

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA Y CONTROL PWM DE  
UN MOTOR BRUSHLESS**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO ELECTRICISTA Y ELECTRÓNICO**

PRESENTA:

JOSÉ OTILIO CORTAZAR TORRES

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JESUS LÓPEZ GÓMEZ

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. FERMÍN MARTÍNEZ SOLÍS

CUNDUACÁN, TABASCO, A: ABRIL, 2025

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, Tabasco, el día 28 del mes de abril del año 2025, el que suscribe José Otilio Cortazar Torres, alumno del Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica con número de matrícula 182D24020, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de Ingeniero Electricista y Electrónico y titulado "Determinación de la frecuencia óptima y control PWM de un motor Brushless" dirigido por el Dr. Jesús López Gómez y el Dr. Fermín Martínez Solís.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 28 de abril 2025.



---

C. José Otilio Cortazar Torres

# Informe de originalidad

## DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA Y CONTROL PWM DE UN MOTOR BRUSHLESS

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

ÍNDICE DE SIMILITUD

### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorioinstitucional.buap.mx">repositorioinstitucional.buap.mx</a> Internet	1178 palabras — 6%
2	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Internet	451 palabras — 2%
3	<a href="http://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Internet	375 palabras — 2%
4	<a href="http://bibdigital.epn.edu.ec">bibdigital.epn.edu.ec</a> Internet	327 palabras — 2%
5	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	151 palabras — 1%
6	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet	78 palabras — < 1%
7	<a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a> Internet	74 palabras — < 1%
8	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Internet	68 palabras — < 1%
9	<a href="http://www.univalle.edu">www.univalle.edu</a> Internet	61 palabras — < 1%
10	<a href="http://tesis.ipn.mx">tesis.ipn.mx</a> Internet	58 palabras — < 1%



COORDINACIÓN  
DE ESTUDIOS  
TERMINALES



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2025  
Año de la  
Mujer  
Indígena

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/CD/0435/2025  
**FECHA:** 28 de abril de 2025.  
**ASUNTO:** Autorización de Impresión Definitiva.

**C. JOSÉ OTILIO CORTAZAR TORRES**  
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA  
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. JESÚS LÓPEZ GÓMEZ y el DR. FERMIN MARTÍNEZ SOLIS, titulado:

**"DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA Y CONTROL PWM DE UN MOTOR BRUSHLESS".**

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

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

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

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

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA



**DIRECCIÓN**

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA-370  
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008  
Consortio de  
Universidades  
Mexicanas  
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

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

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



**2025**  
AÑO DE LA  
Mujer  
Indígena

**DIRECCIÓN**

**MEMORANDO**

**PARA:** DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ  
DIRECTORA DE LA DAIA.  
**DE:** COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL  
**FECHA:** 08 DE ABRIL DE 2025  
**ASUNTO:** ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL  
**CCP:** ARCHIVO.  
**MEM/CET/370/ID370/2025**

PRESENTE.

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

**"DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA Y CONTROL PWM DE UN MOTOR BRUSHLESS"**

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

COMISIÓN REVISORA

**M.C. MANUEL GONZÁLEZ SOLANO**

Revisor

**M.C JUAN CARLOS MARTÍNEZ JIMÉNEZ**

Revisor

**M.C. DOMITILLO MARTÍNEZ  
HERNÁNDEZ**

Revisor

**ING. MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ VELÁZQUEZ**

Revisor

**M.C.I. MOISÉS MOHENO  
BARRUETA**

Revisor

**DR. JESÚS LÓPEZ GÓMEZ**  
Director de Trabajo Recepcional

**DR. FERMIN MARTÍNEZ SOLÍS**  
Co-Director de Trabajo Recepcional

# Carta de cesión de derechos

Villahermosa, Tabasco, a 28 de abril de 2025.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR y/o AUTORES en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA Y CONTROL PWM DE UN MOTOR BRUSHLESS"

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

## COLABORADORES

  
Dr. Jente  
Director del trabajo recepcional

  
C. José Otilio Santana Torres  
Egresado

  
Dr. Fermín Martínez Solís  
Co-Director del trabajo recepcional

## TESTIGOS

  
Ineg Carlos  
Testigo 1

  
Rodolfo  
Testigo 2

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la fuerza, la salud y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta tan significativa en mi vida.

A mi familia, por estar siempre presente en cada paso del camino, alentándome a continuar y enseñándome que rendirse no es una opción. Cada desafío superado ha sido un aprendizaje valioso. Con especial gratitud, agradezco a mis padres por su amor incondicional, por creer en mí y por motivarme día a día. Ustedes han sido y seguirán siendo mi mayor inspiración y mi fuerza para seguir adelante.

A mi director de tesis, el Dr. Jesús López Gómez, por su guía invaluable, su paciencia, confianza y compromiso a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su experiencia y por ser una pieza clave en mi formación académica y profesional.

A mi co-director de tesis, el Dr. Fermín Martínez Solís y revisores, agradezco sinceramente su tiempo, dedicación y valiosas observaciones que enriquecieron significativamente el desarrollo de este trabajo. Su guía y compromiso académico fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mis compañeros de universidad, con quienes compartí no solo clases, sino también desafíos, aprendizajes y momentos inolvidables. Gracias por su apoyo y por motivarme a seguir, incluso cuando las circunstancias eran difíciles al inicio de la carrera.

A mis amigos más cercanos, quienes siempre creyeron en mí y me acompañaron en los momentos más complicados, gracias por su apoyo constante y su confianza inquebrantable.

Finalmente, gracias a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a que este logro fuera posible. Este es un paso muy importante en mi vida, y no lo habría conseguido sin ustedes.

## Dedicatoria

A mi familia, por ser el pilar que ha sostenido cada paso de mi camino.

A mi madre Laura Torres Fuentes, por su amor incondicional, su fortaleza y su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por cada sacrificio silencioso, por cada palabra de aliento y por enseñarme con el ejemplo a nunca rendirme.

A mi padre José de la Luz Cortazar López, quien me acompaña desde la eternidad. Aunque físicamente no estés aquí, tu recuerdo, tus enseñanzas y tu amor siguen guiando cada uno de mis pasos. Esta meta también es tuya, porque tu voz y tu presencia viven en mi corazón. Te extraño cada día, y tu ausencia se convierte en fuerza para seguir adelante.

Para ambos, les debo todo lo que soy y lo que he logrado. Esta tesis es el resultado de un largo tiempo, trabajo y esfuerzo por lo que es para ustedes.

# Índice general

Capítulo 1. Generalidades.....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Marco teórico.....	7
1.2.1. Antecedentes.....	7
1.2.2. Fundamentos teóricos .....	11
1.2.2.1. Control por conmutación de motores Brushless.....	11
1.2.2.2. Control basado en conmutación trapezoidal .....	12
1.2.2.3. Circuito de accionamiento del motor BLDC.....	16
1.2.2.4. Inversor trifásico.....	18
1.2.2.5. Motor Brushless.....	24
1.2.2.6. Estator.....	27
1.2.2.7. Rotor .....	29
1.2.2.8. Principio de funcionamiento del motor Brushless.....	30
1.3. Justificación .....	31
1.4. Pregunta de investigación.....	32
1.5. Planteamiento del problema .....	32
1.6. Hipótesis .....	33
1.7. Objetivo general.....	34
1.7.1. Objetivos específicos.....	34
2.1. Calculo y construcción del circuito electrónico de potencia. ....	36
2.1.1. Circuito de protección para el circuito controlador.....	41
2.1.2. Circuito indicador.....	42
2.2. Montaje del motor BLDC trifásico. ....	43

Capítulo 3. Metodología de caracterización de la frecuencia óptima .....	48
3.1. Control trapezoidal en la tarjeta FPGA .....	49
3.1.1. Diseño del Software, conmutación trapezoidal. ....	54
3.1.2. Tarjeta FPGA modelo DE0-CV. ....	55
3.1.3. Módulo de comunicación inalámbrica WiFi. ....	57
3.1.4. Comunicación entre la PC y la tarjeta FPGA. ....	58
3.1.5. Conexión con el circuito electrónico de potencia. ....	59
3.2. Interfaz en LabVIEW. ....	60
3.3. Técnica de caracterización .....	64
3.3.1. Implementación de la técnica de caracterización .....	64
3.3.2. Medición de las fases del motor BLDC trifásico. ....	67
Capítulo 4. Resultados y discusión .....	68
4.1. Simulación del circuito electrónico de potencia. ....	68
4.2. Comparación de medición de señales de las fases .....	73
4.3. Resultados experimentales de la caracterización .....	75
4.4. Propuesta de diseño de la PCB del circuito de potencia .....	80
Conclusiones.....	84
Anexo A. Constancia de Estancia Académica .....	86
Anexo B. Código MATLAB de comparación de resultados de una Fase del motor .....	87
Anexo C. Código MATLAB de comparación de resultados de Fase a Fase del motor BLDC.....	89
Anexo D. Certificado de participación IDCS 2024.....	91
Anexo E. Constancia de participación del XX VIC UJAT 2024 .....	92
Anexo F. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional .....	93
Referencias .....	98

## Índice de tablas

Tabla 1. Secuencia de codificación de la conmutación trapezoidal. ....	14
Tabla 2. Secuencia de la conmutación trapezoidal para el voltaje de fase a fase. ....	15
Tabla 3. Polarización de los electroimanes para el control de dirección de giro. ....	31
Tabla 4. Tablas de verdad del circuito de protección para cada una de las fases del motor. ....	42
Tabla 5. Características físicas del motor BLDC trifásico. ....	43
Tabla 6. Distribución de puertos de entrada. ....	50
Tabla 7. Distribución de los puertos de salida. ....	51
Tabla 8. Valores de salida del Firmware. ....	53
Tabla 9. Mapeo de los puertos de salida. ....	54
Tabla 10. Distribución de pines de salida. ....	54
Tabla 11. Pines de conexión entre el módulo WiFi y la tarjeta FPGA. ....	58
Tabla 12. Salida de los 6 estados de la tarjeta FPGA. ....	59
Tabla 13. Datos registrados en el barrido de frecuencia. ....	75

# Índice de figuras

Figura 1. Análisis futuro de la demanda del motor BLDC, (Mohanraj et al., 2022).....	5
Figura 2. Campos de aplicación del motor BLDC. ....	6
Figura 3. Formas de onda de la conmutación trapezoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.).....	13
Figura 4. Diagrama de control de implementando la conmutación trapezoidal. ....	14
Figura 5. Señal fase a fase del motor BLDC Vuv, Vvw y Vwu. ....	16
Figura 6. Inversor trifásico. ....	17
Figura 7. Formas de onda de las señales a la salida del inversor trifásico. ....	18
Figura 8. Inversor trifásico para la conmutación de 6 pasos. ....	19
Figura 9. Caso 1 implementando el método de 6 pasos. ....	20
Figura 10. Caso 2 implementando el método de 6 pasos. ....	20
Figura 11. Caso 3 implementando el método de 6 pasos. ....	21
Figura 12. Caso 4 implementando el método de 6 pasos. ....	22
Figura 13. Caso 5 implementando el método de 6 pasos. ....	23
Figura 14. Caso 6 implementando el método de 6 pasos. ....	23
Figura 15. Señal de voltaje de la fase resultante por el método de 6 pasos. ....	24
Figura 16. Forma de onda de la corriente debido a los transistores. ....	24
Figura 17. Clasificación de los motores eléctricos. ....	25
Figura 18. Estructura interna de un motor BLDC, (Tacuri & Eduardo, s. f.) ....	26
Figura 19. Estator de un motor Brushless, (Tacuri & Eduardo, s. f.).....	27
Figura 20. Generación de la FCEM trapezoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.).....	28
Figura 21. Generación de la FCEM sinusoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.).....	28
Figura 22. Sección transversal de diferentes rotores, (Sierra, s. f.). ....	29
Figura 23. Estructura interna del motor BLDC, (López Arias, Castañeda González, 2023).....	30
Figura 24. Diagrama de bloques para la puesta en operación.....	35
Figura 25. Circuito inversor trifásico del motor Brushless. ....	36

Figura 26. Rama fase U del circuito electrónico.....	37
Figura 27. Circuito de protección del inversor trifásico.....	41
Figura 28. Circuito indicador. ....	42
Figura 29. Motor BLDC trifásico utilizado. a) Estator, b) Rotor.....	43
Figura 30. Montaje del motor BLDC a la base. ....	44
Figura 31. Placa de soporte y eje del motor.....	45
Figura 32. Resortes de ajuste. ....	45
Figura 33. Conexión de las fases del motor BLDC trifásico al circuito electrónico. ....	46
Figura 34. Conexión del circuito de potencia con el motor BLDC. ....	47
Figura 35. Diagrama de bloques del trabajo realizado. ....	48
Figura 36. Hardware y equipos utilizados para la caracterización. ....	49
Figura 37. Puertos de entrada y salida.....	50
Figura 38. Instrucciones de programación del sistema embebido. ....	52
Figura 39. FPGA modelo DE0-CV. (Mitzi Mendoza, 2020). ....	56
Figura 40. Distribución de pines FPGA DE0-CV. ....	57
Figura 41. Módulo de comunicación inalámbrica Wifi. ....	57
Figura 42. Pines de conexión del módulo WiFi. ....	58
Figura 43. Conexión entre el módulo WiFi y la tarjeta FPGA. ....	59
Figura 44. Conexión de la tarjeta FPGA con el circuito electrónico de potencia. ....	60
Figura 45. Interfaz en LabVIEW. ....	61
Figura 46. Red inalámbrica creada por el módulo WiFi.....	62
Figura 47. Descarga del archivo hexadecimal. ....	62
Figura 48. Ejecución del programa.....	63
Figura 49. Procedimiento para la implementación de la técnica de caracterización. ....	65
Figura 50. Señales del control trapezoidal de la tarjeta FPGA.....	66
Figura 51. Medición entre fases del motor BLDC trifásico. ....	67
Figura 52. Circuito electrónico construido en PROTEUS.....	68
Figura 53. Rama para la fase U construida en PROTEUS.....	69
Figura 54. Configuración del generador de pulsos en PROTEUS. ....	71
Figura 55. Medición a la salida de cada rama del circuito electrónico en PROTEUS. ...	72
Figura 56. Comparación de señales de la medición de cada una de las fases.....	73

