

**IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS PARA  
LA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO EMBEBIDO EN  
MOTORES TRIFÁSICOS**

**LUIS GUILLERMO CANO OREJARENA  
VLADIMIR RIVERA PEREZ**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN**

**2021**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS  
PARA LA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO  
EMBEBIDO EN MOTORES TRIFÁSICOS**

**LUIS GUILLERMO CANO OREJARENA  
VLADIMIR RIVERA PEREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo Electricista**

**Asesor técnico:  
Jortin de Jesús Vargas Ortega.  
MSc en gestión de la tecnología educativa.**

**Asesor metodológico:  
Carlos Mario Moreno Paniagua.  
Ingeniero Eléctrico.**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN**

**2021**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
1 Planteamiento del problema .....	11
1.1 Descripción.....	11
1.2 Formulación .....	11
2 Justificación.....	12
3 Objetivos.....	13
3.1 Objetivo general .....	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
4 Referentes teóricos .....	14
4.1 Señal de corriente del sistema monofásico .....	14
4.2 Señal de desfase voltaje vs corriente.....	15
4.3 Señal de la corriente trifásica. ....	16
4.4 Sistema Roto-generador. ....	18
4.5 Convertidor AC-AC. ....	19
4.6 Inversor de voltaje para fuerza motriz.....	20
5 Metodología.....	21
5.1 Tipo de proyecto.....	21
5.2 Método .....	21
5.3 Instrumentos de recolección de información. ....	22
5.3.1 Fuentes primarias.....	22
5.3.2 Fuentes secundarias. ....	22
6 Resultados.....	23
7 Conclusiones.....	36
8 Recomendaciones .....	37
9 Referencias bibliográficas .....	38

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Tensión monofásica sinusoidal como fasor o vector giratorio.....	14
<i>Figura 2.</i> Señal de desfase voltaje vs corriente. ....	15
<i>Figura 3.</i> Señal de la corriente trifásica.....	16
<i>Figura 4.</i> Campo magnético circular producido por la tensión trifásica. ....	17
Figura 5. Diagrama del sistema Roto-generador. ....	18
Figura 6. Señal del voltaje con roto-generador.....	19
Figura 7. Diagrama de un convertidor AC-AC.....	19
Figura 8. Inversor de voltaje para fuerza motriz.....	20
Figura 9. Fasores en el motor de 300 Vatios alimentado desde red monofásica. ....	24
Figura 10. Módulo de pruebas STEVAL-IHM023V3.....	25
Figura 11. Fasores en el motor de 300 Vatios alimentado desde módulo embebido. ....	27
Figura 12. Bloque de transistores IGBT. ....	28
<i>Figura 13.</i> Diagrama esquemático del tablero experimental de pruebas. ....	30
<i>Figura 14.</i> Imagen del modulo embebido y el motor de prueba. ....	33
<i>Figura 15.</i> Imagen del tablero de pruebas previo a la instalación de los instrumentos...	33
Figura 16. Curvas de la operación del motor de inducción durante las pruebas. ....	34
<i>Figura 17.</i> Curvas de operación del motor para pruebas con carga arrastrante. ....	35

**Lista de tablas**

	<b>Pag.</b>
Tabla 1 .Mediciones en el motor de 330 Vatios. ....	24
Tabla 2. Mediciones con convertidor de voltaje.....	26

## Resumen

# IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS PARA LA VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO EMBEBIDO EN MOTORES TRIFÁSICOS

**LUIS GUILLERMO CANO OREJARENA**  
**VLADIMIR RIVERA PEREZ**

El trabajo de grado presente, propone la implementación de un tablero experimental para realizar pruebas y futuras investigaciones de un módulo embebido, desarrollado en el marco del proyecto de investigación “Módulo inversor embebido para motores de inducción” con código de la dirección de tecnología e investigación RI202007, desarrollado por docentes de los grupos de investigación GIAM y GIEN de la institución universitaria Pascual Bravo. El tablero experimental permite cumplir con el propósito de implementar un módulo embebido en motores de inducción para el incremento de la eficiencia, cuando estos están conectados a instalaciones monofásicas y está compuesto por instrumentos de medición del voltaje y la corriente en la entrada y la salida del módulo.

El tablero permite llevar el módulo embebido a diferentes laboratorios de la institución universitaria, para poder realizar pruebas con diferentes motores de inducción hasta de 2 kW. Las pruebas a realizar permiten revisar las curvas características de diferentes motores de inducción y verificar el incremento de eficiencia energética que se logra al conectar los motores usando el módulo embebido. El tablero experimental también permite realizar pruebas de diferentes algoritmos de modulación de la tensión trifásica y bifásica, verificando su efecto sobre los motores, que pueden estar conectados a unidades pendulares para revisar su comportamiento a través del seguimiento y trazado de sus variables en tiempo real.

*Palabras claves: Módulo embebido, voltímetro, amperímetro, eficiencia energética.*

## Abstract

The present degree work proposes the implementation of an experimental board to carry out tests and future investigations of an embedded module, developed within the framework of the research project "Embedded inverter module for induction motors" with the code of the technology and research department RI202007, developed by teachers of the GIIAM and GIEN research groups of the Pascual Bravo university institution. The experimental board makes it possible to fulfill the purpose of implementing a module embedded in induction motors to increase efficiency, when these are connected to single-phase installations and is composed of voltage and current measurement instruments at the input and output of the module.

The board allows the embedded module to be taken to different laboratories of the university institution, to be able to carry out tests with different induction motors up to 2 kW. The tests to be carried out allow us to review the characteristic curves of different induction motors and verify the increase in energy efficiency that is achieved by connecting the motors using the embedded module. The experimental board also allows testing of different three-phase and two-phase voltage modulation algorithms, verifying their effect on motors, which can be connected to pendulum units to review their behavior by monitoring and plotting their variables in real time.

*Index terms: Embedded module, voltmeter, ammeter, energy efficiency*

## Glosario

**Campo magnético:** es la influencia magnética de las corrientes eléctricas y los materiales magnéticos que estén involucrados.

**Corriente eléctrica alterna:** es aquel tipo de corriente que se caracteriza porque su magnitud y dirección presentan variación de tipo cíclico (tiene una frecuencia).

**Eficiencia energética:** es el uso eficiente de la energía, esto se da cuando un aparato o instalación eléctrica consume la energía necesaria y no más para no incurrir en demandas energéticas innecesarias.

**Factor de potencia:** es una medida de la eficiencia eléctrica de un equipo receptor o de un sistema eléctrico.

**Fase:** conductor que transporta la corriente eléctrica normalmente desde una red energizada hasta un enchufe o interruptor.

**Modulo embebido:** circuito programable con actividades básicas de identificación para su operación que se convierte en elemento parte de los motores.

**Motor de inducción monofásico:** motor eléctrico con estator bobinado y núcleo con barras en jaula de ardilla que opera bajo el principio de inducción en redes monofásicas.

