Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2023. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/11421>

- [19] «IMPORTANCIA DEL ARRANQUE ESTRELLA TRIÁNGULO – Suiler Altamirano». Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.suileraltamirano.com/contenido-4-importancia-del-arranque-estrella-triangulo/>
- [20] C. G. J. Bismark, «DIRECTOR DEL TRABAJO ING. MEC. RUÍZ SÁNCHEZ TOMÁS ESIQUIO, MSc.».
- [21] J. A. Jacho Toapanta, «Diseño e implementación de una demostración práctica en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas utilizando el Variador de Frecuencia como fuente de ahorro de energía», dic. 2012, Accedido: 8 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/229>
- [22] Softspring, «Chint Electric», Chint Electric. Accedido: 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chint.eu/es/material-electrico/control-y-gestion-de-la-energia/variador-arrancador/serie-nvf5>
- [23] «Introducción al variador de frecuencia. - Formación para la Industria 4.0». Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://automatismoidustrial.com/curso-variadores-de-frecuencia/introduccion-al-variador-de-frecuencia/>
- [24] A. S. Castillo Aldana, C. D. García Bolaños, y Y. J. Pérez Becerra, «Análisis y evolución de los variadores de velocidad para motores de corriente alterna en la industria», 2015, Accedido: 8 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/1968>
- [25] «Estructura básica y clasificación de VFD - noticias de AUBO - noticias - Nanjing Aubo Electric Co., Ltd.» Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vfdcn.com/news/basic-structure-and-classification-of-vfd-39467318.html>
- [26] Iguen, «Variador de Frecuencia ¿Qué es? ¿Cómo funciona?», Tienda online de material para instalaciones. Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iguen.es/blog/como-funciona-un-variador-de-frecuencia/>
- [27] SDI, «Variador de velocidad: Qué es y para qué sirve | SDI». Accedido: 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sdindustrial.com.mx/blog/para-que-sirve-un-variador-de-velocidad/>

- [28] S&P, «Qué es y para qué sirve un variador de frecuencia | S&P», S&P Sistemas de Ventilación. Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/variador-de-frecuencia/>
- [29] «Variadores de Frecuencia. Ventajas y Desventajas – MYG Inc Motores Eléctricos». Accedido: 3 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://motoresygeneradores.com/variadores-de-frecuencia-ventajas-y-desventajas/>
- [30] «Selección del Variador de Frecuencia según la Aplicación – MYG Inc Motores Eléctricos». Accedido: 1 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://motoresygeneradores.com/seleccion-del-variador-de-frecuencia-segun-la-aplicacion/>
- [31] «Variadores: un aporte a la eficiencia en la industria | Editores», Ingeniería eléctrica. Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.editores-srl.com.ar/empresa/danfoss/20220802\\_variadores\\_un\\_aporte\\_a\\_la\\_eficiencia\\_en\\_la\\_industria](https://www.editores-srl.com.ar/empresa/danfoss/20220802_variadores_un_aporte_a_la_eficiencia_en_la_industria)
- [32] F. E. L. Monteagudo, F. B. Ruedas, R. V. Varela, y A. B. Telles, «Estrategias de Control y Ahorro Energético con el Empleo de Variadores de Velocidad», 2018.
- [33] «Funcionamiento de variadores escalar o vectorial - Formación para la Industria 4.0». Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://automatismoindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/d-automatizacion/1-7-arrancadores-electronicos-y-variadores-de-velocidad/funcionamiento-de-variadores-escalar-o-vectorial/>
- [34] S. L. Delorme Diarte, «Análisis comparativo de técnicas de control sensorless de velocidad aplicado a accionamientos polifásicos», master thesis, 2020. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/3953>
- [35] Sistronic, «Aprende con Sistronic No.30 – ¿Cuáles son los modos de control en un variador de frecuencia y cómo seleccionar el mas adecuado? - SISTRONIC», <https://sistronic.com.co/>. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sistronic.com.co/variadores-ac/aprende-con-sistronic-no-30-cuales-son-los-modos-de-control-en-un-variador-de-frecuencia-y-como-seleccionar-el-mas-adecuado/>
- [36] B. E. P. Berenguer, «INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL».