Figura 57. Comparación de señales de la medición de fase a fase. ....	74
Figura 58. Gráfico Voltaje respecto a la Frecuencia. ....	77
Figura 59. Identificación de los tres comportamientos encontrados.....	78
Figura 60. Gráfico RPM respecto a la Frecuencia. ....	79
Figura 61. Captura del circuito esquemático. ....	81
Figura 62. Distribución de las pistas de la PCB diseñada. ....	82
Figura 63. Tierra aislada para cada capa de la PCB.....	83
Figura 64. Previsualización del diseño de la PCB.....	83

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

**Determinación de la frecuencia óptima y control  
PWM de un motor Brushless**

## Resumen

El uso de motores BLDC es en aplicaciones donde se requiere un control y un uso constante, por lo que, estos motores tienen la ventaja de presentar un mantenimiento mínimo, pueden proporcionar un alto torque, velocidades altas, y menor inercia por estas razones este tipo de motor ha ganado camino en la industria y en otras áreas. El objetivo principal en este trabajo de investigación fue presentar una técnica de caracterización por medio del control basado en conmutación trapezoidal (seis pasos). Para ello, se construye el circuito de potencia constituido por un circuito de protección, un circuito indicador y, por último, el circuito inversor encargado de la conmutación para el cual se realizan los cálculos pertinentes y se utiliza una configuración Darlington debido a que esta configuración puede proporcionar la corriente que el motor demanda. La simulación del circuito de potencia nos muestra un correcto funcionamiento en la conmutación al comparar las señales tomadas a la salida del circuito inversor trifásico de forma experimental y se visualiza con la simulación. De igual forma se comparan las señales medidas de fase a fase del motor BLDC. La caracterización se basa en encontrar una frecuencia óptima en función de un rango de voltaje con el propósito de que esta frecuencia se debe encontrar en una zona lineal en la cual se puede traducir a una alta eficiencia en el motor BLDC. Los resultados muestran que al graficar las variables encontradas respecto a las frecuencias fijadas presentan comportamientos distintos, el voltaje se presenta no lineal, y se destacan tres comportamientos de los cuales se encuentran las ecuaciones que describen su comportamiento. Para el caso de la velocidad del motor medida en RPM se ha encontrado un comportamiento lineal. El comportamiento y las características de funcionamiento encontrados son de manera particular del motor BLDC trifásico, esto en puesto en marcha al fijar diferentes frecuencias. Con los resultados encontrados, el motor BLDC proporciona diferentes niveles de velocidad y torque según la frecuencia encontrada y fijada, por lo que, el motor se puede adaptar y aplicar en diversas aplicaciones donde se requiere confiabilidad en el control y desempeño óptimo en el funcionamiento.

**Palabras claves:** BLDC, Control PWM, EMF, Frecuencia óptima, Motor Brushless, PCV.

## Abstract

The use of BLDC motors is in applications where control and constant use is required, therefore, these motors have the advantage of having minimal maintenance, can provide high torque, high speeds, and lower inertia for these reasons this type of motor has gained ground in industry and other areas. The main objective in this research work was to present a characterization technique by means of control based on trapezoidal commutation (six steps). For this purpose, the power circuit is built, consisting of a protection circuit, an indicator circuit and, finally, the inverter circuit in charge of the commutation for which the relevant calculations are performed and a Darlington configuration is used because this configuration can provide the current demanded by the motor. The simulation of the power circuit shows a correct operation in the commutation by comparing the signals taken at the output of the three-phase inverter circuit experimentally and visualized with the simulation. In the same way, the signals measured from phase to phase of the BLDC motor are compared. The characterization is based on finding an optimum frequency in function of a voltage range with the purpose that this frequency must be found in a linear zone in which it can be translated to a high efficiency in the BLDC motor. The results show that when plotting the variables found with respect to the fixed frequencies they present different behaviors, the voltage presents a non-linear behavior and three behaviors or zones stand out, of which the equations that describe their behavior are found. For the case of the motor speed measured in RPM, a linear behavior has been found. The behavior and operating characteristics found are particular to the three-phase BLDC motor, that is, when set in motion at different frequencies. With the results found, the BLDC motor provides different levels of speed and torque according to the frequency found and set, so the motor can be adapted and applied in various applications where reliability in control and optimum performance in operation is required.

**Keywords:** BLDC, Control PWM, EMF, Optimal frequency, Motor Brushless, PCV.

# Capítulo 1. Generalidades

## 1.1. Introducción

Un motor eléctrico es un dispositivo electromecánico de conversión de energía, el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica en forma de movimiento lineal o rotacional. (Solomon et al., 2020). Los motores eléctricos clásicos se pueden dividir en dos grupos, según el tipo corriente utilizada para su alimentación:

- *Motores alimentados por corriente alterna (CA)*. Estos motores se alimentan de una red eléctrica trifásica.
- *Motores alimentados por corriente continua (CD)*. Estos motores se alimentan mediante, sistemas rectificadores de diodos o tiristores, (Sikora et al., 2022).

Estos grupos de motores que se han utilizado durante mucho tiempo, tanto el estator como el rotor tenían devanados (excluidos los motores pequeños, por ejemplo, en juguetes), donde un devanado actúa como devanado de excitación. Estos modelos debían generar un flujo magnético y el otro era una armadura sinuosa. La invención de los potentes imanes construidos a partir de tierras raras brindó a los diseñadores de motores nuevas posibilidades de diseño. Es posible eliminar el devanado generador del campo magnético y en su lugar instalar imanes permanentes. Gracias a este diseño, no se necesita el flujo de corriente para generar el campo magnético (sin devanado de excitación), con esto se eliminan las pérdidas de energía presentes en el devanado de excitación de forma automática. El uso de imanes potentes para excitar máquinas eléctricas permite la construcción de máquinas más eficientes.

Las máquinas eléctricas excitadas por imanes permanentes se pueden dividir en dos grupos debido a la ubicación de los imanes permanentes.

- *Máquinas con imanes permanentes sobre el estator.* En estas máquinas, el devanado del inducido situado en el rotor es accionado por un conmutador mecánico clásico.
- *Máquinas con imanes permanentes sobre el rotor.* En estas máquinas, el devanado no giratorio del inducido requiere una alimentación eléctrica por medio del llamado conmutador electrónico. Esta parte alimenta los devanados de forma sincrónica con la rotación del rotor.

El grupo de *máquinas con imanes permanentes sobre el rotor* eliminó el conmutador mecánico, que por su durabilidad limitaba la vida útil de las máquinas eléctricas. El conmutador mecánico podía provocar chispas, lo que provocaba perturbaciones electromagnéticas adicionales. El uso de un conmutador electrónico aumentó el uso de componentes electrónicos porque los elementos de conmutación correctamente seleccionados, como los transistores de potencia, son mucho más duraderos que los elementos mecánicos. Los motores con imanes colocados en el rotor se pueden subdividir en dos grupos:

- *Motor de corriente continua sin escobillas (BLDC)* en el que los voltajes inducidos durante la rotación del rotor tienen una forma de onda trapezoidal.
- *Motor de imán permanente (PMSM)* en el que los voltajes inducidos durante la rotación del rotor tienen una forma de onda sinusoidal.

La alimentación para ambos grupos de motores requiere del seguimiento de la posición angular del rotor para poder controlar adecuadamente los interruptores del conmutador electrónico. Los motores con una distribución sinusoidal del campo magnético (PMSM) requieren un suministro de tensión sinusoidal, lo que impone mayores exigencias al sistema conmutador electrónico. Los motores con distribución trapezoidal del campo magnético (BLDC) se alimentan de tal manera que la tarea del conmutador electrónico es únicamente conmutar la tensión a cada devanado de forma sincronizada con la rotación del rotor, (Sikora et al., 2022).

Por otra parte, los motores de corriente continua (CC) se siguen utilizando ampliamente en sistemas de accionamiento de energía eléctrica que tienen demandas de arranque y

regulación de velocidad, este tipo de motores tienen alta eficiencia y buen rendimiento de regulación de velocidad. Los motores CC de pequeña capacidad todavía se utilizan ampliamente en sistemas de control y automatización. Pero en los motores de CC tradicionales, la conmutación mecánica se implementa mediante el uso de escobillas, lo que a futuro provoca problemas como fricción mecánica que acortaría la vida útil y generaría ruido, chispas eléctricas e interferencias de radio, entre otros. Considerando las desventajas del alto costo de producción y el inconveniente mantenimiento continuo, conlleva a que ha sido limitada a aplicaciones en áreas particulares. Por lo tanto, las aplicaciones de tamaño pequeño y mediano necesitan urgentemente nuevos motores de alto rendimiento.

En comparación con la gran variedad de motores, los motores Brushless BLDC tienen las ventajas de tener una alta potencia de salida, baja vibración, bajo nivel de ruido y una larga vida útil además que estas ventajas están presentes en pequeños y grandes motores BLDC. Una de las ventajas más sobresaliente e importante es la eficiencia que estos motores pueden proporcionar, ya que estos motores pueden controlar continuamente la fuerza de rotación máxima (Par). Por el contrario, los motores con escobillas sólo alcanzan su Par máximo en determinados puntos durante la rotación. Para que un motor con escobillas entregue el mismo Par que un motor sin escobillas, se deben utilizar imanes más grandes lo que implica un coste mayor y su tamaño aumenta. La segunda gran ventaja, relacionada con la primera, es la facilidad de control, es decir, un motor BLDC se puede controlar mediante un mecanismo de retroalimentación para entregar exactamente el Par y la velocidad deseada. A su vez, un control preciso reduce el consumo de energía y la generación de calor y prolonga la vida útil de la batería si el motor funciona con batería. Por este motivo, incluso los motores BLDC pequeños pueden generar una potencia considerable. Como su nombre lo indica en los motores BLDC no cuenta con escobillas en su estructura por lo que ofrecen una larga vida útil y bajo ruido eléctrico. En los motores con escobillas es común que con el movimiento continuo las escobillas y el conmutador por el contacto se desgastan lo que puede llevar a crear chispas en el contacto. El ruido eléctrico es el resultado de fuertes chispas en el área donde las escobillas pasan a través del espacio del conmutador. Esta es una de las razones por la que los motores BLDC a menudo se consideran preferibles en

aplicaciones donde es necesario evitar el ruido eléctrico, tales como en la robótica donde se requiere alta precisión y desempeño en los actuadores para controlar el movimiento de robots industriales, en los autos eléctricos donde el desempeño de funcionamiento es esencial, elevadores, cintas transportadoras, polipastos, maquinas herramienta CNC, entre otras aplicaciones.

Por otro lado, una de las principales desventajas es que el motor BLDC puede presentar fluctuación al arranque debido a la reactancia inductiva, esto quiere decir que el arranque no es tan suave como el de los motores con escobillas. Además, se requiere de amplios conocimientos especializados y equipos para su reparación y mantenimiento, lo que los hace menos accesibles para el usuario promedio. Además, otra de las desventajas es el alto costo del hardware; sí se trata de quipos de alto rendimiento, dependerá del procesamiento, almacenamiento, entrada, salida, y entrada/salida, el cual sigue siendo actualmente un objeto de estudio y mejora. El hardware se debe adaptar a la estructura del motor BLDC, es por esta razón que se debe conocer las características y parámetros que componen al motor. Por esta razón, con los parámetros obtenidos en una caracterización correcta, se podría realizar un buen control y, garantizar un alto rendimiento y eficiencia del motor BLDC.

Debido a las ventajas anteriormente mencionadas el motor Brushless BLDC basados en rotor interno o externo se seleccionan y utilizan en diversas áreas dependiendo una aplicación específica, (Mohanraj et al., 2022), (Xia, 2012). Además, la relación entre el par entregado y el tamaño del motor es más alto, es decir, un motor BLDC de tamaño y peso pequeño puede entregar un alto torque, lo que lo hace más útil y versátil en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos. Los motores BLDC son un tipo de motor síncrono, esto significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor gira en la misma frecuencia. Los motores BLDC no experimentan el “deslizamiento” que normalmente se presenta en los motores de inducción. El fenómeno llamado deslizamiento en motores eléctricos se presenta cuando existe una diferencia entre la velocidad del campo magnético (velocidad de sincronismo) y la velocidad del rotor. Los motores BLDC vienen en versiones monofásicas, bifásicas y configuraciones trifásicas. Correspondiente a su tipo, el estator

tiene el mismo número de devanados. Fuera de estos, los motores trifásicos son los más populares y utilizados, (AN885, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, 2003).

En la Figura 1 se muestra como el motor Brushless va ganando campo en diferentes sectores, así como también la posible tendencia en el crecimiento en el uso del motor BLDC en los próximos años.