**Motor de inducción trifásico:** motor eléctrico con estator bobinado y núcleo con barras en jaula de ardilla que opera bajo el principio de inducción en redes trifásicas.

**Sistema embebido:** sistema diseñado para realizar una o algunas pocas funciones en con todas las partes necesaria para una operación autónoma.

**Torque:** es el momento de fuerza o momento dinámico, para este caso se puede percibir como una variable mecánica de los motores.

## Introducción

La transición del país hacia un escenario de paz estable implica la coordinación de esfuerzos institucionales y financieros en aquellos territorios donde el conflicto armado ha permeado por años; lo que ha influido en la conservación de la pobreza y la profundización de los rezagos sociales y económicos en los territorios. En el marco de las acciones a realizar para contrarrestar la falta de presencia del estado en las intervenciones en los territorios afectados, y como deber del estado Colombiano, se establecen estrategias de articulación e inversión para contribuir a que se cumplan los derechos básicos y fundamentales, y el acceso a bienes y servicios como: formalización laboral, infraestructura (vivienda digna), y el fomento a la productividad como apoyo para la subsistencia mínima (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2015). Dado lo anterior, el estado debe recrear escenarios para garantizar el cumplimiento de las soluciones a las problemáticas planteadas, ejecutando acciones en articulación con instituciones nacionales y territoriales, como por ejemplo las instituciones de educación superior, que mediante estrategias académicas e investigativas pueden aportar al desarrollo en los territorios afectados y a la solución de sus problemáticas asociadas.

Este documento presenta una propuesta investigativa de trabajo de grado, como parte del proyecto de investigación *Módulo inversor embebido para motores de inducción*. La presente propuesta pretende contribuir al avance del proyecto de investigación mencionado, el cual busca crear una estrategia de fomento a la productividad y la generación de ingresos para el desarrollo de las poblaciones afectadas por el conflicto. Dicha estrategia consiste en el desarrollo de un generador eficiente de la tercera fase al ser alimentado a una red de alimentación monofásica; este módulo se aplicaría para la conexión y puesta en marcha de cargas de fuerza motriz, lo que representa una intervención tecnológica y de bajo costo que aporta a la solución de las necesidades de las poblaciones con bajos ingresos económicos, que forman las pequeñas empresas o pequeños procesos de manufactura, contribuyendo al cumplimiento de los retos para el posconflicto, donde el estado debe generar acciones para garantizar los derechos básicos y fundamentales (Vargas Ortega & Moreno Paniagua, 2018).

El presente documento académico expone el sistema que permite instalar motores trifásicos en instalaciones monofásicas, en lugares donde no es posible la conexión trifásica, lo cual permite disminuir las pérdidas eléctricas, variar la velocidad y proteger el motor contra incrementos de temperatura y picos de corriente, aumentando el ahorro de energía eléctrica.

## **1 Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción**

Las coyunturas sociales y económicas generadas por el conflicto armado en el país han incrementado el no cumplimiento de los derechos básicos y fundamentales que el estado debe garantizarle a las personas, específicamente a aquellas víctimas directas del conflicto; esto ha mostrado el abandono social y falta de presencia institucional por parte los entes gubernamentales correspondientes, contribuyendo al recrudecimiento de las condiciones de vida de los pobladores y la vulneración de sus derechos (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2015).

La creación del Fondo Colombia en Paz ha sido fundamental para ejecutar estrategias que contribuyan a alcanzar el objetivo de transformación social en el marco del posconflicto, articulando y coordinando inversiones para el desarrollo económico y social del país (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2015). Es considerable el incremento de pequeños negocios ubicados en zonas no industriales, que emplean máquinas de fuerza motriz, lo que ha representado un determinado avance en las acciones implantadas para el fomento de la productividad e ingresos económicos en la población afectada; sin embargo, el uso de máquinas eléctricas en estos pequeños negocios implica una baja eficiencia energética, producto de las ineficientes condiciones de energía eléctrica en los territorios afectados, contribuyendo a que se presenten bajos niveles de seguridad y deficientes condiciones técnicas en la operación de las máquinas.

### **1.2 Formulación**

¿Cómo implementar las pruebas de un módulo embebido para mejorar la eficiencia de los sistemas de fuerza motriz en las zonas con instalaciones monofásicas, considerando el factor de usabilidad?

## 2 Justificación

Esta propuesta ofrece la posibilidad de desarrollar una maquinaria de producción con alta eficiencia energética, brindando a las pequeñas empresas la oportunidad de mejorar sus niveles competitivos, a partir de las pruebas que se realizan a los módulos que proporcionan la función mencionada.

El desarrollo del trabajo de grado beneficia a la comunidad académica, ya que permite desarrollar actividades de socialización del conocimiento en el área de las máquinas eléctricas clásicas y su control. También permite realizar la validación de prototipos, resultado de proyectos de investigación, con miras a generar escritos científicos con un soporte fuerte a nivel experimental.

Además, con el resultado de los proyectos que se beneficien del uso del tablero experimental, objeto de este trabajo de grado, se espera poder impactar de manera positiva a las pequeñas empresas de los territorios más apartados y que después del conflicto armado vivido en el territorio nacional, retoman sus actividades comerciales, como carpinterías, fábricas textiles y de calzado, comercializadoras de alimentos, empresas con aire acondicionado central, y todos aquellos espacios que tengan como finalidad ofrecer un servicio o producto y requieran el uso de motores eléctricos de inducción.

Finalmente, este proyecto tiene como factor agregado de seguridad en la usabilidad del motor, ya que, la disposición de los circuitos electrónicos en la caja de bornes de éste evita la manipulación de líneas trifásicas.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Implementar un tablero experimental de pruebas para la validación del funcionamiento de un módulo embebido en motores trifásicos para su operación en redes monofásicas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Diseñar el tablero representado en planos eléctricos y memorias de cálculo.

Evaluar el tablero a través de pruebas según las indicaciones del diseño el cual nos permita realizar varias funciones en tiempo real.

Crear el manual de usuario del tablero con guía de prácticas de investigación, las cuales nos ayuden a monitorear el estado y hacer un diagnóstico del sistema.

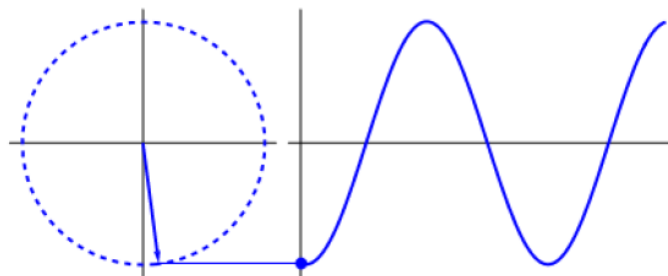
## 4 Referentes teóricos

Los conceptos teóricos que se exponen a continuación contribuyen a formar un entendimiento previo sobre las temáticas necesarias para abordar el análisis y la resolución de la problemática planteada en torno a la necesidad de diseñar un tablero experimental para la prueba del módulo embebido y los motores de inducción conectados a su salida.