[37] J. Miréz, «C019: Ventajas y desventajas de un sistema de control de lazo abierto...», Matlab/Simulink and Control Theory [Jorge Miréz]. Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://jmirezcontrol.wordpress.com/2011/04/12/c019-ventajas-y-desventajas-de-un-sistema-de-control-de-lazo-abierto/>

[38] «danfoss\_20220802\_variadores\_un\_aporte\_a\_la\_eficiencia\_en\_la\_industria.pdf». Accedido: 2 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.editores.com.ar/sites/default/files/danfoss\\_20220802\\_variadores\\_un\\_aporte\\_a\\_la\\_eficiencia\\_en\\_la\\_industria.pdf](https://www.editores.com.ar/sites/default/files/danfoss_20220802_variadores_un_aporte_a_la_eficiencia_en_la_industria.pdf)

[39] «440\_OPI\_sp\_1202.pdf». Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/893/14346893/att\\_62907/v1/440\\_OPI\\_sp\\_1202.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/893/14346893/att_62907/v1/440_OPI_sp_1202.pdf)

[40] «GD10\_Spanish.pdf». Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://universalmotors-group.es/files/GD10\\_Spanish.pdf](https://universalmotors-group.es/files/GD10_Spanish.pdf)

[41] «440\_PLI\_sp\_1202.pdf». Accedido: 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/027/14347027/att\\_62998/v1/440\\_PLI\\_sp\\_1202.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/027/14347027/att_62998/v1/440_PLI_sp_1202.pdf)