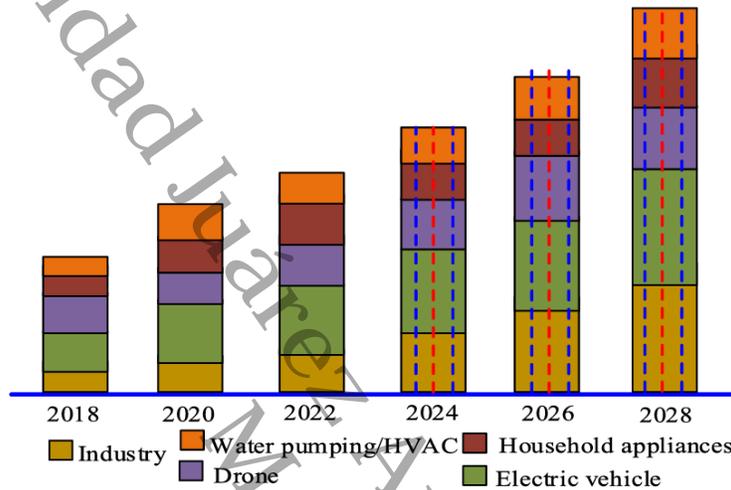


Figura 1. Análisis futuro de la demanda del motor BLDC, (Mohanraj et al., 2022).

En la Figura 2 se ilustra los diferentes campos de aplicación en donde el motor Brushless ha tomado gran impacto debido a sus características de funcionamiento las cuales pueden ser aprovechadas para alcanzar u obtener un buen aprovechamiento.

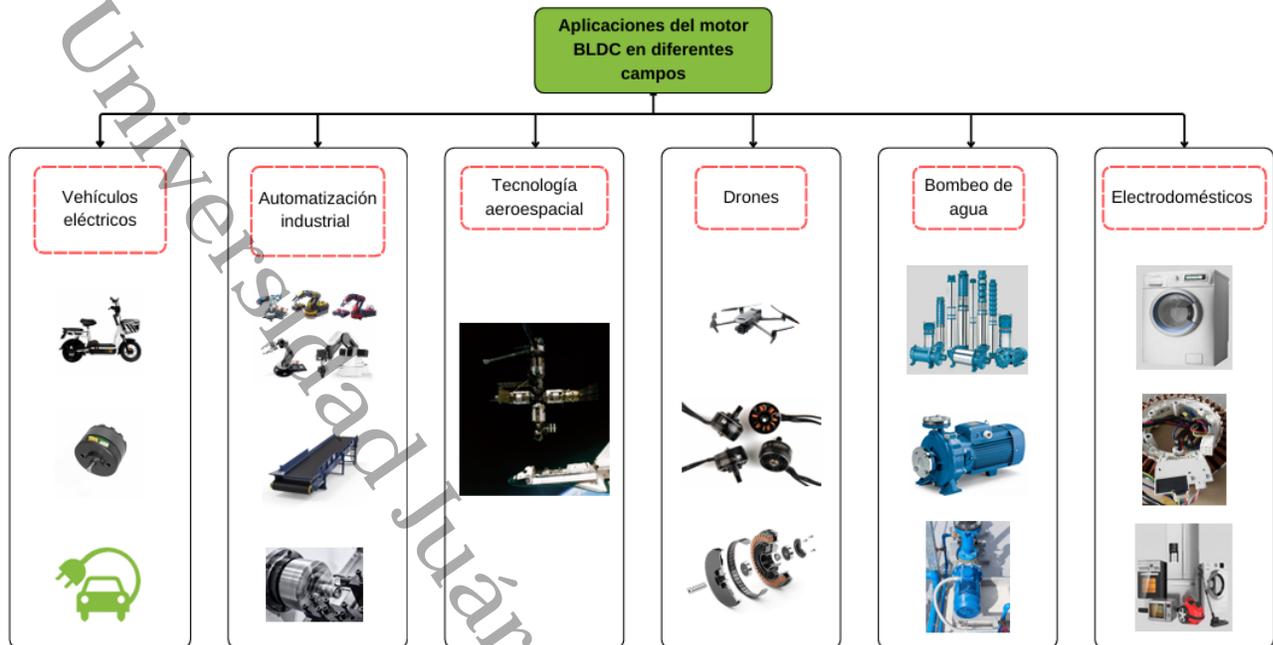


Figura 2. Campos de aplicación del motor BLDC.

En los últimos años, los motores BLDC se encuentran presente en las industrias tales como en electrodomésticos, automoción, Aeroespacial, Consumo, Médico, Automatización Industrial Equipos e Instrumentación. Los motores BLDC se destacan en aplicaciones donde se requiere control y en lugares donde los componentes se utilizan con frecuencia, por lo que, se busca componentes de larga duración. Los motores de tracción de vehículos eléctricos es un área donde los motores de Brushless pueden destacar. Esto se debe a que el sistema funciona con una batería limitada, por lo que los motores deben tener una alta eficiencia y ser compactos para que puedan ajustarse a espacios reducidos, (Xia, 2012), (Solomon et al., 2020). En la industria, se requieren motores de alta precisión y eficiencia, y los motores BLDC pueden cumplir con estos requisitos. Los motores BLDC proporcionan un torque fino en aplicaciones estáticas sin presentar fluctuaciones en comparación con otro tipo de motores, además de que proporcionan velocidades altas, un alto torque, y menor inercia, principalmente. Dado que los motores Brushless están ganando popularidad en diferentes ramas de la industria y se encuentran presentes en nuestra vida diaria, es importante conocer su funcionamiento y, con esto, dar a conocer una técnica de caracterización estos motores con la cual se deba encontrar las características de funcionamiento y parámetros que componen al motor. Al conocer estas características y parámetros, podemos tener la

certeza que el motor BLDC trabaje de manera eficiente sin presentar perturbaciones en su funcionamiento con la frecuencia óptima encontrada correctamente.

## **1.2. Marco teórico**

### **1.2.1. Antecedentes**

El motor BLDC se desarrolla sobre la base de motores CC con escobillas. La teoría moderna de las máquinas se estableció cuando Faraday descubrió el fenómeno de inducción del electromagnetismo en 1831. El primer motor de CC nació en la década de 1840, limitado por el desarrollo de dispositivos electrónicos de potencia y materiales magnéticos permanentes, el motor BLDC se diseñó con éxito hasta más de un siglo después. En 1915, el estadounidense, Irving Langmuir, inventó el rectificador de mercurio para controlar el electrodo de la red e hizo el convertidor CC/CA (Xia, 2012). En contraposición a las desventajas de los motores tradicionales, en la década de 1930, algunos estudiosos comenzaron a desarrollar motores sin escobillas en los que se implementó la conmutación electrónica, lo que hizo preparativos para el motor BLDC. Sin embargo, en aquella época los dispositivos electrónicos de potencia se encontraban todavía en una fase inicial de desarrollo y, los estudiosos no podían encontrar un dispositivo de conmutación adecuado. Este tipo de motor, con un funcionamiento menos fiable y de baja eficiencia, sólo se utilizó en el laboratorio en lugar de popularizarse. En 1955, Harrison y Rye presentaron la primera patente para un circuito conmutador de tiristores que reemplazaba a los equipos de conmutación mecánicos. Este es exactamente la primera base del motor BLDC, el funcionamiento son los siguientes: cuando el rotor gira, se induce una fuerza electromotriz periódica (EMF) en el devanado de señal, lo que conduce a la conducción de tiristores relacionados. Por lo tanto, los devanados de potencia se alimentan por turnos para lograr la conmutación. Sin embargo, se presentaron problemas el principal es que cuando el rotor deja de girar, no se puede producir EMF inducido en los devanados de señal y el tiristor no está polarizado, por lo que el devanado de potencia no puede alimentar la corriente y este tipo de motor sin escobillas no tiene par de arranque y el consumo de energía es grande. Para superar

estos problemas, se introdujeron conmutadores con planta centrífuga o se colocaron imanes de acero para garantizar que el motor arrancara de manera confiable. Posteriormente, mediante numerosos experimentos y prácticas, se desarrolló el motor sin escobillas de conmutación electrónica con la ayuda de elementos de efecto Hall en 1962, lo que inauguró una nueva era en la producción de motores BLDC. En la década de 1970, se utilizó con éxito un diodo sensor magnético, cuya sensibilidad es casi miles de veces mayor que la del elemento de efecto Hall, para el control de motores BLDC. Más tarde, a medida que se desarrollaba la industria eléctrica y electrónica, surgieron una gran cantidad de semiconductores de potencia de alto rendimiento y materiales magnéticos permanentes como el samario cobalto y NdFeB (neodimio), que establecieron una base sólida para el uso generalizado de motores BLDC. En 1978, la sucursal Indramat de Mannesmann Corporation de la República Federal de Alemania lanzó oficialmente el motor DC sin escobillas MAC y su sistema de accionamiento en las ferias comerciales de Hannover, lo que indica que el motor BLDC había entrado en la etapa práctica.

Con el desarrollo de materiales magnéticos permanentes, microelectrónica, electrónica de potencia, técnicas de detección, tecnología de automatización y control, especialmente los dispositivos con conmutación de potencia como el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), el tiristor conmutado de puerta integrada (IGCT), etc. Los motores BLDC en los que se utiliza conmutación electrónica están creciendo hacia diferentes direcciones donde se busca una alta eficiencia. A finales de la década de 1990, las técnicas informáticas y las teorías de control se desarrollaron rápidamente. Los microprocesadores como las unidades de microcontrolador (MCU), los procesadores de señales digitales (DSP), los conjuntos de puertas programables de campo (FPGA) y los dispositivos lógicos programables complejos (CPLD) experimentaron un amplio desarrollo sin precedentes, al tiempo que se dio un salto cualitativo en la velocidad, espacio y el almacenamiento de las instrucciones, lo que provocó aún más la evolución del motor Brushless. Cabe mencionar que constantemente se utilizan una serie de estrategias y métodos de control, utilizados en sistemas de accionamiento de motores BLDC. Estos métodos pueden mejorar hasta cierto punto el rendimiento de los sistemas de accionamiento de motores BLDC. (Xia, 2012). El motor Brushless en últimos los años

ha ganado popularidad por las características que lo componen y su versatilidad en diferentes aplicaciones lo que representa una gran ventaja en comparación a otros tipos de motores. Con el tiempo lograra desplazar a los motores con escobillas los cuales son los más utilizados en su mayoría en distintas áreas de la industria como la automotriz, la aeroespacial, la comunicación, la robótica, así como los podemos encontrar en los hogares. El motor BLDC para su control se puede utilizar sensores de efecto hall o simplemente no usarlos e implementar otras técnicas para determinar la posición del rotor, así como también las distintas técnicas de control por conmutación. Para la realización de este estudio es necesario conocer cómo se trabaja con el motor BLDC y como se busca mejorar las características de funcionamiento de este es por esto por lo que a continuación, se presenta las investigaciones que indagan acerca del motor BLDC.

En (Kolano, 2019), se plantea el uso de un sistema donde los puntos de conmutación se determinan usando un algoritmo de estimación de conmutación. Mediante un microcontrolador el cual está en función de las señales de conmutación de los sensores de efecto Hall se realiza el cálculo de los puntos de conmutación. En el sistema presentado, la señal de los sensores solo proporciona información la cual permite realizar la medición de la velocidad de rotación y determinar la posición del rotor. Con esta información el sistema de gestión sincroniza el algoritmo el cual controla el ciclo funcionamiento de los transistores y realiza el cálculo de tiempo de conmutación óptimo sin tomar en cuenta la precisión de colocación de los sensores y que la conmutación se realice en los puntos óptimos. Por otro lado en (Dong et al., 2016) buscando solucionar las fallas de los sensores de efecto Hall se propone un esquema control tolerante de fallas (FTC) nuevo basado en el proceso de diagnóstico de fallas (FDP) y un observador de seguimiento de vectores. Se propone un método para la identificación de la duración del FDP basado en un análisis de la estimación de aceleración y los resultados del diagnóstico de fallas. El control tolerante de fallas propuesto garantiza un funcionamiento suave del variador en estado estable y moderadas aceleraciones en caso de presentar fallas hasta en dos sensores de efecto Hall. Ahora bien en (Ertl & Weber, 2020) se proponen dos métodos para detectar la velocidad de un motor Brushless hasta de 18, 000 RPM sin contar con sensores. El primer método detecta componentes de ondulación de corriente a bajas velocidades para poder calibrar la constante del motor.

Posteriormente pasa a un método de medición de fuerza electromotriz inversa (BEMF) para poder funcionar. El método BEMF se calibra automáticamente por lo que no se requiere realizar la parametrización del motor. El método dos solo utiliza la detección del componente de ondulación de corriente. Según las pruebas realizadas el primer diseño puede no ser adecuada para aplicaciones de alta precisión en cambio el segundo método es significativamente más preciso pero su costo es más elevado debido al uso de un microcontrolador más potente. En (Saritas & Buyukyildiz, 2020), se realizó el estudio a un motor BLDC sin sensores y debido a que no es lineal, se utilizó un controlador de lógica difusa Tipo 2, la cual es una técnica que implementa inteligencia artificial, para resolver de mejor manera las incertidumbres en el sistema. De la simulación de lógica difusa tipo 1 y tipo 2 se obtuvieron resultados muy similares entre sí. Además, los conjuntos difusos tipo 2 incluyen gran variedad de conjuntos difusos de tipo 1 integrados. Por lo que, se obtiene una respuesta estable del sistema y se pueden describir las incertidumbres. En (S. Selva Pradeep & Marsaline Beno, 2022), se propone una técnica de control de velocidad inteligente sin llave para un motor Brushless implementando una red adaptativa basada en sistemas de inferencia difusa (ANFIS) basado en un algoritmo de colonias de abejas artificiales (Artificial Bee Colony por sus siglas en Ingles ABC). El controlador ANFIS se utiliza para generar señales Hall así eliminando los sensores de efecto Hall por otro lado la generación de pulsos basada en un algoritmo de colonias de abejas artificiales (ABC) elimina los circuitos de puerta lógica que por lo general son los utilizados en generar pulsos de conmutación. Los resultados obtenidos en la simulación demuestran que la metodología propuesta es eficaz para el control de velocidad de un motor BLDC. Ahora en (Chowdhury et al., 2013) dan a conocer un enfoque nuevo de conmutación para la puesta en marcha sin la implementación de sensores de un motor Brushless usando el circuito convencional de conmutación de seis interruptores. Se desarrolló un esquema de instrumentación con una técnica innovadora donde no se usan sensores para determinar la posición del rotor y está basada en realizar la conmutación con solo cuatro interruptores. La posición del rotor se detecta usando de conmutación de cuatro interruptores llamada EMF inverso (Fuerza Electromotriz). El sistema obtuvo un buen rendimiento a altas velocidades en cambio para bajas velocidades se presenta cierta no linealidad.