### 4.1 Señal de corriente del sistema monofásico

Definir el circuito eléctrico representa remitirse a un conjunto conformado por fuentes de energía eléctrica, medios de conducción, transformación, y dispositivos de carga. La fuente de alimentación, encargada del suministro de energía eléctrica puede proveer tanto tensiones continuas o alternas. En alterna es posible tener una tensión vectorialmente única como se aprecia en la figura 1, para conformar un circuito eléctrico monofásico (Goyal, Agarwal, Bhatti, & Agarwal, 2014)

El circuito monofásico implica simplicidad en el proceso de conexión, así como bajos costos del equipamiento requerido. Sin embargo, la alimentación bajo una tensión alterna monofásica de representa baja eficiencia, cuando de fuerza motriz se trata. Los motores monofásicos o trifásicos al ser alimentados desde circuitos monofásicos, sin intervención de dispositivos especiales, presentan campos magnéticos giratorios de forma elíptica y no circular; considerando principalmente aquellos motores de inducción, los cuales son los más utilizados para procesos industriales dada su eficiencia, costo y durabilidad (Vargas Ortega & Moreno Paniagua, 2018).



*Figura 1.* Tensión monofásica sinusoidal como fesor o vector giratorio  
Fuente: extraído de <https://bit.ly/3D12JzJ>

El campo magnético giratorio de forma circular es más eficiente en los motores de inducción, pues por aspectos constructivos la máquina misma presenta dicha forma; lo que contribuye a una eficiente interacción electromagnética y por ende a la generación de tracción mecánica, ya que la arquitectura circular permite que sus devanados se encuentren en disposición equidistante (Vinodhini, Rajesh Babu, & Glenn, 2016).

Para que el motor de inducción logre vencer la inercia en su arranque y de paso a su movimiento, es necesario que exista más de un fasor (vector) de voltaje. Al revisar la secuencia de picos de voltaje en un sistema eléctrico compuesto por varias fases se nota como se forma una repetición periódica de ondas sinusoidales que conforman un campo magnético giratorio con forma circular o semicircular, obedeciendo la naturaleza de la tensión alterna (Vargas Ortega & Moreno Paniagua, 2018)

#### 4.2 Señal de desfase voltaje vs corriente.

Al operar un motor de inducción trifásico bajo una alimentación eléctrica monofásica, el fenómeno electromagnético genera un campo de forma elíptica, esto ocurre al no satisfacer el requerimiento de los fasores de voltaje, necesarios para la correcta puesta en marcha del motor. Dado lo anterior, es por esto que el motor realiza una compensación creando los vectores faltantes, que con la tensión inducida crea campos electromagnéticos. No obstante, como se ha mencionado, dichos campos presentan una forma elíptica, lo que representa una no uniformidad en la distribución de las corrientes (Vargas Ortega & Moreno Paniagua, 2018). A continuación en la figura 2 se presenta una distribución uniforme de las corrientes.

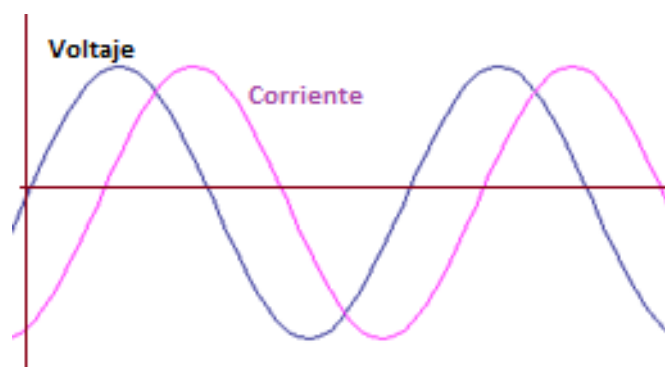


Figura 2. Señal de desfase voltaje vs corriente.

Fuente: diseño propio

Los dispositivos monofásicos se pueden conectar entre dos de las fases o entre una de ellas y una línea neutra; esto es según el nivel de tensión requerido. El circuito eléctrico trifásico se encuentra formado por tres tensiones alternas sinusoidales desfasados el uno del otro en 120 grados eléctricos, lo que representa una distribución uniforme. Cabe anotar, que los dispositivos de carga trifásica pueden ser conectados en configuración “estrella Y” ó en configuración “delta” o triángulo.

En el campo de las máquinas rotativas, el sistema trifásico presenta una eficiencia energética altamente considerable. Sin embargo, esta ventaja se ve contrarrestada por la complejidad de las conexiones y los costos de instalación de la red que implica utilizar tal sistema (Giceva, Vasilija , Saso A., & Vlatko T., 2018)

#### 4.3 Señal de la corriente trifásica.

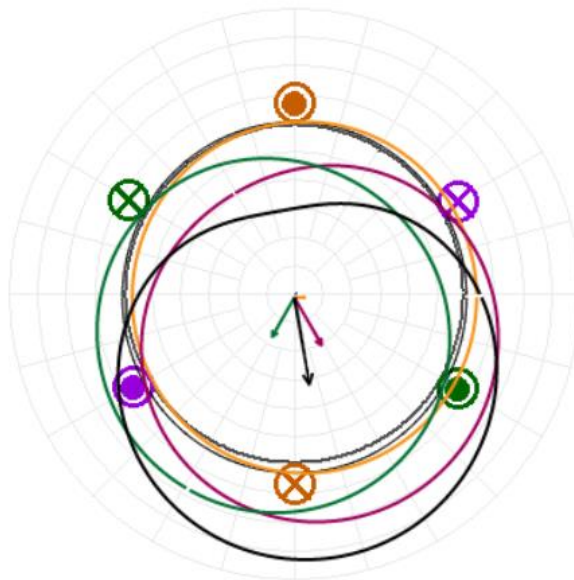
El sistema eléctrico trifásico se representa mediante ondas que denotan señales sinusoidales, estos picos de tensión desfasados de forma equidistante representan un campo magnético giratorio. Un motor trifásico al ser constructivamente circular, presentará un aprovechamiento óptimo de la energía, dado que, en virtud del fenómeno físico y electromagnético de la tensión trifásica, la máquina tendrá un mayor rendimiento por su arquitectura circular al aprovechar casi por completo la tensión inducida y el campo magnético que girará a través de ella.



*Figura 3.* Señal de la corriente trifásica.  
Fuente: tomado de <https://ferraris.aulamoisan.es/>

Con un campo magnético giratorio con forma circular, los motores tienen una eficiencia que solo decrece por factores diferentes a la forma del campo. Los motores trifásicos son máquinas más eficientes y de menor costo que los motores monofásicos, por lo cual se hace deseable su utilización.