## 8. ANEXOS

### 8.1. ANEXO 1

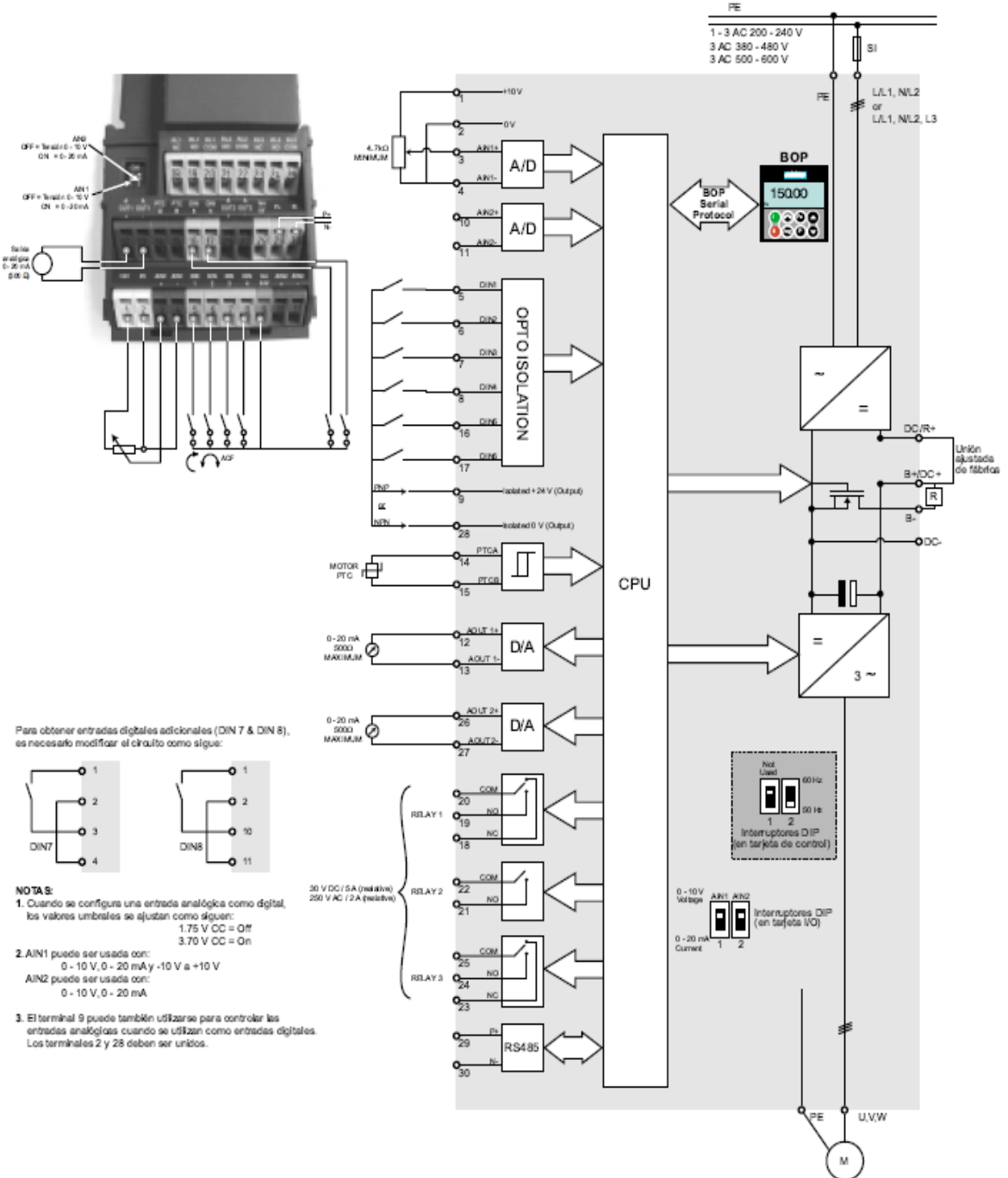


Figura 8.20. Diagrama de bloques siemens

8.2. ANEXO 2

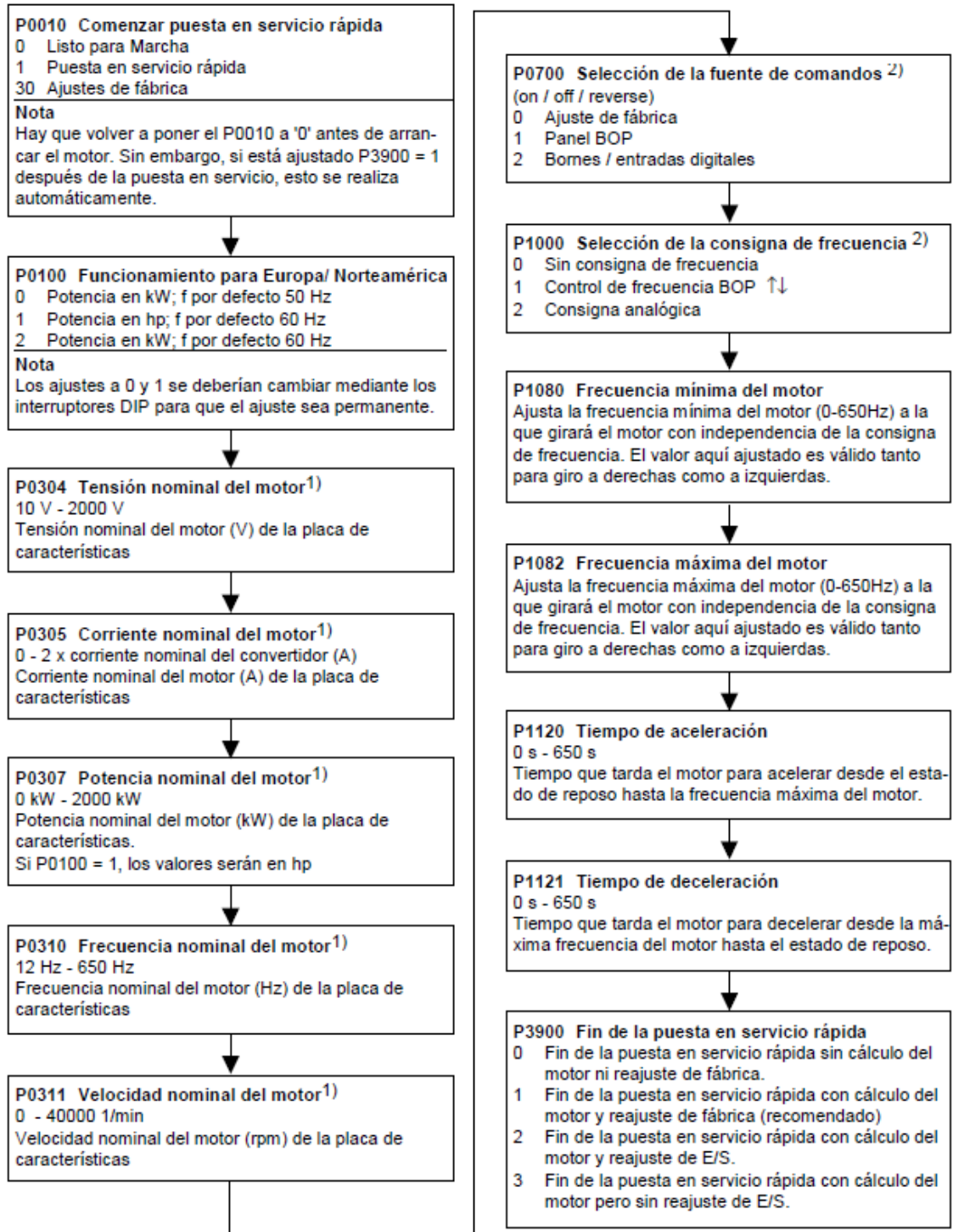


Figura 8.21. Organigrama de puesta en servicio rápida