En (Kim & Ehsani, 2004) presentan la implementación de una técnica de control sin el uso de sensores para motores Brushless. Este método propuesto resuelve el problema de detectar la posición del rotor que se presenta en los motores BLDC a velocidades bajas y proporciona un funcionamiento muy preciso desde casi cero hasta alcanzar altas velocidades. La solución propuesta es implementar una nueva función de enlace de flujo, la cual es independiente de la velocidad. Se obtuvo una capacidad de detección de posición a aproximadamente 1.5% de la velocidad nominal lo que resulta en que el arranque sea más sencillo que los métodos convencionales. Por otra parte en (Azizah & Saputro, 2023) se desarrolla un control de velocidad utilizando el método Back EMF del cual se obtiene una velocidad óptima, eficiente y un rendimiento seguro. El sistema de control implementa el controlador IC IR2101 y el circuito de conmutación MOSFET IRFZ44N. Se utiliza un motor BLDC de 1000 KV, controlado por un Arduino y un ESP32 el cual es monitoreado por medio de la plataforma Blynk. El sistema de control es capaz de moderar la rotación del motor y estabilizar la velocidad cuando se presenta un cambio de carga. En el estudio realizado en (Ali et al., 2024) se implementó un control PID a un motor Brushless en donde para ajustar las ganancias del controlador ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ), se decidió un enfoque de prueba y error, y se implementó un algoritmo conocido como Gray Wolf. El control PID que regula la velocidad del motor debe configurarse en línea para implementar el uso de tecnologías inteligentes, y el ajuste de las ganancias se realiza mediante la red neuronal. La red neuronal artificial (RNA) fue la utilizada en el estudio debido a que es uno de los métodos más prometedor por las características que ofrece para controlar la velocidad de motores BLDC. Las redes neuronales artificiales garantizan una solución factible para los sistemas neuronales dentro del sistema del motor porque cuentan con una adaptación a relaciones complejas y no lineales dentro del sistema.

## 1.2.2. Fundamentos teóricos

### 1.2.2.1. Control por conmutación de motores Brushless

La característica principal del motor BLDC es que al no poseer escobillas se requiere conocer la posición del rotor y contar con un sistema para lograr la conmutación; para controlar la velocidad se necesita medir la corriente del motor, así mismo se necesita una

señal PWM para la parte de potencia, (Mitzi Mendoza, 2020), (López Arias, Castañeda González, 2023).

Como se ha mencionado cada motor BLDC cuenta con bobinas distribuidas por toda la periferia del estator, comúnmente se encuentran con un desfase de  $120^\circ$  entre cada una, con la conmutación electrónica se ejerce un control independiente para cada bobina.

Al mismo tiempo, se debe suministrar corriente siguiendo una lógica de conmutación sincronizada con la posición del rotor, por lo que, es necesaria una retroalimentación de los sensores de posición para la conmutación. Hay que mencionar que se puede omitir el uso de sensores implementando un algoritmo de control que estima la posición del rotor. La tensión del motor se controla usando transistores de potencia MOSFET los cuales funcionan como un regulador de tensión lineal.

Existen tres tipos de algoritmos de control de motores Brushless: (Tacuri & Eduardo, s. f.), (Mitzi Mendoza, 2020), (López Arias, Castañeda González, 2023), (Seminario Gastelo, 2021).

- Conmutación trapezoidal.
- Conmutación sinusoidal.
- Conmutación por control vectorial.

Estos algoritmos de control basados en conmutación deben contar con:

- PWM para el control de velocidad del motor.
- Sistema para la conmutación del motor.
- Proceso para determinar la posición del motor.

#### 1.2.2.2. Control basado en conmutación trapezoidal

El control por conmutación trapezoidal conocido como método de 6 pasos (6-steps) es el método más simple, por lo que, es el más empleado para el control de motores BLDC. Este control se basa en energizar dos de las bobinas del estator simultáneamente, esto para que la corriente circule por dos devanados, mientras la tercera bobina estará desactivada, es decir, en esta bobina no habrá circulación de corriente. Las bobinas se

van alternando sucesivamente, lo que conlleva a que la corriente circule por diferentes devanados hasta cumplir un periodo de seis posibles combinaciones. En la Figura 3, se muestra la forma característica del control trapezoidal formada por cada fase.

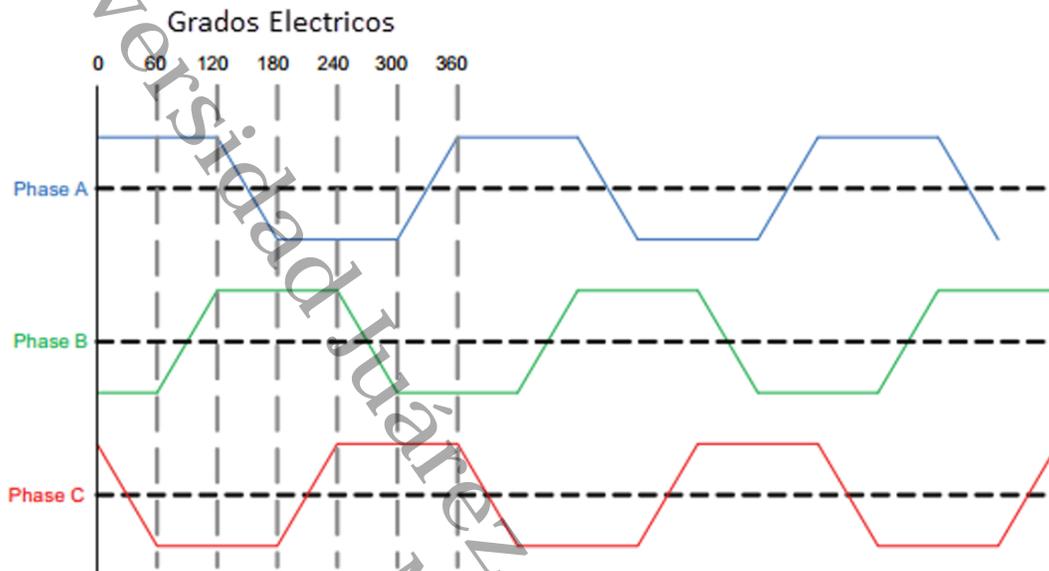


Figura 3. Formas de onda de la conmutación trapezoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.)

La tensión que llega al rotor es de forma trapezoidal en la cual permite una tensión trifásica que tiene una forma rectangular, esta se usa para crear un campo de rotación con un torque relativamente bajo. La importancia de conocer la posición del rotor en cada momento es para alinear el voltaje aplicado con la fuerza contra electromotriz (FEM), con esta condición cumplida obtenemos un mayor control y una mejor relación torque/corriente, (Seminario Gastelo, 2021), (Villarejo Mañas, 2017). Es necesario una etapa de potencia, la cual alimente el motor BLDC en cada una de las fases, por lo que, es necesario un inversor trifásico en el cual lo componen transistores MOSFET (Seminario Gastelo, 2021). En la Figura 4, se ilustra el diagrama que resume el control por conmutación trapezoidal donde se puede observar la conexión en estrella de las fases del motor BLDC, los transistores, y el microcontrolador encargado de realizar el ajuste del ciclo de trabajo.

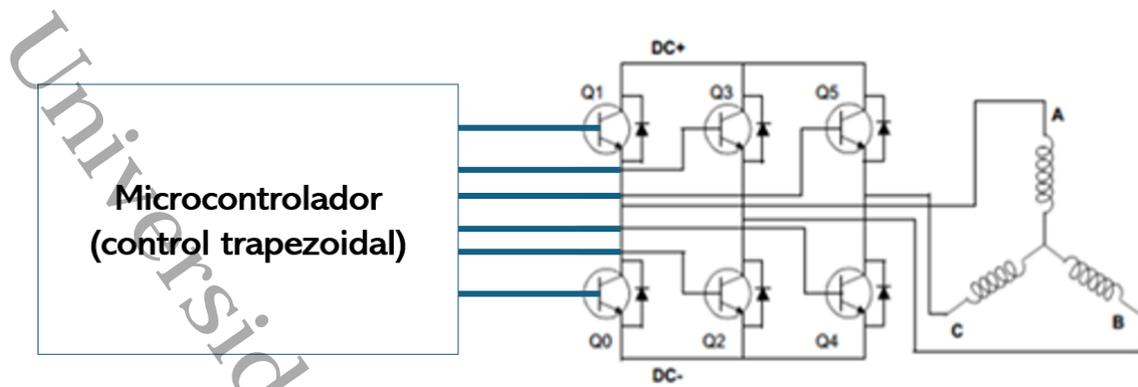


Figura 4. Diagrama de control de implementando la conmutación trapezoidal.

Se sabe que en un instante de tiempo dos devanados del motor estarán activos y el devanado faltante estará desconectado, en ese momento se puede detectar la FEM porque se produce un llamado “cruce cero” cuando esta tome un valor medio entre un voltaje positivo y un voltaje negativo. La secuencia de conmutación sigue un estado de activación de las bobinas en el cual se realiza cada  $60^\circ$ . En la Tabla 1, se tiene la secuencia lógica de activación de los interruptores del inversor donde cada una de las fases sigue una activación de tensión positiva, negativa o se encuentra apagada, respectivamente. Dos bobinas son alimentadas y la bobina restante se encuentra inactiva. En cada  $60^\circ$  eléctricos, uno de los interruptores cambia de estado, siguiendo esta lógica son seis pasos, los cuales se deben cumplir para formar un ciclo eléctrico, por lo que, el número de ciclos eléctricos la determinan el número de pares de polos del motor Brushless, (Tacuri & Eduardo, s. f.).

Tabla 1. Secuencia de codificación de la conmutación trapezoidal.

Estados	Interruptores						Estado de las fases del motor		
	a	b	c	d	e	f	Fase A	Fase B	Fase C
Estado 1	1	0	0	1	0	0	+	-	Apagada
Estado 2	0	0	0	1	1	0	Apagada	+	-
Estado 3	0	1	0	0	1	0	-	Apagada	+
Estado 4	0	1	1	0	0	0	+	-	Apagada
Estado 5	0	0	1	0	0	1	Apagada	+	-
Estado 6	1	0	0	0	0	1	-	Apagada	+

El torque del motor se produce por el diferencial entre el campo magnético de las bobinas del estator y de los imanes permanentes presentes en el rotor, el torque ideal se presenta cuando los campos se encuentran  $90^\circ$  desfasado uno del otro, a medida que el ángulo de desfase disminuye el torque hace lo mismo hasta llegar a moverse justos, es decir, se encontrarán iguales, al llegar a este punto, podemos decir que el torque descenderá a cero, este es el motivo, por el cual el campo magnético producido por las bobinas debe cambiar de posición siguiendo una secuencia lógica para que el motor se mantenga en marcha.

Por otro lado, en la Tabla 2, se tiene la pauta del voltaje de fase a fase siguiendo la secuencia de activación de los interruptores.

Tabla 2. Secuencia de la conmutación trapezoidal para el voltaje de fase a fase.

Estados	Interruptores						VAB	VBC	VCA
	a	b	c	d	e	f			
Estado 1	1	0	0	1	0	0	Vcc	-Vcc/2	-Vcc/2
Estado 2	0	0	0	1	1	0	Vcc/2	-Vcc	Vcc/2
Estado 3	0	1	0	0	1	0	-Vcc/2	-Vcc/2	Vcc
Estado 4	0	1	1	0	0	0	-Vcc	Vcc/2	Vcc/2
Estado 5	0	0	1	0	0	1	-Vcc/2	Vcc	-Vcc/2
Estado 6	1	0	0	0	0	1	Vcc/2	Vcc/2	-Vcc

Con la secuencia de activación de los interruptores mostrada en la Tabla 2, se obtienen las señales para cada fase generadas por el inversor trifásico del motor BLDC, como se muestra en la Figura 5 .