En lugares en los cuales sólo se provee alimentación monofásica se recurre a utilizar motores monofásicos o motores trifásicos con generación de las fases adicionales por medio de diferentes métodos. Unos con mayor y otros con menor eficiencia.



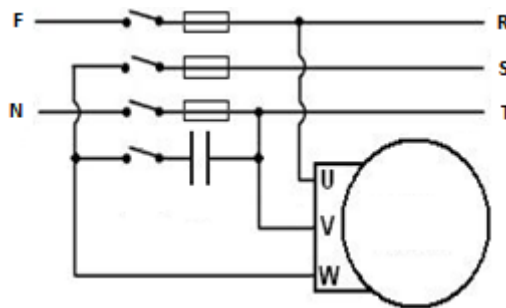
*Figura 4.* Campo magnético circular producido por la tensión trifásica.  
Fuente: tomado de <https://ferraris.aulamoisan.es/>

Lo más deseable es utilizar motores trifásicos alimentados con voltajes trifásicos. En caso de no estar disponible la alimentación trifásica, los motores deben estar acompañados de dispositivos que generen voltajes trifásicos, a partir de voltajes monofásicos.

De los diferentes recursos que existen para tal fin se destaca el uso de circuitos electrónicos, por la versatilidad y eficiencia que estos ofrecen. Estos circuitos pueden ser variadores de velocidad o módulos integrados, de alguna forma, al motor. Para este caso son los aspectos de seguridad, usabilidad y costo los que determinan el camino a seguir. (Sobczynski & Bartman, 2018)

Previo a evaluar los principios fundamentales de la generación electrónica de voltajes trifásicos, es recomendable evaluar otras formas de lograrlo, con el fin de justificar plenamente la selección del método elegido, a través de la comparación de consumo de energía, pérdida de potencia, costo, eficiencia, usabilidad, duración y mantenimiento.

Cuando se conecta un motor trifásico a una red monofásica y de alguna forma se pone en movimiento, el motor genera voltajes trifásicos que pueden ser utilizados para alimentar otras cargas trifásicas. El motor puede ser puesto en movimiento mediante la aplicación de una fase adicional en forma temporal.



*Figura 5.* Diagrama del sistema Roto-generador.

Fuente: diseño propio.

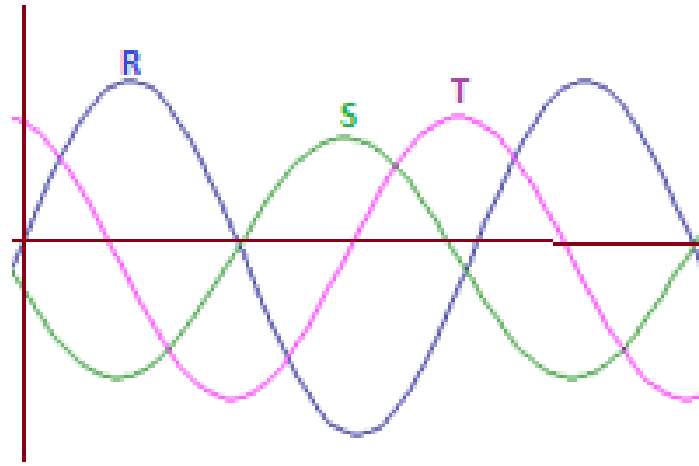
La figura 4 muestra todo el conjunto de motor y elementos de maniobra para generar las fases de la forma mencionada, la cual es conocida como roto-generador. Cuando se requiere fuerza motriz y la carga es un motor trifásico.

#### 4.4 Sistema Roto-generador.

Cuando se usa roto-generador se utiliza el mismo principio al que se recurre cuando se arranca con condensador, siendo la única diferencia el hecho que en el caso del roto-generador la fuerza motriz se genera en un segundo motor y no en el que genera las fases.

Los roto-generadores generan las tres fases con desfases parecidos a los de un sistema trifásico. Al conectar el dispositivo de carga la amplitud de las cargas puede variar en diferente nivel como lo presenta la figura 5. Esta distribución de voltajes y corrientes

influye en la eficiencia del sistema, haciéndola mayor que la de otras formas de generación, pero menor que en el caso de utilización de dispositivos electrónicos.

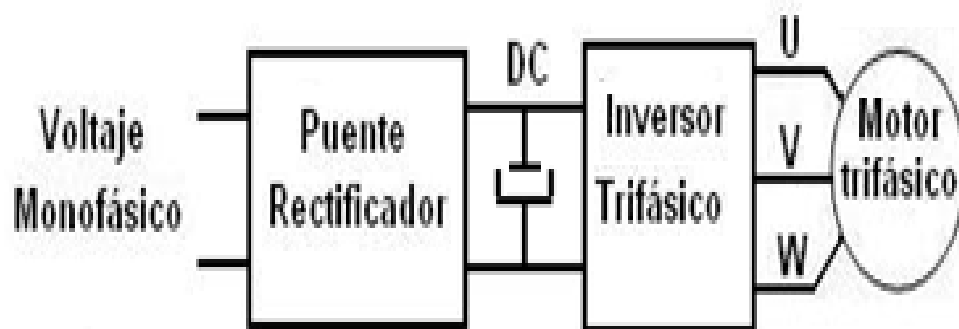


*Figura 6.* Señal del voltaje con roto-generador.

Fuente: diseño propio.

#### 4.5 Convertidor AC-AC.

Existen dispositivos electrónicos destinados a alimentar las máquinas eléctricas con voltajes trifásicos. En este grupo se destacan los variadores de velocidad y los inversores trifásicos, que operan bajo el mismo principio de convertir el voltaje alterno en directo y luego en trifásico, controlando con precisión el desfase y la amplitud como lo muestra la figura 6.



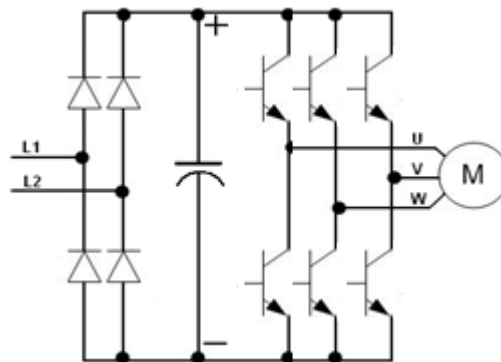
*Figura 7.* Diagrama de un convertidor AC-AC.

Fuente: diseño propio

Los convertidores electrónicos se caracterizan por tener alta eficiencia y por aprovechar el máximo rendimiento del motor. Adicionalmente permiten controlar la velocidad del motor, lo que en algunas circunstancias genera ahorros adicionales, mejoras en el proceso productivo y aumento de la vida útil del activo. Es importante considerar que para cambiar la velocidad del motor de inducción es necesario variar la frecuencia y con ella el voltaje, pues si se sube la frecuencia sin variar el voltaje, se calienta el acero del motor por efectos inductivos sobre el acero. Si se baja la frecuencia sin bajar el voltaje, se calienta el cobre por cambios en la reactancia inductiva. (Hareesh, Manisankar, & Jayanand, 2017). El comportamiento anterior se relaciona con la denominada ley tensión-frecuencia de los variadores de velocidad. Es de anotar que la utilización de circuitos electrónicos de potencia puede producir armónicos en la red eléctrica.