8.3. ANEXO 3

Variador de frecuencia iNVT.

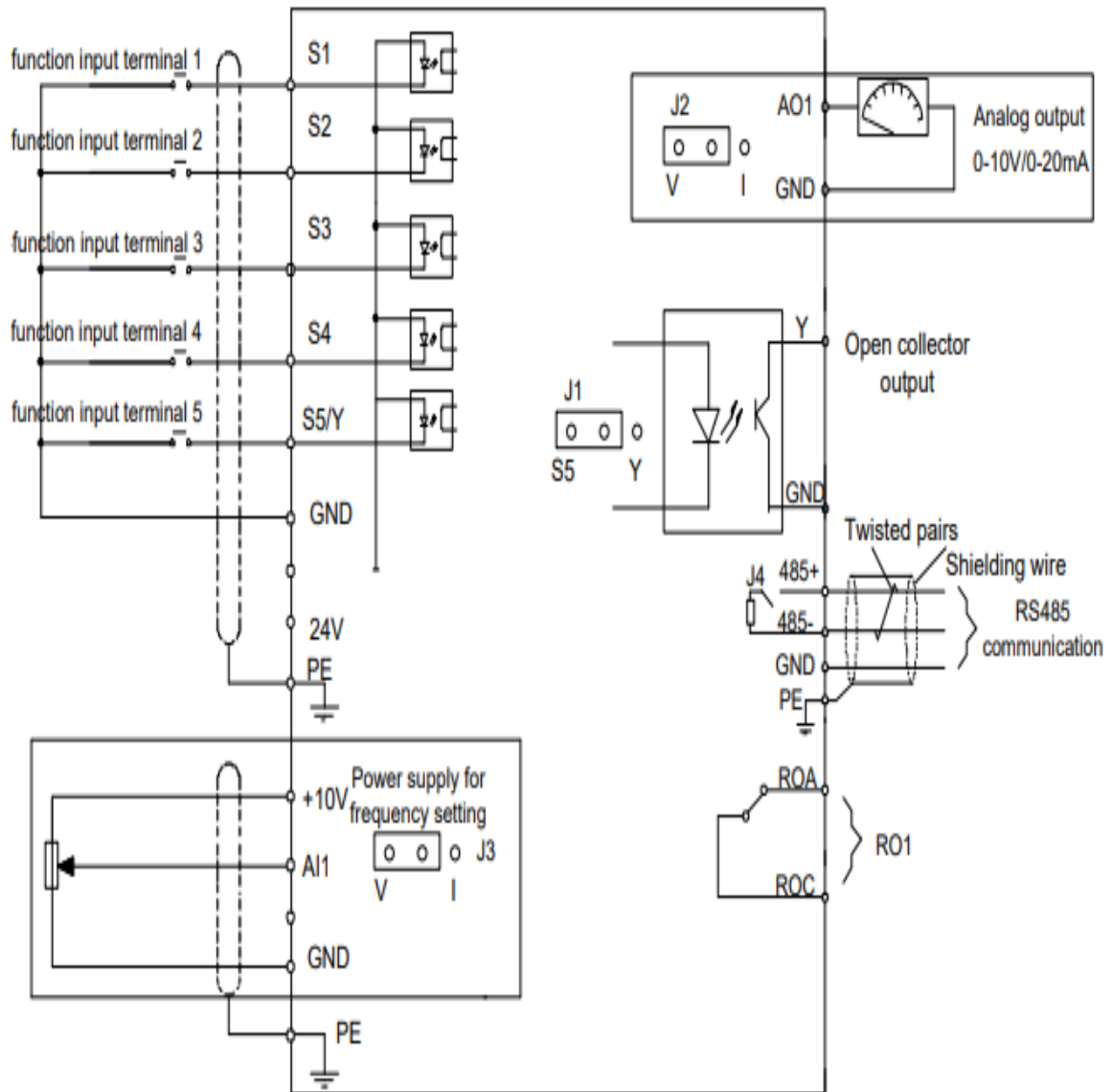


Figura 8.22. Diagrama del sistema de control

8.4. ANEXO 4

Velocidad ajustada a 600 rpm con cargas de 10, 15 y 20kg.