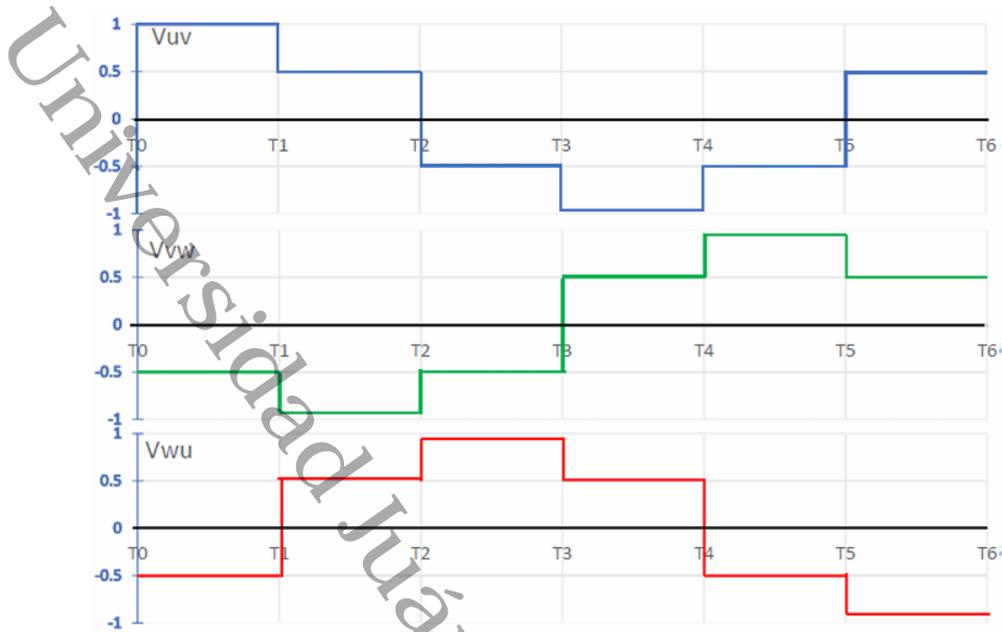


Figura 5. Señal fase a fase del motor BLDC  $V_{uv}$ ,  $V_{vw}$  y  $V_{wu}$ .

Las señales mostradas en la Figura 5 son señales de voltaje alterno las cuales se encuentran desfasadas  $120^\circ$  una respecto a otra con la característica que estas señales de voltaje fueron generadas a partir de un inversor trifásico, el cual es alimentando por una fuente de voltaje de CD.

#### 1.2.2.3. Circuito de accionamiento del motor BLDC

Un motor BLDC cuenta con un sistema de control que en la mayoría de los casos consta con dos partes fundamentales, los cuales son el hardware y el software. El hardware se compone de un circuito principal, un circuito inversor y un circuito de protección. Por su parte, el software incluye el programa principal desarrollado en la tarjeta experimental FPGA. (Mitzi Mendoza, 2020).

Se llama **inversor** a un sistema que convierte la corriente directa a corriente alterna, es decir, a la entrada del sistema se tiene una alimentación de CD y a la salida tenemos como resultado CA. El voltaje resultante tiene forma de onda periódica con la característica que está formada por tramos rectangulares o también llamados forma de escalón, los cuales se forman según la amplitud de voltaje proveniente de una fuente de CD. Los inversores los podemos encontrar para tipo monofásico o trifásico, esto depende

directamente a las fases del motor. Los inversores son utilizados en la regulación de velocidad de motores CA (síncronos o asíncronos), en sistemas de alimentación ininterrumpida, entre otros. Como se mencionó anteriormente el inversor puede ser monofásico o trifásico, pero en esta ocasión solo explicaremos en que consiste un inversor trifásico.

El **inversor trifásico** tiene las terminales A, B y C que se alternan para conectarse a la fuente de alimentación de CD, esto lo realizan mediante los interruptores estáticos S1, S2, S3, S4, S5 y S6, como se muestra en la Figura 6. Con esto se consigue un voltaje trifásico a partir de una fuente de voltaje de CD siempre y cuando la conmutación de los interruptores se encuentre desfasados  $120^\circ$  entre sí y se cumpla un orden cíclico de conducción.

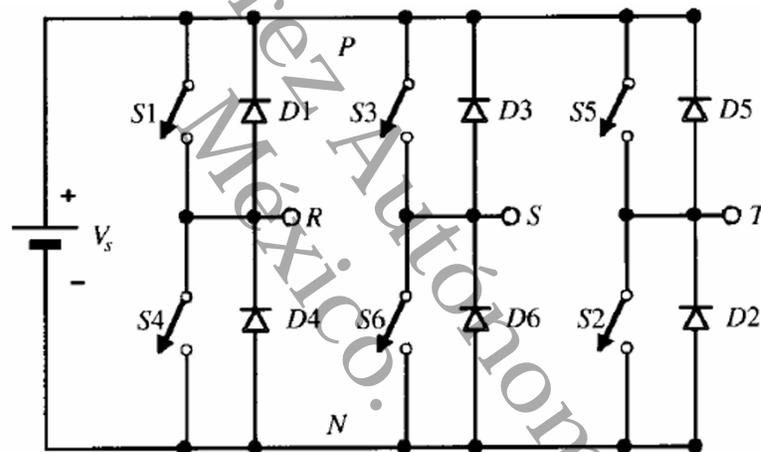


Figura 6. Inversor trifásico.

Tomando como neutro el voltaje negativo de la fuente de alimentación de CD y, si se considera una conmutación instantánea, se obtendrán las señales mostradas en la Figura 7 donde el inciso a) se muestra la señal de  $V_{an}$ , b)  $V_{bn}$  y, por último, c) muestra la señal de  $V_{cn}$ . El inciso d) se muestra el orden de conmutación de cada interruptor para formar la señal trifásica.

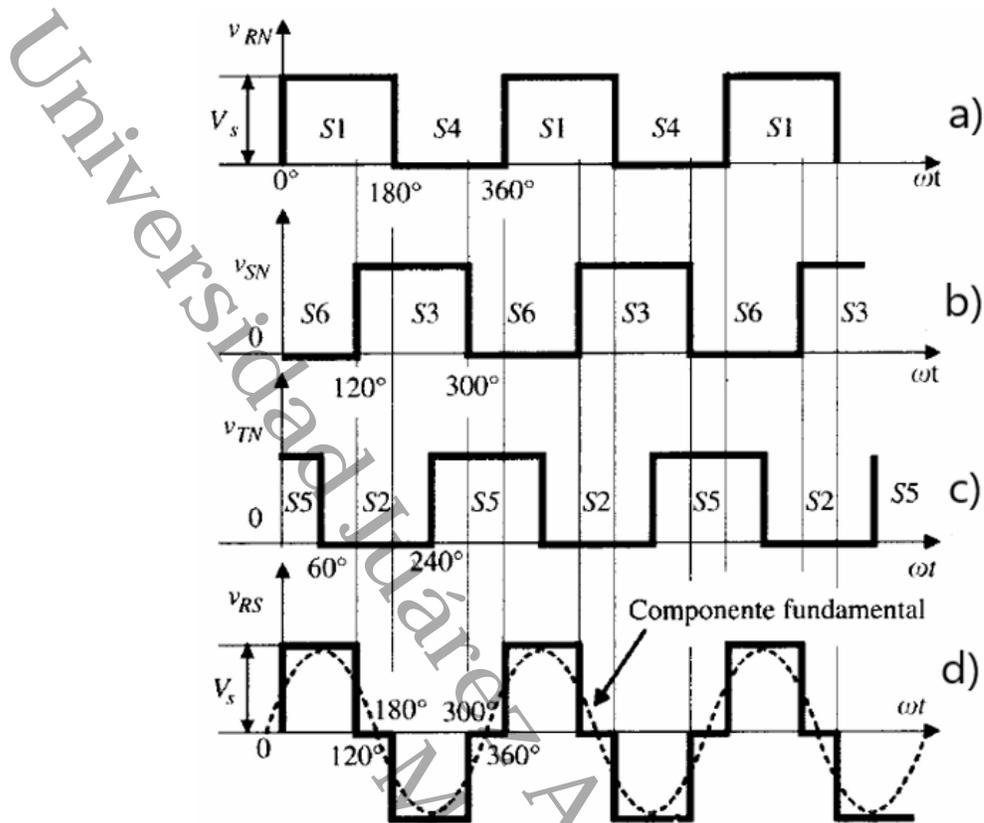


Figura 7. Formas de onda de las señales a la salida del inversor trifásico.

Estas señales tienen una amplitud máxima de voltaje que es igual a  $V_s$ , de esta relación podemos encontrar las siguientes ecuaciones:

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (1)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \quad (2)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \quad (3)$$

#### 1.2.2.4. Inversor trifásico

El inversor trifásico sirve para alimentar un motor BLDC trifásico, es importante aclarar que la técnica de conmutación de seis pasos no se considera una técnica de modulación por ancho de pulso (PWM), esto se debe a que la magnitud de la señal de voltaje en todo momento se mantiene constante. Sin embargo, la frecuencia de la señal puede modificarse al emplear distintos intervalos de conmutación de los semiconductores, los

cuales se muestran en la Figura 8, como interruptores ideales y se emplearan resistencias para facilitar el análisis del circuito. (Mitzi Mendoza, 2020).

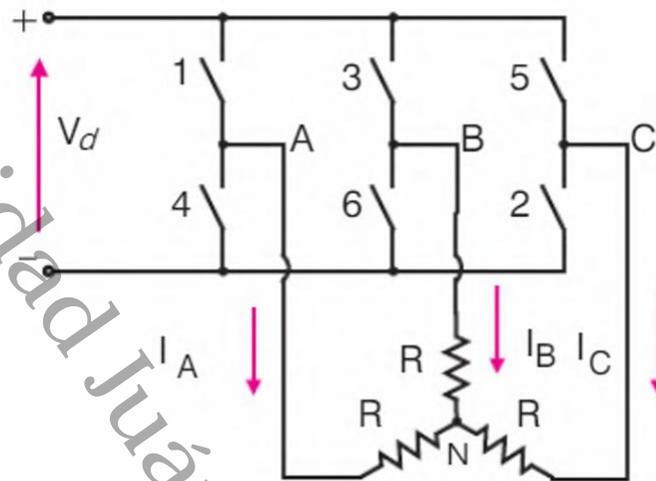


Figura 8. Inversor trifásico para la conmutación de 6 pasos.

Se debe de seguir una secuencia en la conmutación de los interruptores para poder generar la señal trifásica para cada fase, para lograr esto se deben conmutar dos interruptores a la vez, pero en ningún momento pueden estar activos interruptores de una misma rama. Por ejemplo, los interruptores 1 y 4 mostrados en la Figura anterior, en ningún momento pueden cerrarse simultáneamente, ya que esto ocasionaría un corto circuito. A continuación, se muestran las posibles combinaciones funcionales:

Caso 1. Intervalo de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  con los interruptores 1, 5 y 6 cerrados. Siguiendo el diagrama de la Figura 8, el interruptor 5 corresponde a la fase C, pero esta se encuentra apagada por lo que no existe conducción de voltaje por esta rama. Para este caso, se obtiene el circuito equivalente de la Figura 9:

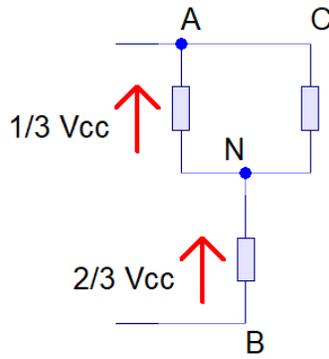


Figura 9. Caso 1 implementando el método de 6 pasos.

Siguiendo el análisis del circuito podemos obtener los voltajes de cada fase para este caso los cuales están dados por:

$$V_{AN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (4)$$

$$V_{BN} = -\frac{2}{3}V_{CC} \quad (5)$$

$$V_{CN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (6)$$

Caso 2. Intervalo de  $60^\circ$  a  $120^\circ$  con los interruptores 1, 2 y 6 cerrados. De igual modo la fase C se encuentra apagada por lo que no se conduce voltaje por esa fase, aunque el interruptor 2 está abierto. El circuito equivalente correspondiente se muestra en Figura 10:

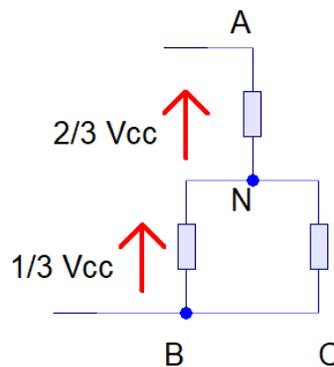


Figura 10. Caso 2 implementando el método de 6 pasos.

Para este caso los voltajes de fase siguiendo el análisis del circuito equivalente están dados por:

$$V_{AN} = \frac{2}{3}V_{CC} \quad (7)$$

$$V_{BN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (8)$$

$$V_{CN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (9)$$

Caso 3. Intervalo de  $120^\circ$  a  $180^\circ$  con los interruptores 1, 2 y 3 cerrados. Para este caso, el interruptor 1 se encuentra abierto pero la fase A se encuentra apagada, por lo que, no se conduce voltaje por esa fase. En la Figura 11, se muestra el circuito equivalente para este caso:

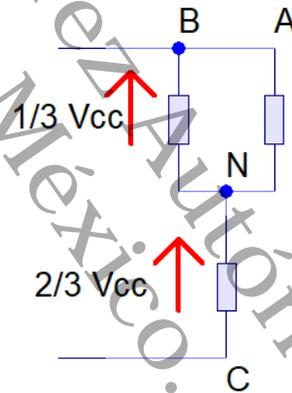


Figura 11. Caso 3 implementando el método de 6 pasos.

Los voltajes de fase resultantes para este caso están dados por:

$$V_{AN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (10)$$

$$V_{BN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (11)$$

$$V_{CN} = -\frac{2}{3}V_{CC} \quad (12)$$

Caso 4. Intervalo de 180° a 240° con los interruptores 2, 3 y 4 cerrados. El interruptor 4 se encuentra abierto correspondiente a la fase A, pero esta se encuentra apagada, por lo que, no existe conducción de voltaje. El circuito equivalente resultante para este caso se muestra en la Figura 12 :

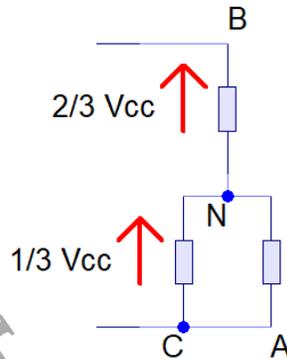


Figura 12. Caso 4 implementando el método de 6 pasos.