#### 4.6 Inversor de voltaje para fuerza motriz.

Los inversores de voltaje, como el presentado en la figura 7, brindan adicionalmente, la posibilidad de hacer rampas de arranque para limitar la corriente, compensar picos de torque para evitar paros del motor y supervisar las variables del motor para protegerlo. (Vieira, Tofoli, & de Morais, 2017)



*Figura 8.* Inversor de voltaje para fuerza motriz.  
Fuente: diseño propio.

## **5 Metodología**

### **5.1 Tipo de proyecto**

La propuesta metodológica de este proyecto está enmarcada en el tipo de investigación interactiva, la cual permite a los investigadores proponer una solución al problema de la generación de la tercera fase en sistemas eléctricos monofásicos en instalaciones ubicadas en sectores no industriales, e implementar un prototipo funcional de dicho sistema de conversión.

Este tipo de proyecto exige la acción de los investigadores que les lleve a la transformación del fenómeno estudiando y por ende, el alcance de los logros establecidos. Gracias a la planificación de las fases del proceso, los investigadores cuentan con los elementos requeridos para que el producto de la investigación sea el diseño y la implementación del convertidor y su validación frente a la utilización de máquinas monofásicas y condensadores de arranque.

### **5.2 Método**

Este proyecto requiere de una serie de procedimientos que les permitan a los investigadores dar respuesta a la necesidad identificada y lograr beneficiar a los pequeños empresarios ubicados en zonas no industriales mediante el desarrollo de un prototipo que permita utilizar motores trifásicos con características de usabilidad de maniobra segura.

A su vez, el desarrollo de un prototipo, un artículo tipo C y cinco proyectos de grado de evaluación de diferentes tecnologías de uso frecuente en el sector de las MiPymes.

El análisis de los objetivos específicos lleva al desarrollo de las siguientes actividades para su consecución.

Evaluación de la generación de la tercera fase eléctrica por medio de condensador y tecnologías derivadas de su utilización.

Adición de dispositivos electrónicos

Montaje de tarjetas con componentes electrónicos sobre el motor trifásico

Implementación de pruebas para la validación técnica.

### **5.3 Instrumentos de recolección de información.**

#### **5.3.1 Fuentes primarias.**

El trabajo de investigación se hace con base en los referentes conceptuales para el entendimiento del área de intervención del proyecto.

#### **5.3.2 Fuentes secundarias.**

En el proceso de comprensión y aplicación del conocimiento se acudió a fuentes de investigación científica y artículos divulgativos orientados al análisis y la depuración de los conceptos y su proyección a la aplicación de nuevas tecnologías.

## 6 Resultados

Esta propuesta investigativa se desarrolla bajo un proceso sistemático y planeado con el fin de alcanzar los objetivos planteados, por lo tanto, se configuraron cuatro fases de actividades que atienden a las necesidades que subyacen en este proyecto de creación y ejecución.

La primera fase busca establecer el punto de referencia para estimar el efecto en el incremento de la eficiencia energética de la solución, por lo que se realizan una serie de pruebas de evaluación de la generación de la tercera fase eléctrica por medio de condensador y tecnologías derivadas de su utilización.

En la segunda fase del proceso, con el fin de que los motores eléctricos trifásicos operen desde la red monofásica sin perder eficiencia ni generar armónicos a la red eléctrica, se agregan dispositivos electrónicos de un costo relativamente bajo.

Ya para la tercera fase, y debido a que el sistema propuesto implica el montaje de tarjetas con componentes electrónicos sobre el motor trifásico, las acciones van encaminadas a evitar que los técnicos cometan errores durante las actividades de instalación y mantenimiento, de ahí que, el dispositivo diseñado debe proteger al motor contra subidas de temperatura, sobre corrientes, inversiones de giro, y protección contra malas instalaciones.

Al finalizar, la cuarta y última fase tiene como propósito establecer la viabilidad del prototipo alfa y de su posterior desarrollo hacia prototipo beta (enfrenta pruebas de mercado) y muestra de producción; dicha viabilidad se puede establecer a partir de la implementación de pruebas para la validación técnica.

Para la evaluación energética del uso de las máquinas trifásicas de fuerza motriz con alimentación monofásica con condensador se desarrolló un formato de experimentación, el cual se le aplicó a cinco motores de potencias menores a 1,5 kilovatios, mediante la

realización de mediciones subiendo el voltaje, bajando el voltaje, luego de un tiempo estable y luego del arranque.

Tabla 1 .Mediciones en el motor de 330 Vatios.

Medición	Voltios
Voltaje L1 – L2	218
Voltaje U – V	218
Voltaje U – W	209
Voltaje W – V	176
Corriente L1	2.8
Corriente L2	2.1

Fuente: Diseño propio

Con los datos de las mediciones para cada motor se calculó la media y se revisó que la desviación estándar cumpliera con ser menor que el 5% de la media. El resultado preliminar para uno de los motores se presenta en la tabla 1, específicamente para uno de 330 Vatios operando en vacío.

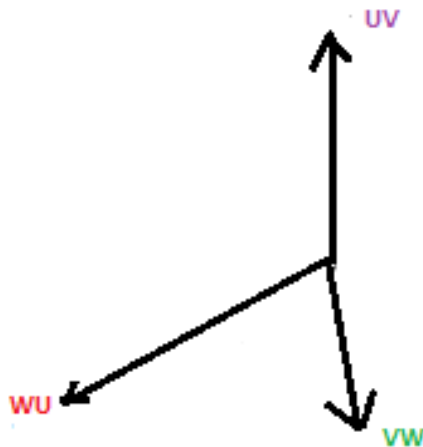


Figura 9. Fasores en el motor de 300 Vatios alimentado desde red monofásica.  
Fuente: diseño propio

La figura 9 muestra el diagrama de fasores del motor de 300 W, alimentado desde una red monofásica. Se observa como la distribución de los vectores no es simétrica, eso debido a que los dos vectores adicionales son generados directamente por el motor de inducción y no por la tensión, con qué se alimenta. Esto disminuye la eficiencia energética de las máquinas alimentadas desde la red monofásica.

Los resultados muestran un claro desbalance entre los voltajes y las corrientes del motor. Además, al observar el diagrama de fasores del motor, presentado en la figura 9, puede constatar que hay asimetrías en la distribución de la tensión en las fases del motor, lo cual conlleva a generar un campo magnético no circular, de lo cual se genera una baja en la eficiencia del motor.