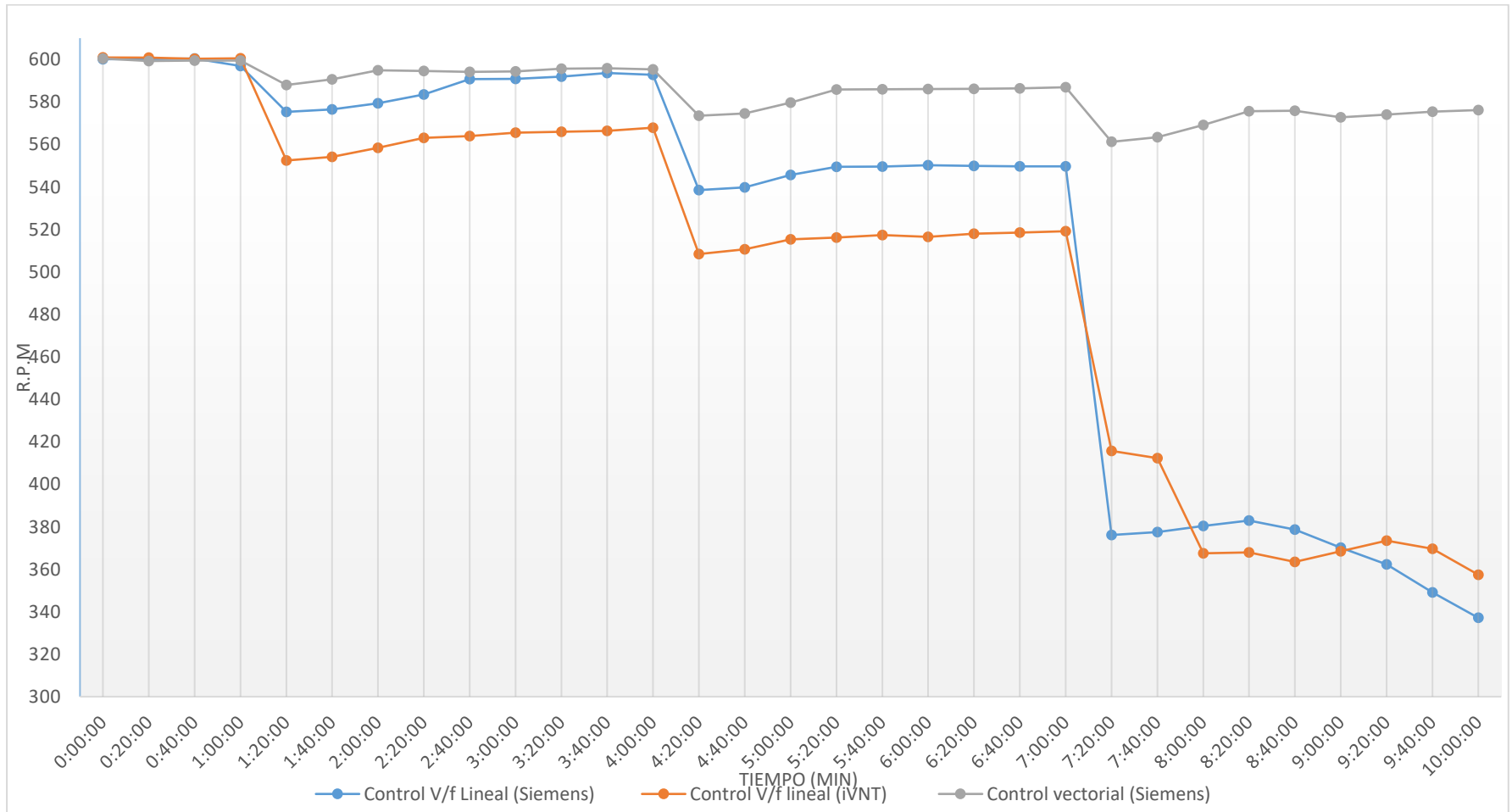


Figura 8.23. Velocidad ajustada a 600

8.5. ANEXO 5

Velocidad ajustada a 1200 rpm con cargas de 10, 15 y 20kg.