Los voltajes para cada fase están dados por:

$$V_{AN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (13)$$

$$V_{BN} = \frac{2}{3}V_{CC} \quad (14)$$

$$V_{CN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (15)$$

Caso 5. Intervalo de 240° a 300° con los interruptores 3, 4 y 5 cerrados. En este caso la fase B se encuentra apagada, por lo que, no se conduce voltaje por esa fase a pesar de que el interruptor 3 se encuentra abierto. Para este caso tenemos el circuito equivalente mostrado en la Figura 13 :

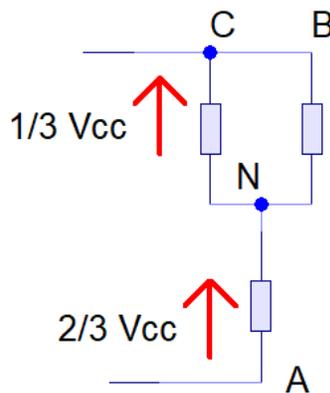


Figura 13. Caso 5 implementando el método de 6 pasos.

Los voltajes de caso están dados por:

fase para este

$$V_{AN} = -\frac{2}{3}V_{CC} \quad (16)$$

$$V_{BN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (17)$$

$$V_{CN} = \frac{1}{3}V_{CC} \quad (18)$$

Caso 6. Intervalo de  $300^\circ$  a  $360^\circ$  con los interruptores 4, 5 y 6 cerrados. Aunque el interruptor 6 se encuentra abierto la fase B se encuentra apagada, por lo que, no conduce voltaje por esa fase. Para este caso se tiene el siguiente circuito equivalente de la Figura 14:

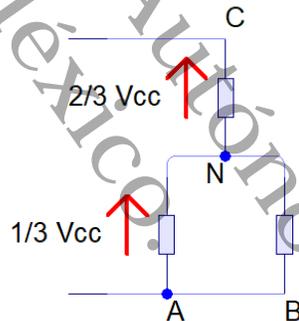


Figura 14. Caso 6 implementando el método de 6 pasos.

Los voltajes de fase están dados por las ecuaciones siguientes:

$$V_{AN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (19)$$

$$V_{BN} = -\frac{1}{3}V_{CC} \quad (20)$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3}V_{CC} \quad (21)$$

Tomando la suma de los 6 casos anteriores para el voltaje de fase Van obtenemos como resultado la señal de la Figura 15, en donde la señal está formada por 6 pasos donde cada paso tiene 60° eléctricos hasta formar un ciclo completo es decir hasta llegar a 360°.

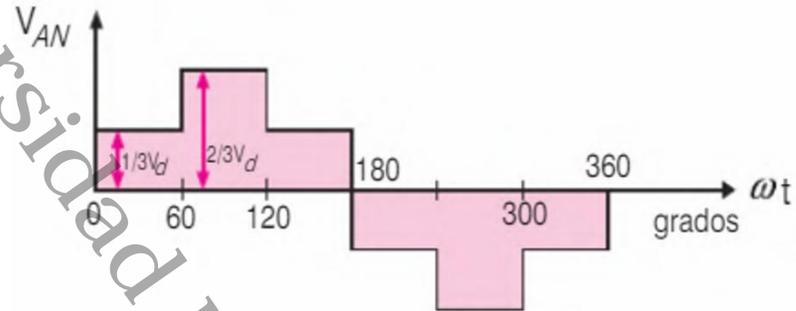


Figura 15. Señal de voltaje de la fase resultante por el método de 6 pasos.

Los transistores durante los intervalos de conmutación pueden definir la forma de onda de la corriente para cada fase como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Forma de onda de la corriente debido a los transistores.

#### 1.2.2.5. Motor Brushless

Los motores eléctricos se pueden clasificar según su funcionamiento o características que lo componen en esta ocasión, los clasificaremos según la forma de corriente con la cual se alimentan a partir de ahí podemos clasificar los diferentes tipos de motores como se muestran a continuación en la Figura 17.

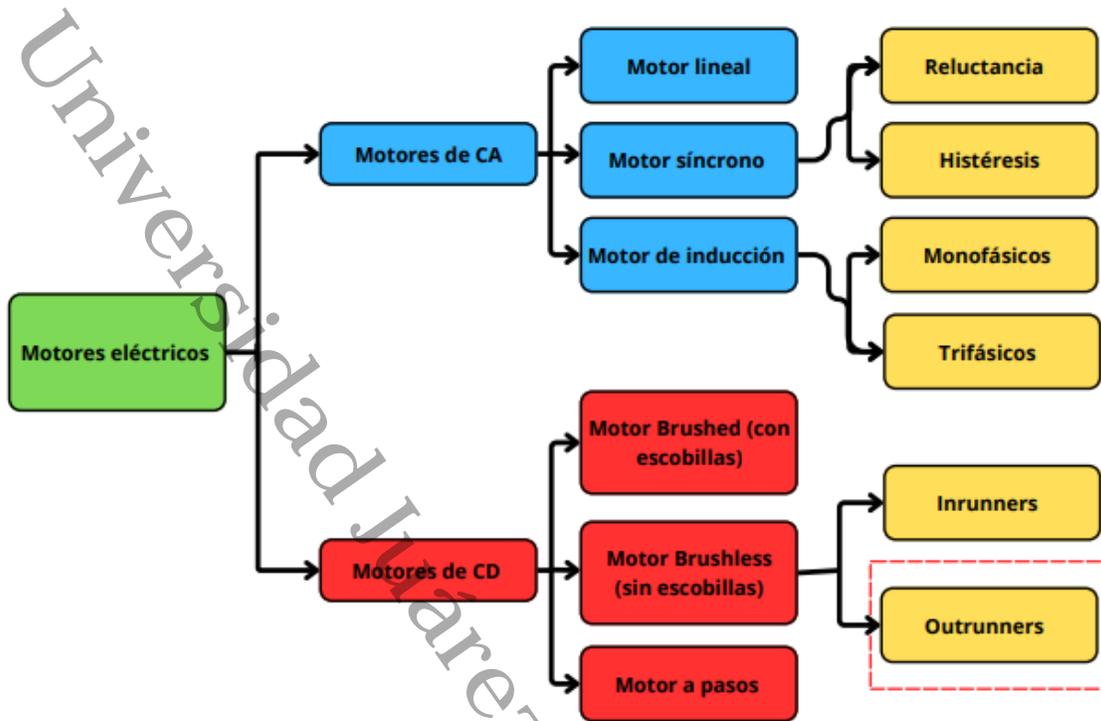


Figura 17. Clasificación de los motores eléctricos.

Un motor BLDC (Brushless Direct Current Motor) es un motor cuya rotación es impulsada por las fuerzas de atracción y repulsión entre imanes permanentes y electroimanes. El motor de CD sin escobillas es esencialmente un motor síncrono de imán permanente, esto quiere decir que el campo magnético generado por el estator, y el campo magnético generado por el rotor tienen la misma frecuencia. Excepto que en este tipo de motores no se presenta el deslizamiento como en los motores de inducción. (Sierra, s. f.), (Tacuri & Eduardo, s. f.)

Como se muestra en la Figura 17 podemos encontrar dos tipos de motores Brushless, los cuales son los inrunners y los outrunners. Los motores BLDC inrunners son más pequeños y pueden entregar altas velocidades, por lo general, superiores a 11000 rpm. Sin embargo, estos motores como pueden generar altas velocidades carecen de torque, por lo que, se necesita instalarles engranajes reductores de velocidad para que el torque aumente. En esta clase de motores la parte móvil es el eje, sobre el cual se encuentran los imanes permanentes. En cambio, los motores outrunners entregan un torque máximo a bajas velocidades lo que lo hace más versátil en aplicaciones donde se necesita un

alto torque estos no necesitan engranajes, por lo tanto, pueden ser conectados directamente a una hélice. Para el caso de estos motores los imanes permanentes están instalados en el rotor, mientras las bobinas se encuentran fijas en el estator. Para alimentar los bobinados del motor según la posición del rotor y lograr una secuencia de giro se necesita transformar la corriente continua a alterna esto se logra con un circuito inversor. Para ello es necesario conocer la posición del rotor continuamente, para lograrlo se implementan dos técnicas dependiendo de si se utilizan o no sensores en el motor, dicho esto se puede dividir en dos familias o grupos: con sensores (sensored) y sin sensores (sensorless). Los motores BLDC que cuentan con sensores (sensored) indican la posición del rotor, por lo general estos sensores son de efecto hall, encoders o resolvers. Para el caso de los sensores de efecto hall, usualmente se encuentran separados  $120^\circ$  uno del otro. Por el contrario, para los motores "sensorless" no cuentan con sensores, y determinan la posición del rotor midiendo la fuerza contra electromotriz en las bobinas.

Los motores Brushless son similares a los motores de CA en su construcción, están compuestos por un estator que tiene imanes permanentes y un rotor que cuenta con embobinados como se muestra en la Figura 18. Lo que los diferencia es la forma en que detectan la posición del rotor, esto se realiza para conocer cómo se encuentran los polos magnéticos, y por medio de switches electrónicos generar la señal de control.

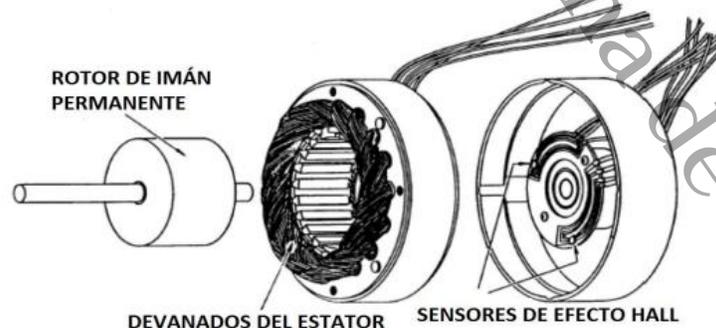


Figura 18. Estructura interna de un motor BLDC, (Tacuri & Eduardo, s. f.).

Los motores Brushless se pueden encontrar con configuraciones de 2 o 3 fases, este número de fases está relacionado con el número de devanados, es decir, el número de fases será el número de devanados en el motor. Los motores BLDC trifásicos son los

más utilizados debido a las características y funcionalidad que pueden tener y del cual este trabajo va relacionado por lo que se explicara las partes que lo componen y su principio de funcionamiento.

#### 1.2.2.6. Estator

Para un motor BLDC el estator consta de pequeñas láminas de acero, las cuales se encuentran apiladas con devanados colocados en las ranuras que están cortadas axialmente a lo largo de la periferia interna como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Estator de un motor Brushless, (Tacuri & Eduardo, s. f.)

El estator en los motores BLDC se fabrica de manera semejante a los motores de inducción con la característica que los embobinados son distribuidos de diferente manera. Otro punto importante es que la mayoría de los motores BLDC cuentan con tres devanados en el estator, se encuentran conectados en estrella, los cuales se localizan sobre la periferia del estator, con esto se tendrá un número determinado de pares de polos. Además, existen dos tipos de configuraciones para el estator dependiendo la conexión de las bobinas, las cuales son el trapezoidal y sinusoidal. La característica principal de estas configuraciones se encuentra en el modo de conexión de los devanados en el estator, así mismo la forma de conexión de los devanados determina la forma en que se genera la fuerza contra electromotriz (FCEM).

La fuerza contra electromotriz (FCEM) se genera como se muestra en la Figura 20, esta configuración es la más económica en su fabricación, la desventaja de esta forma de

generación de FCEM es una forma de escalón lo que provoca un par de torsión violento en la salida.

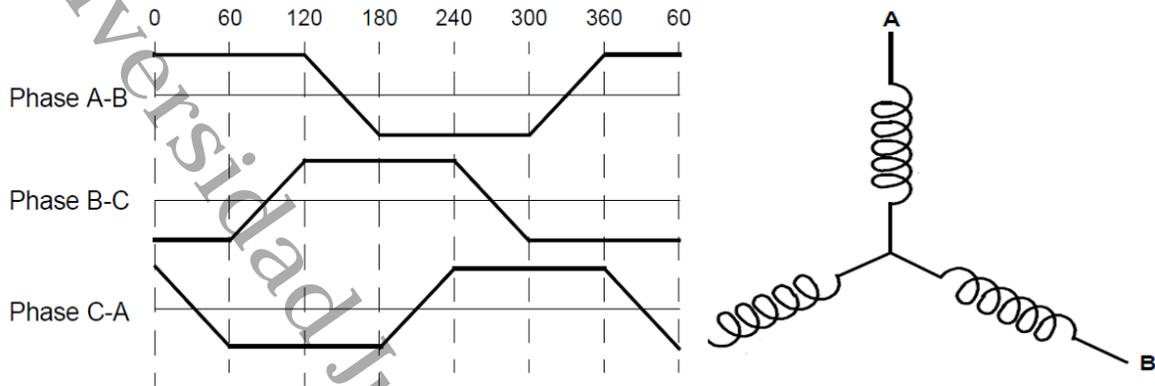


Figura 20. Generación de la FCEM trapezoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.)

Por el contrario, la generación de FCEM sinusoidal mostrada en la Figura 21 es más costosa debido a que se requiere una conexión adicional por la forma de la distribución de las bobinas en la periferia del estator, lo que conlleva al aumento de cobre en los devanados del estator. La ventaja de esta configuración es que en la salida se obtiene un par de torsión suave comparado a la trapezoidal.