En la siguiente etapa de avance del proyecto se realizaron los cálculos para el diseño de un convertidor electrónico que opere en frecuencias entre los 30 y los 70 Hertz con una portadora de 21600 Hertz y con un voltaje de barraje de 305 voltios, resultantes de aplicar una rectificación monofásica con su respectivo filtrado, al voltaje de la red de 220 VAC.

Para el diseño se inició con la evaluación de un módulo “DemoBoard” de marca ST Electronics con referencia STEVAL-IHM023V3, el cual se presenta en la figura 9.



*Figura 10.* Módulo de pruebas STEVAL-IHM023V3.  
Fuente: [www.st.com](http://www.st.com)

La figura 10 muestra el módulo de pruebas de marca ST Electronics, que permite convertir la tensión monofásica a trifásica, para alimentar motores. En el módulo se observan unas borneras por las que entra la tensión monofásica a un rectificador el cual convierte esa tensión en DC.

Unos filtros convierten esa tensión en corriente directa pura. Existe, en el módulo, un grupo de transistores montados en un disipador, para convertir la corriente DC en corriente alterna trifásica, la cual es entregada a un motor de inducción para que esté operé en forma eficiente.

Al módulo se le agregó un microcontrolador marca NXP con referencia MK10DX128 con un sistema operativo de tiempo real con arquitectura colaborativa desarrollado en el marco del proyecto.

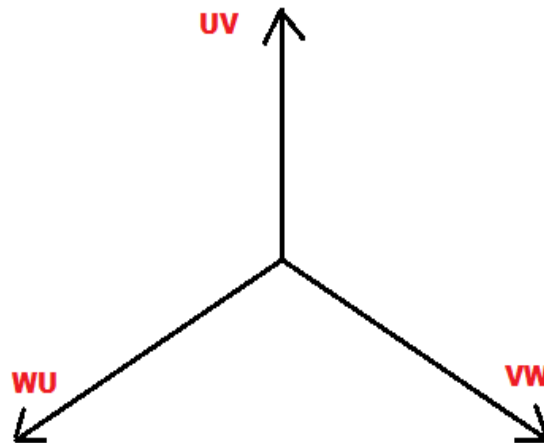
Al realizar las mediciones repitiendo las pruebas que se habían aplicado para el motor con condensador, se obtuvo el cuadro de valores para el motor de 300 Vatios, presentado en la tabla 2.

Tabla 2. Mediciones con convertidor de voltaje.

<b>Medición</b>	<b>Voltios</b>
Voltaje L1 – L2	213
Voltaje U - V	208
Voltaje U - W	206
Voltaje W - V	207
Corriente L1	2.2
Corriente L2	2.4

Fuente: Diseño propio

El resultado de las mediciones proyecta un panorama de simetría en el funcionamiento, lo cual permite suponer la formación de un campo magnético circular en el motor y por ende un mayor nivel de eficiencia por mejor aprovechamiento del flujo magnético que ejerce inducción en el rotor de la máquina.



*Figura 11.* Fasores en el motor de 300 Vatios alimentado desde módulo embebido.  
Fuente: diseño propio

La figura 11 muestra los valores del motor de 300 vatios, cuándo es alimentado a través del módulo embebido. Se observa la simetría entre los vectores, ya que las fases son generadas desde el módulo embebido y esto lo hace con un desfase de 120 grados entre cada fase.

Esa distribución simétrica conlleva a que el motor de inducción, conectado el módulo embebido va a trabajar de una forma más eficiente que cuando está conectado directamente a la red monofásica.

A partir de las pruebas realizadas al prototipo con el módulo “DemoBoard” STEVAL-IHM023V3 se estableció el uso de un bloque de transistores IGBT con referencia FSBB20CH60 para la construcción del prototipo alfa del convertidor embebido. El bloque de IGBT se presenta en la figura 10.



*Figura 12.* Bloque de transistores IGBT.

Fuente: mouser.com

La figura 12 muestra los bloques de transistores IGBT que se utilizan en los módulos embebidos, con la finalidad de convertir la corriente directa a corriente alterna. Estos módulos son controlados por un procesador, que envía las señales de PWM con modulación sinusoidal a cada uno de las tres entradas de control de los transistores y generando de esta manera corriente trifásica.

El procesador revisa la corriente que fluye por el módulo y dependiendo del valor de esta, determina si la operación se ejecuta o desactiva los transistores para evitar que se quemen por sobre corriente.

El bloque seleccionado es un módulo de 6 transistores IGBT de 600V a 20 Amperios con driver interno y detección de corrientes y fallas. El bloque se ha conectado al mismo microcontrolador MK10DX128 con el sistema operativo colaborativo y una aplicación de firmware utilizando el módulo de 6 salidas de frecuencia con modulación de ancho de pulso a 21600 Hertz con generación de tiempo muerto entre las conmutaciones de transistores de la misma rama para evitar pérdidas en la etapa electrónica del prototipo.

El prototipo posee fuentes de alimentación aisladas e interfaz de comunicaciones vía Bluetooth para evitar que se formen retornos de corriente directa o alterna. La información detallada del diseño no se presenta para proteger aspectos de propiedad intelectual

El aspecto que se debe mejorar en el diseño está en el tamaño de los capacitores para el filtrado de la corriente rectificadora. Se proyecta que el uso de este sistema en barrajes de corriente directa alimentados con paneles solares fotovoltaicos encontrará los mayores niveles de eficiencia.

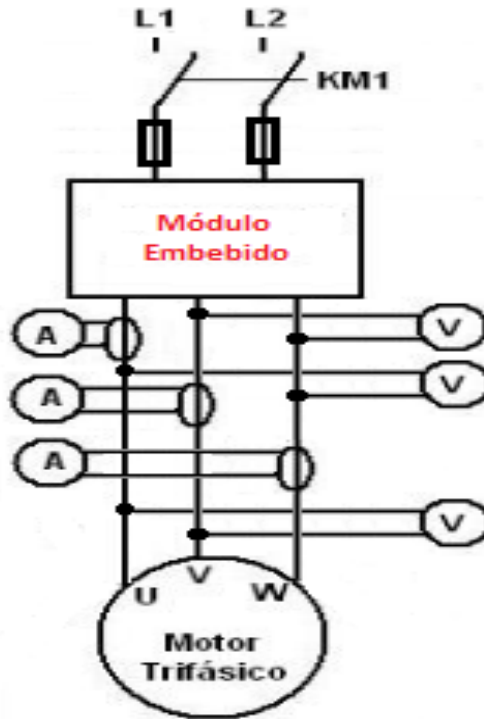
El prototipo alfa se implementó en la parte superior de un motor con la finalidad de revisar aspectos de usabilidad, e influencia de las vibraciones del motor sobre el ensamblaje electrónico.