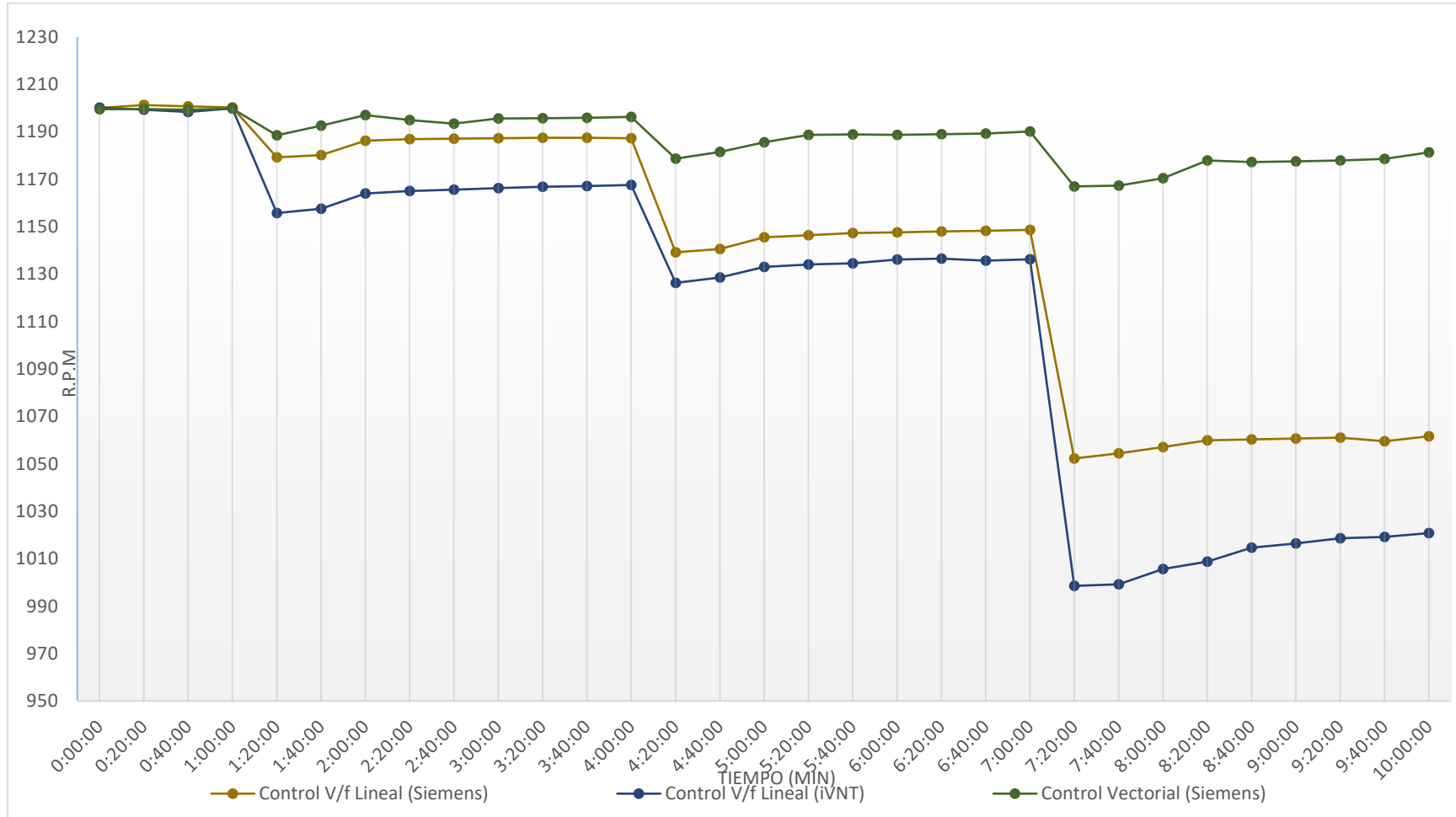


Figura 8.24. Velocidad ajustada a 1200 rpm

8.6. ANEXO 6

Velocidad ajustada a 1800 rpm con cargas de 10, 15 y 20kg.