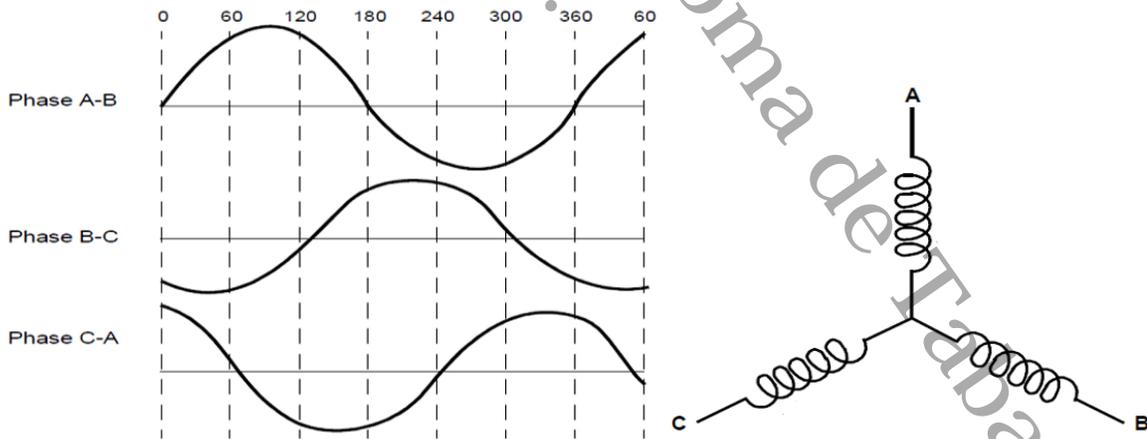


Figura 21. Generación de la FCEM sinusoidal, (Tacuri & Eduardo, s. f.)

### 1.2.2.7. Rotor

En los motores BLDC el rotor está construido de imanes permanentes, el cual puede contar con 2 hasta ocho pares de polos, los cuales alternan entre el polo Norte y el polo Sur. Para seleccionar el material con que se fabricara el imán se debe tomar en cuenta la densidad de campo magnético requerido en el rotor. Por lo general, el material más utilizado es el imán de ferrita. Este material es muy empleado debido a su bajo coste, pero tiene la desventaja de tener baja densidad de flujo para un determinado volumen. Por el contrario, la aleación del material cuenta con una alta densidad magnética por volumen, lo que permite comprimir el rotor y el torque no se verá afectado. Se puede hacer mención de otros materiales utilizados en la construcción de rotores los cuales son Neodimio (Nd), Samario Cobalto (SmCo), así como las aleaciones de Neodimio, Ferrita y Boro (NdFeB). Además, que se sigue buscando nuevas alternativas las cuales permitan aprovechar al máximo la densidad de flujo y se mantenga una alta densidad magnética. Así mismo se pueden encontrar diferentes arreglos de los imanes permanentes en el rotor, como se puede observar en la Figura 22. En esta se muestra varias secciones las cuales a) es un rotor con un núcleo circular que cuenta con imanes en la periferia. En b) se muestra un núcleo circular con imanes rectangulares embebidos en el motor. Por último, en c) es un núcleo circular con imanes rectangulares insertados en el mismo rotor.

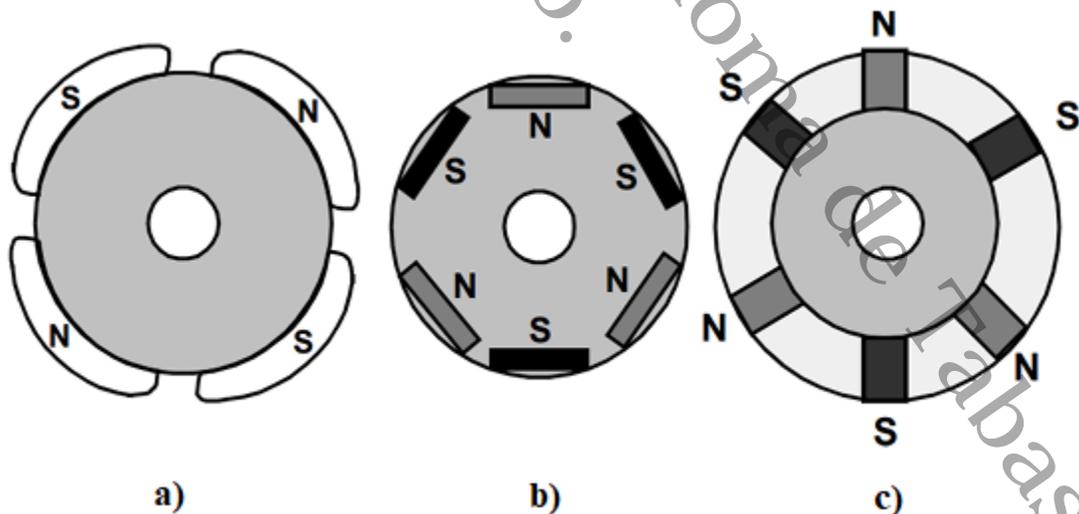


Figura 22. Sección transversal de diferentes rotores, (Sierra, s. f.).

Puesto que los motores Brushless no tienen escobillas para energizar los devanados del motor, y la conmutación se realiza electrónicamente, es muy importante conocer continuamente la posición del rotor esto para poder energizar los devanados del motor, para determinar una secuencia de movimiento la cual se explicará con más detalle posteriormente. (Sierra, s. f.).

#### 1.2.2.8. Principio de funcionamiento del motor Brushless

La estructura interna de un motor BLDC se puede observar en la Figura 23, está formado por un estator con 12 bobinas donde su función es actuar como electroimanes cuando este el motor en funcionamiento, al igual que el rotor cuenta con 12 imanes permanentes; la secuencia de polaridad de los imanes permanentes se da por tercias, es decir, están colocados continuamente donde se cambia la polaridad cada tres imanes. La distribución y colocación de los imanes se realiza de esta manera con la finalidad de que los electroimanes se polaricen correctamente además que se pueda predecir la dirección de giro del rotor del motor trifásico BLDC. (López Arias, Castañeda González, 2023), (Seminario Gastelo, 2021), (Mitzi Mendoza, 2020).

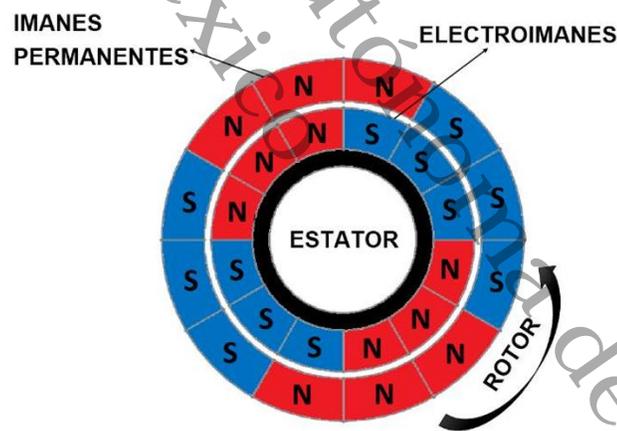


Figura 23. Estructura interna del motor BLDC, (López Arias, Castañeda González, 2023)

En la Tabla 3, se muestra la secuencia de polarización de los electroimanes para el giro del rotor a la derecha o izquierda, en donde EM1 hasta EM12 son los electroimanes, por otro lado, S y N indican la polaridad que tomara en cada instante.

Tabla 3. Polarización de los electroimanes para el control de dirección de giro.

Estado del motor	Polarización de los electroimanes											
	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6	EM7	EM8	EM9	EM10	EM11	EM12
En reposo	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N
Giro a la derecha	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N
Giro a la derecha	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N
Giro a la derecha	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S
Giro a la derecha	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S
Giro a la derecha	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S
Giro a la derecha	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N
En reposo	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N
Giro a la izquierda	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S
Giro a la izquierda	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S
Giro a la izquierda	N	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S
Giro a la izquierda	N	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N
Giro a la izquierda	N	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N
Giro a la izquierda	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N

### 1.3. Justificación

Debido a su alta densidad de potencia, confiabilidad, eficiencia, naturaleza libre de mantenimiento y funcionamiento silencioso, los motores de imanes permanentes se han utilizado ampliamente en una variedad de aplicaciones. Se dará a conocer una técnica de caracterización por medio del control basado en conmutación trapezoidal (seis pasos) con la cual se encontrarán las características que componen al motor BLDC tales como velocidad y frecuencia optima. Esta caracterización consiste en encontrar una frecuencia en función de un rango de voltaje con el fin que esta frecuencia se encuentre en una zona lineal en la cual esta frecuencia se traduce en una alta eficiencia de trabajo del

motor BLDC. Es decir, con esta frecuencia se obtendrá un rango de trabajo establecido donde se trabaje en diferentes voltajes, lo que conlleva que el motor proporcionará diferentes niveles de velocidad y torque. Por lo tanto, se pueden adaptar a la necesidad a satisfacer teniendo la certeza que el motor BLDC trabajara de manera eficiente.

La desventaja principal de este tipo de motores es el desempeño de trabajo cuando el motor funciona con y sin carga a bajas velocidades, es decir, causando vibraciones mecánicas y la reducción de la vida útil, y daños en la tarjeta de potencia. Por esta razón, se debe conocer las características de funcionamiento óptimo de este tipo de motores. Con todo lo anterior, la caracterización propuesta es el primer paso para que se integre a posteriores trabajos en la mejora y adaptación de algoritmos de control garantizando un alto rendimiento del motor BLDC, esto reduciría el alto coste de hardware, es decir, podría reducirse el consumo de potencia y la generación de calor lo que prolongando la vida útil del motor.

#### **1.4. Pregunta de investigación**

La frecuencia de funcionamiento en los motores Brushless está altamente relacionada con el desempeño del motor ya que se ve reflejada en el comportamiento dinámico del mismo. Una mala frecuencia de funcionamiento puede ocasionar en el motor calentamiento, vibraciones, resonancia etc. De modo que se plantea la siguiente pregunta:

¿La frecuencia óptima de funcionamiento es la misma para todos los motores Brushless y cómo influye esta frecuencia en el desempeño en este tipo de motores?

#### **1.5. Planteamiento del problema**

Los motores eléctricos forman parte de la vida cotidiana, ya que se encuentran en sectores como la industria en donde forman parte fundamental de los procesos industriales. Existe gran variedad de motores eléctricos, los cuales tienen un principio de

funcionamiento, sin embargo, los motores con escobillas son los más utilizados. Por otra parte, estos motores con el tiempo van presentando, calentamiento, ruido, desgaste lo que afecta directamente su rendimiento y lo que conlleva a un mantenimiento continuo.

Por las razones mencionadas, el motor Brushless está ganando camino, ya que, por sus características físicas y técnicas, lo hacen un motor altamente eficiente al no tener escobillas y presenta mínima fricción, calentamiento o ruido; por lo que, el mantenimiento es mínimo. Los motores BLDC realizan la conmutación electrónicamente lo que hace que su costo de venta sea alto. Existen distintos tipos de control para el motor Brushless en donde cada control tiene una base de funcionamiento. Es importante resaltar que todos los motores no son iguales, es decir, aunque sean el mismo modelo o características de fabricación, su comportamiento dinámico será distinto debido a la frecuencia de trabajo. En este contexto, se propone la importancia de realizar una caracterización al motor BLDC para conocer las características y parámetros de funcionamiento con las cuales se garantice un funcionamiento óptimo, donde se busque una frecuencia ideal y aproveche al máximo la capacidad que el motor puede proporcionar sin importar la técnica de control implementado por conmutación. Es posible lograr un funcionamiento óptimo o lograr obtener un funcionamiento cercano donde el motor trabaje sin presentar calentamiento, vibraciones, resonancia, etc. Los cuales puedan ir dañando el motor y, por consecuencia disminuir la vida útil del mismo.

## **1.6. Hipótesis**

El comportamiento dinámico de los motores sin escobillas BLDC influiría al momento de aplicar una técnica de conmutación en el circuito electrónico de potencia al motor. Debido a que los motores BLDC son controlados electrónicamente y, al conocer las características de funcionamiento, se garantizaría que el motor trabaje de manera eficiente. Con la frecuencia optima encontrada se esperaría que el motor BLDC trabaje a su máxima capacidad, en otras palabras, entregue una buena relación velocidad-torque; así mismo efficientiza la aplicación de la técnica por conmutación trapezoidal mediante la implementación en Hardware.

## 1.7. Objetivo general

Implementar una técnica de caracterización experimental donde se determine una frecuencia óptima en un motor BLDC trifásico utilizando una plataforma FPGA para la puesta en marcha de un control basado en conmutación trapezoidal y validar el funcionamiento de este.

### 1.7.1. Objetivos específicos

- Calcular los parámetros del circuito de potencia de conmutación electrónica para un motor Brushless DC, simular e implementar el circuito eléctrico en PROTEUS.
- Desarrollar el circuito de potencia de conmutación electrónica para la puesta en marcha del motor BLDC.
- Determinar la frecuencia óptima de funcionamiento implementando una técnica de caracterización experimental donde se encuentre una frecuencia óptima en un motor BLDC trifásico.
- Comparar los resultados experimentales de la técnica de caracterización respecto a la simulación. Validando la frecuencia óptima encontrada.