En el diseño del circuito impreso se observaron recomendaciones de la norma IPC-A-610 con respecto a la operación en condiciones mecánicas extremas, como las que se dan en el equipamiento automotriz y el de la maquinaria amarilla (IPC-A-610-Work-Team, 2010).

El prototipo alfa implementado, el cual integra los módulos electrónicos para la validación del concepto y su usabilidad, protege al motor contra subidas de temperatura, sobre corrientes, inversiones de giro súbitas. Así mismo, por tratarse de un dispositivo montado directamente sobre el motor, este se protege de malas instalaciones, evitando que los técnicos cometan errores durante las actividades de instalación y mantenimiento.

El sistema en cuestión tiene un módulo embebido que consta de las siguientes partes: Conectores de potencia para el voltaje monofásico, puente rectificador para convertir el voltaje de alterno a continuo, capacitor filtro de alta capacitancia, alto voltaje y bajo ESR, puente trifásico de IGBT con interfaz para procesador, tarjeta de control con funciones de modulación trifásica, conexión de la tarjeta al motor trifásico, sensor de temperatura y módulo de comunicación Bluetooth.

Adicionalmente el tablero tiene conexiones para los instrumentos de medición de los voltajes y las corrientes del motor de inducción.



*Figura 13.* Diagrama esquemático del tablero experimental de pruebas.  
Fuente: diseño propio

La figura 13 muestra el diagrama esquemático del tablero experimental de pruebas para el módulo embebido. En este se observa la interconexión del módulo embebido, los instrumentos de medición y el motor de inducción. A la entrada del tablero hay un interruptor para desenergizar el tablero y un par de fusibles de protección de la entrada del módulo embebido.

El tablero tiene tres transformadores de corriente que permiten determinar la corriente a la salida del módulo embebido hacia el motor trifásico. También tiene tres instrumentos para medir los voltajes de entrada hacia el motor, enviados por el módulo embebido.

La propuesta metodológica de este proyecto está enmarcada en el tipo de investigación interactiva, la cual permite a los investigadores proponer una solución al problema de la generación de la tercera fase en sistemas eléctricos monofásicos en instalaciones ubicadas en sectores no industriales, e implementar un prototipo funcional de dicho sistema de conversión.

La experimentación es un proceso fundamental para el montaje de motores eficientes; por lo tanto, es obligatorio poner a prueba cada uno de los elementos que lo componen y permiten su funcionamiento.

En esta primera etapa de pruebas se miden los voltajes en borneras, las corrientes en dos líneas, y se diseñan las variables eléctricas y mecánicas del motor trifásico para la operación desde una red monofásica.

Para el desarrollo de la actividad se desarrollan las siguientes actividades.

Medir los voltajes del motor y de la red, así como las corrientes de línea del circuito monofásico.

Medir los voltajes del motor y de la red, así como las corrientes de línea del circuito de alimentación a través de un condensador.

Obtener los diagramas de tiempo del motor en operación para la alimentación monofásica y con condensador.

Estas pruebas se realizan de acuerdo a los fundamentos conceptuales desarrollados en el capítulo de Referentes teóricos:

Señal de corriente del sistema monofásico

Señal de desfase voltaje vs corriente

Sistema Roto-generador

Sistema Roto-generador

Convertidor AC-AC

Inversor de voltaje para fuerza motriz

Los materiales y equipos necesarios para la actividad son los siguientes:

1 motor trifásico de 0.6 HP a 220 VAC.

Fuente de alimentación trifásica con protección.

Transformador monofásico.

Herramientas de medida de voltajes y corrientes

Analizador de red.

Panel de prueba de motores con unidad pendular para la variación de carga mecánica en el eje del motor.

Computador personal con software de trazado de la operación de los motores eléctricos.

El procedimiento para el desarrollo de la actividad es el siguiente:

Montar el circuito del diagrama.

Medir voltajes sin conectar el motor.

Visualizar el diagrama de tiempo sin arrancar el motor.

Energizar el motor con condensador y al estar en marcha desconectarlo.

Medir voltajes en los terminales del motor.

Visualizar el diagrama de tiempo en los terminales del motor variando la carga mecánica.

El diagrama de experimentación utilizado para las pruebas, presentado en la figura 13, permite construir el tablero de pruebas presentado en la figura 14, el cual muestra directamente el circuito eléctrico de interconexión del motor trifásico a una red monofásica a través del módulo embebido.



*Figura 14.* Imagen del modulo embebido y el motor de prueba.  
Fuente: diseño propio

La figura 14 muestra la imagen del tablero y el modo en qué va montado el módulo embebido. Se observa la conexión del módulo embebido al motor de inducción. también se observa como al módulo embebido ingresan dos líneas de alimentación monofásica y del módulo embebido salen, hacia el motor, tres líneas que son respectivamente las fases R, S y T. El tablero para el módulo embebido tiene tres tomas laterales para conectar los instrumentos de medición, tanto de corriente como de voltaje a la salida del módulo embebido.



*Figura 15.* Imagen del tablero de pruebas previo a la instalación de los instrumentos.  
Fuente: diseño propio

La figura 15 muestra el tablero de pruebas, previo a la instalación de los instrumentos. En este se observa cómo queda protegido el módulo embebido. en este caso los instrumentos de medición quedan externos. Adicionalmente se observa que al tablero ingresan dos líneas, una negra y una azul, que corresponden a un potenciómetro que permite subir y bajar la velocidad del motor de inducción a partir del cambio de parámetros a la entrada del módulo embebido.

Para validar la funcionalidad del tablero de pruebas, se hacen pruebas del módulo embebido conectado a un motor trifásico. Las pruebas iniciales se realizan con motores de inducción trifásicos de 24 voltios y las pruebas siguientes se realizan con motores de 300 vatios a 220 voltios.



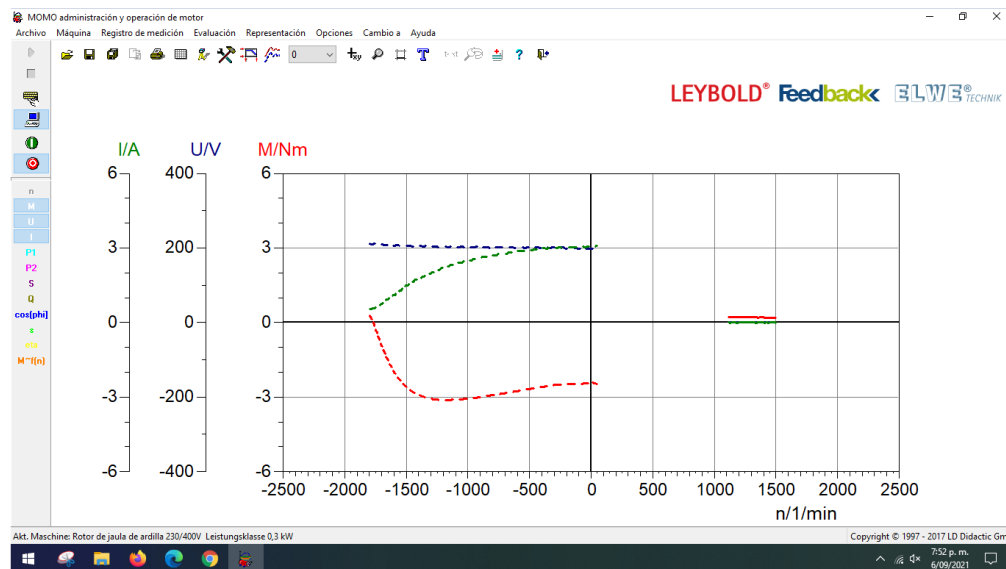
Figura 16. Curvas de la operación del motor de inducción durante las pruebas.