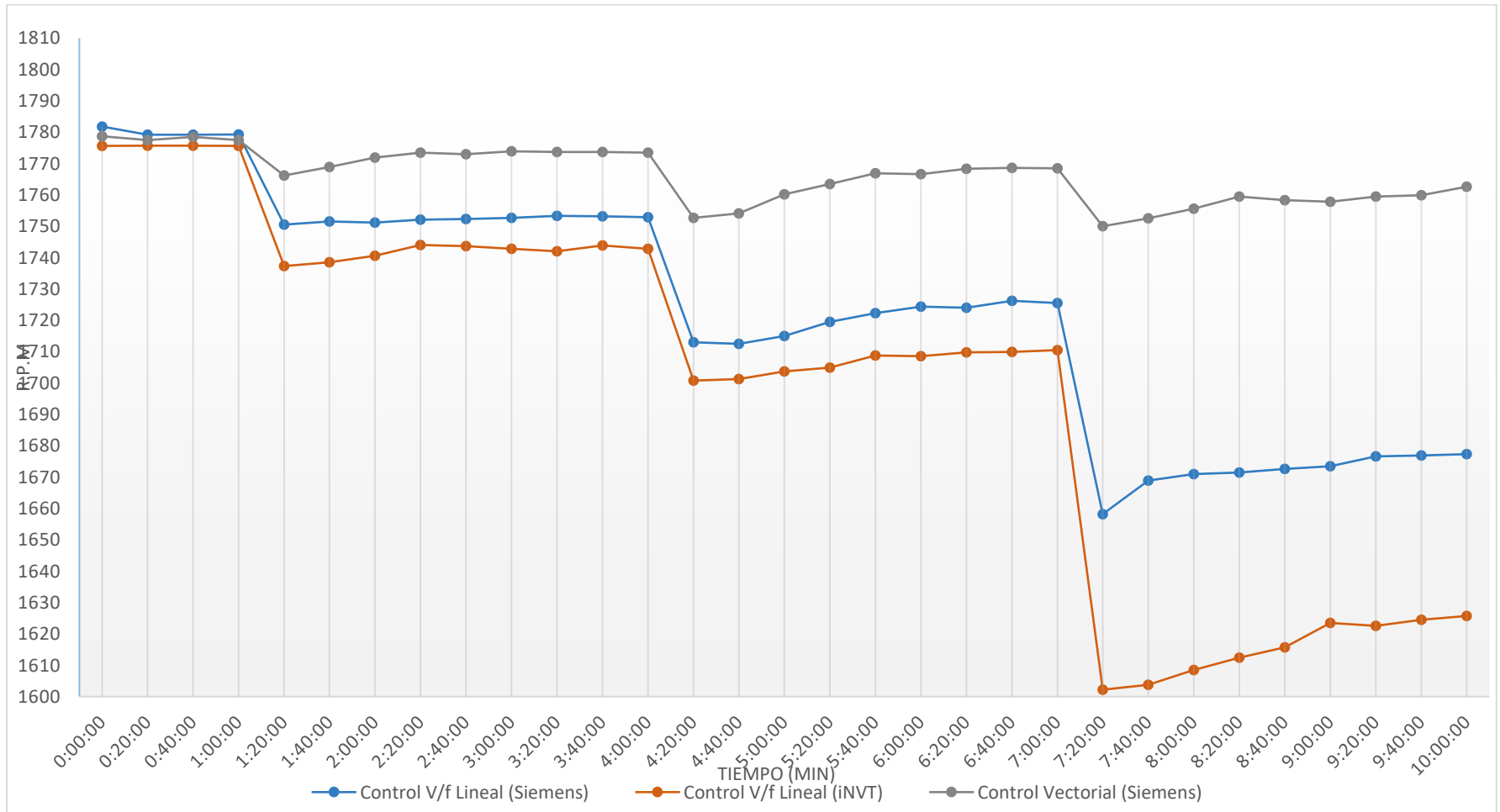


Figura 8.25. Ajuste de velocidad a 1800rpm