Fuente: diseño propio

La figura 16 muestra las curvas de operación del motor de inducción durante las pruebas que se realizan en el tablero experimental. En esas pruebas se observa como al conectar el motor a una unidad pendular, en este caso de marca Leybold, al variar la carga del motor, haciendo que la velocidad cambie de cero a la velocidad de vacío, se observa cómo cambia el torque que puede generar el motor, cómo se mantiene el voltaje y cómo cambia la corriente. Esta prueba permite establecer que cuando el motor trabaja directamente de la red monofásica la eficiencia es menor que cuando el motor trabaja alimentado desde el

módulo embebido. Esto debido a que la curva de torque que es la línea roja, tiene valores más altos con el módulo embebido, que cuando está alimentado directamente de la red monofásica.

Otro tipo de pruebas se realizan cambiando el tipo de carga. Esto se realiza utilizando una unidad pendular de marca Leybold, que tiene la funcionalidad de aplicar al motor, cargas de diferente naturaleza.



*Figura 17.* Curvas de operación del motor para pruebas con carga arrastrante.  
Fuente: diseño propio

Figura 17 muestra la curva de operación del motor de inducción alimentado por el módulo embebido, para pruebas con carga arrastrante. Estas cargas se dan cuando la carga genera movimiento y arrastra el motor. Estas cargas se dan por ejemplo en las grúas, cuando la carga por efecto de la gravedad está jalando al motor en sentido contrario al del torque del motor. Esto hace que el motor trate de frenar la carga y entonces, en ese caso la curva aparece con un torque en sentido contrario a la corriente del motor.

## 7 Conclusiones

La realización del trabajo de grado ha permitido conocer a mayor profundidad temas disciplinares de la tecnología eléctrica, como es el control de motores de inducción, la interrelación entre las diferentes formas de la corriente eléctrica, la importancia de los parámetros de los motores eléctricos y su evaluación

El diseño del tablero experimental presenta retos relacionados con la naturaleza de los circuitos electrónicos de potencia, que deben ser protegidos mediante fusibles de alta velocidad y suelen generar tensiones con componentes frecuenciales, que pueden inducir corrientes en la carcasa del motor.

Al realizar las diferentes pruebas, según las indicaciones del diseño, se valida la utilidad del tablero como recurso para la realización segura de actividades de carácter experimental para la enseñanza y la investigación.

En el desarrollo del trabajo de grado se ha contribuido en la escritura de un manual de utilización y pruebas con el módulo embebido, bajo una dinámica de revisión y retroalimentación del documento.

## **8 Recomendaciones**

Se propone que otros estudiantes continúen contribuyendo al proyecto de investigación de los docentes, implementando diferentes tipos de pruebas, tanto con la unidad pendular, como con otro tipo de sistemas de prueba.

Estos temas deben ser tratados a nivel de semilleros de investigación, puesto que se tornan demasiado dispendiosos para ser tratados a nivel de un trabajo de grado. Esto debido a que involucran un número significativo de pruebas y fases de prototipado con muchos ciclos de ensamble y des ensamble.

Debería haber una asignatura electiva en la que enseñen la electrónica de potencia para tecnólogos electricistas, ya que cada día crece la demanda de profesionales conocedores de estos temas, teniendo en cuenta que cada día crece el uso de energías alternativas y la movilidad eléctrica.

## 9 Referencias bibliográficas

- CONPES-3850. (2015). Fondo Colombia en paz. Bogotá: Departamento nacional de planeación Colombia.
- CONPES-3867. (2016). Estrategia de preparación institucional para la paz y el postconflicto. Bogotá: Departamento nacional de planeación Colombia.
- V. I. Susdorf, M. T. Aung, and A. S. Meshkov, “Design of series-wound motor control,” in *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, pp. 1–3.
- Mehta Samir, “No Title Nonlinear control of a series DC motor: Theory and experiment,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 1, pp. 134–141, 1998.
- Universidad de vigo. (14 de 11 de 2011). [www.quintans.webs.uvigo.es](http://www.quintans.webs.uvigo.es). Obtenido de [http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/electromagnetismo\\_electricidad\\_tipodesuministro.htm](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_electricidad_tipodesuministro.htm)
- Enersinc - Departamento\_nacional\_de\_planeación. (2017). Energy demand situation in Colombia, 136.
- Giceva, I. Z., Sarac, V. J., Gelev, S. A., & Cingoski, V. T. (2018). Single phasing of three phase induction motors under various load conditions. In *2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPIT.2018.8350459>
- Goyal, A. V., Agarwal, P., Bhatti, J. S., & Agarwal, V. (2014). Three phase induction motor drive using single-phase to three-phase cycloinverter with SVPWM technique. In *2014 Students Conference on Engineering and Systems* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCES.2014.6880084>
- Hareesh, A., Manisankar, B., & Jayanand, B. (2017). A novel three phase infinite level inverter (TILI) topology for induction motor drive application. In *2017 Asian*

*Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)* (pp. 1–8).  
IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACEPT.2017.8168619>

A. D. Chernyshev, T. A. Lisovskaya, and R. A. Lisovski, “Comparative analysis of different electrical motor types as a traction drive part in electrical transmission,” in 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1–5.

[http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/electromagnetismo\\_electricidad\\_tipodesuministro.htm](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_electricidad_tipodesuministro.htm)

I. K. G. Naidu, V. Santhi, “Design of Fuzzy Pi Controller for the Speed,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 6, 2015.

IPC-A-610-Work-Team. (2010). *Norma IPC-A-610E SP*. Bannockburn, Illinois: Blackfox training institute.

Sobczynski, D., & Bartman, J. (2018). High-speed three phase motor supplied from a single to three phase converter. In *2018 XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 100–103). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365711>

Vieira, T. E. D., Tofoli, F. L., & de Moraes, A. S. (2017). Evaluation of IGBT modules in ASDs submitted to overvoltage. In *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2017.7972497>

Vinodhini, J. S., Babu, R. S. R., & Glenn, J. A. (2016). Single phase to single phase step-down cycloconverter for electric traction applications. In *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* (pp. 4914–3647). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755387>