## Capítulo 2. Desarrollo del circuito de potencia para un motor BLDC

El diagrama de bloques de la Figura 24 muestra las diferentes etapas para la puesta en operación de un motor Brushless. Cada bloque tiene una tarea específica, por lo que, se debe cumplir un proceso, en otras palabras, se debe seguir una secuencia para llevar a cabo la caracterización. Cabe mencionar que esta propuesta de implementación de *software* y *hardware FPGA* es solo para validar la técnica de caracterización para encontrar la frecuencia óptima o zona lineal, sin embargo, la técnica puede llevarse a cabo con otras propuestas de uso de plataformas de software y hardware.

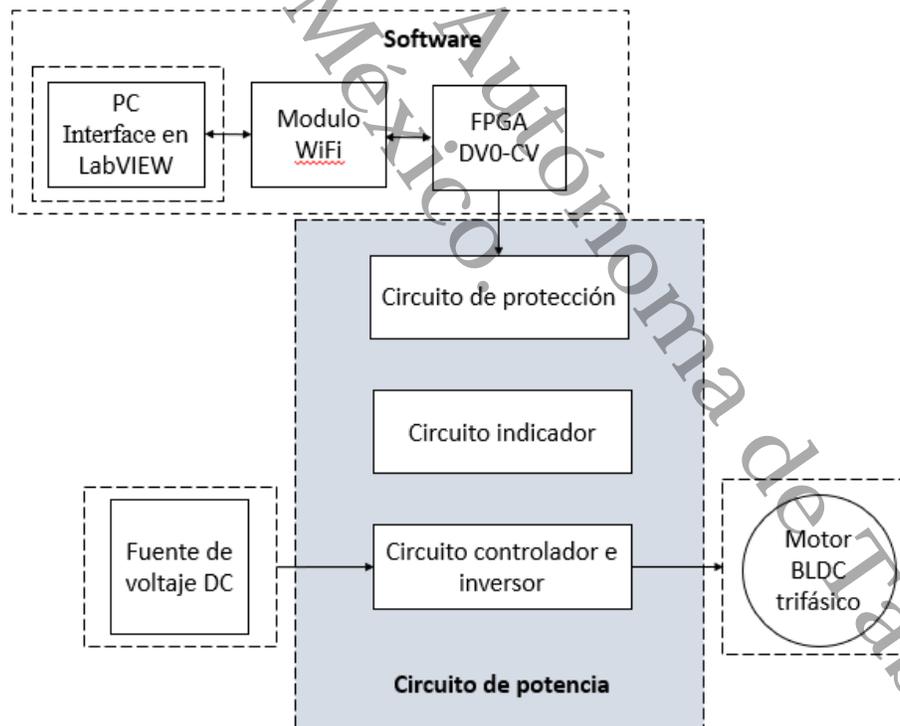


Figura 24. Diagrama de bloques para la puesta en operación.

En esta propuesta de implementación, se determina la frecuencia, sentido de giro en la interfaz de LabVIEW posteriormente se manda la información a la tarjeta FPGA la cual

la recibe por medio de un módulo WiFi. El FPGA recibe la información y se obtiene como salida los 6 posibles estados del control trapezoidal las cuales entran a la etapa de potencia. A la salida del circuito electrónico se tiene tres señales desfasadas  $120^\circ$  una respecto a otra con la amplitud de voltaje con la que se alimenta el circuito proveniente de la fuente de voltaje DC y por último estas señales se conectan directamente a cada una de las fases del motor. La etapa de potencia está constituida por el circuito electrónico de potencia a continuación se presenta como se desarrolló el análisis y construcción de este.

## 2.1. Cálculo y construcción del circuito electrónico de potencia.

Como se ha mencionado anteriormente la principal característica de los motores Brushless es que necesita un circuito electrónico para realizar la conmutación. Para este proyecto en particular se utilizó un circuito inversor el cual está constituido por transistores de potencia tipo PNP y NPN los cuales se emplean como interruptor, es decir que su modo de operación se basa en corte y saturación. Como el motor puede demandar una corriente máxima de hasta 10 A se hace uso de una conexión Darlington dado que proporciona un transistor con una ganancia de corriente muy grande la cual satisface la demanda del motor. En la Figura 25 se tiene el circuito electrónico encargado de realizar la conmutación. El circuito consta de 3 ramas donde cada rama corresponde a cada una de las fases del motor.

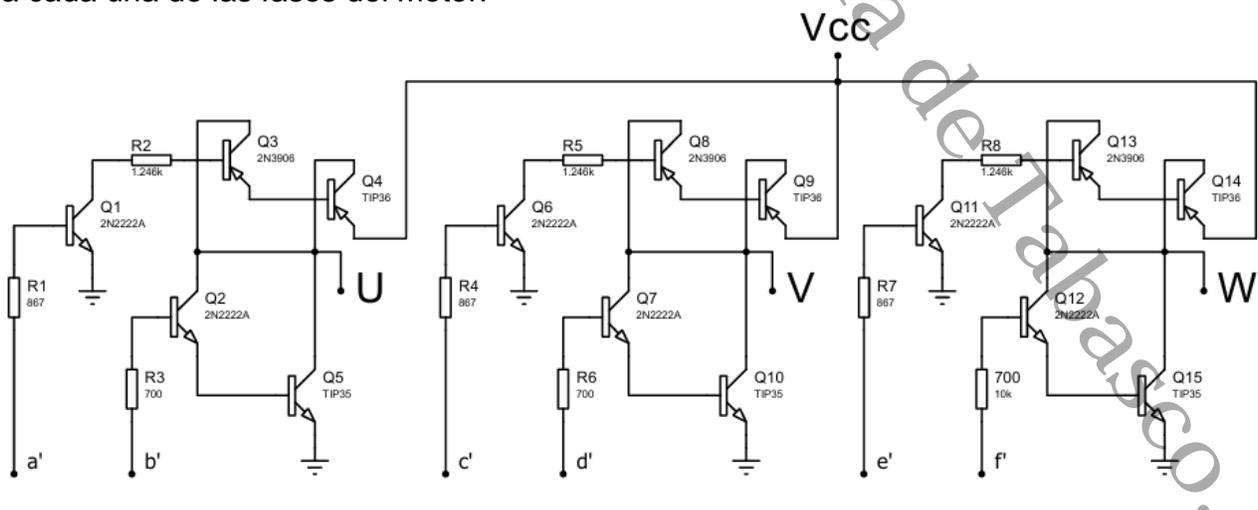


Figura 25. Circuito inversor trifásico del motor Brushless.

El análisis, cálculo y obtención de los valores de resistencia se realizó para la fase **U** mostrada en la Figura 26. Como el circuito electrónico está constituido por tres ramas completamente iguales el cálculo será el mismo para cada una de ellas. Los valores Beta de los transistores utilizados para los cálculos son tomados de la hoja de datos correspondiente. Cada rama está formada por:

- 2 transistores 2N2222A,
- 1 transistor 2N3906
- Transistores de potencia TIP 36C y TIP 35C

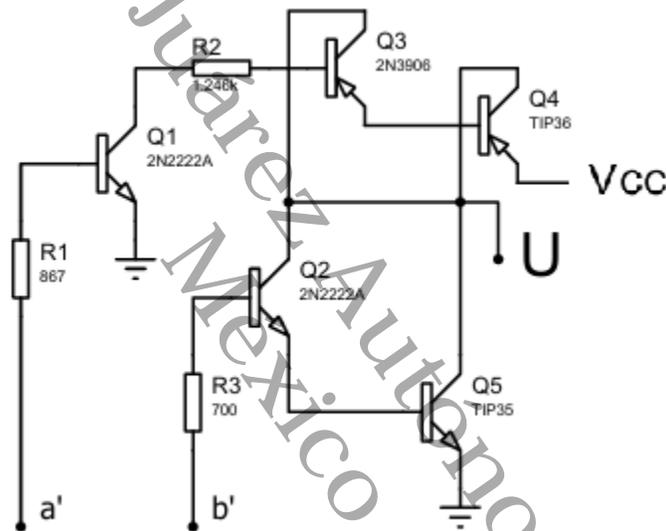


Figura 26. Rama fase U del circuito electrónico.

Como primera parte del análisis se realizan los cálculos para encontrar la corriente de saturación del colector y el valor de la R1. Se utilizo el transistor 2N2222A para la parte de baja potencia, considerando una  $B = 100$  por ende tenemos una Beta nominal de:

$$B_f = \frac{B}{10A} = \frac{100}{10} \quad (22)$$

$$B_f = 10$$

Sabemos que;

$$I_b = \frac{I_{csat}}{B_f} \quad (23)$$

De donde podemos despejar  $I_{csat}$  ;

$$\begin{aligned} I_{csat} &= (I_b)(B_f) \\ I_{csat} &= (3mA)(10) \\ I_{csat} &= 30mA \end{aligned} \quad (24)$$

Para el cálculo de  $R_1$  tenemos:

$$\begin{aligned} V_E &= (R_1)(I_b) + V_{BEQ1} \\ R_1 &= \frac{V_E - V_{BEQ1}}{I_b} \\ R_1 &= \frac{3.3V - 0.7V}{3mA} \\ R_1 &= 867\Omega \end{aligned} \quad (25)$$

Tenemos que;

$$I_{csat} = I_b = 30mA \quad (26)$$

Para la obtención de Beta nominal necesaria para la saturación de los transistores PNP tenemos que:

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{I_{csat}}{B_f} \rightarrow B_f = \frac{I_{csat}}{I_b} \\ B_f &= \frac{10A}{30mA} \\ B_f &= 333.333 \end{aligned} \quad (27)$$

Por lo que el valor de Beta sería:

$$\begin{aligned} B_f &= \frac{B_n}{10} \rightarrow B_n = (B_f)(10) \\ B_f &= (B_n)(10) \\ B_f &= (333.333)(10) \\ B_f &= 3,333.3 \end{aligned} \quad (28)$$

Como se requiere de un Beta de 3,333.33 se implementa una configuración Darlington esta conexión es muy popular de dos transistores de unión que opera como un transistor

“súper beta”. Para esta configuración se usa el transistor TIP 36C seguido de un transistor 2N3906. Para esta configuración se multiplican las Betas de los transistores en serie:

$$\begin{aligned}
 B_{n_T} &= (B_{n_1})(B_{n_2}) \\
 B_{n_T} &= (10)(30) \\
 B_{n_T} &= 300
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Para  $R_2$  tenemos que;

$$\begin{aligned}
 V_{cc} &= V_{BE_{Q3}} + V_{BE_{Q4}} + R_2(I_b) + V_{CE} \\
 V_{cc} &= 0.7v + 0.7v + R_2(I_b) + V_{CE} \\
 R_2 &= \frac{V_{cc} - V_{BE_{Q3}} - V_{BE_{Q4}} - V_{CE}}{I_b} \\
 R_2 &= \frac{40 - 0.7 - 0.7 - 1.2}{30mA} \\
 R_2 &= 1,246.6\Omega
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Para el análisis de los transistores NPN. Para esta parte del circuito se considera una señal de activación de  $V_E = 3.3 V$  a una corriente máxima de 3 mA proveniente de la conexión al FPGA, por lo que el análisis para la obtención del valor de  $R_3$  es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 V_E &= (R_3)(I_b) + V_{BE_{Q5}} + V_{BE_{Q2}} \\
 R_3 &= \frac{V_E - V_{BE_{Q5}} - V_{BE_{Q2}}}{I_b}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Con la relación siguiente tenemos que;

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{I_{csat}}{B_f} \rightarrow B_f = \frac{I_{csat}}{I_b} \\
 B_f &= \frac{10}{3mA} \\
 B_f &= 333.3
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Ahora,

$$B_f = \frac{B_n}{10} \rightarrow B_n = (B_n)(10)$$

$$B_n = (3,333)(10) \quad (33)$$

$$B_n = 3,333$$

Para este caso se requiere una Beta de 333.33 de igual forma se implementa una configuración Darlington. Para esta configuración se usa el transistor TIP 35C seguido de un transistor 2N3906. Para esta configuración se multiplican las Betas de los transistores en serie:

$$B_{n_T} = (B_{n_1})(B_{n_2})$$

$$B_f = (10)(100) \quad (34)$$

$$B_f = 1000$$

$R_3$  está dada por;

$$R_3 = \frac{V_E - V_{CE}}{3mA}$$

$$R_3 = \frac{3.3V - 1.2V}{3mA} \quad (35)$$

$$R_3 = 700\Omega$$

Los valores de resistencias encontrados no son valores comerciales por lo que se toma el valor mas cercano:

$$R_1 = 867\Omega \Rightarrow 820\Omega$$

$$R_2 = 1246.6\Omega \Rightarrow 1.2\Omega$$

$$R_3 = 700\Omega \Rightarrow 680\Omega$$

En resumen, los valores de Resistencias encontrados son:

- $R_1 = 867 \Omega$
- $R_2 = 1246.6 \Omega$
- $R_3 = 700 \Omega$

Como se mencionó anteriormente configuración y los valores de resistencias encontradas serán los mismo para cada una de las ramas.

### 2.1.1. Circuito de protección para el circuito controlador.

El comportamiento de las bobinas del motor puede afectar el tiempo de conmutación de los transistores esto ocasiona que por un corto periodo queden activos los dos transistores que suministran la energía a una de las fases del motor lo que ocasiona un corto circuito por un instante de tiempo, (Xia, 2012), (Mitzi Mendoza, 2020).

Por lo que es necesario contar con un circuito protección que evite la activación de dos switches de una misma rama al mismo tiempo en cada una de las fases del motor y evitar estos cortos circuitos respectivamente.

El circuito de protección emplea compuertas lógicas para este caso se emplean las compuertas AND y XOR. La configuración correspondiente se muestra en la Figura 27.

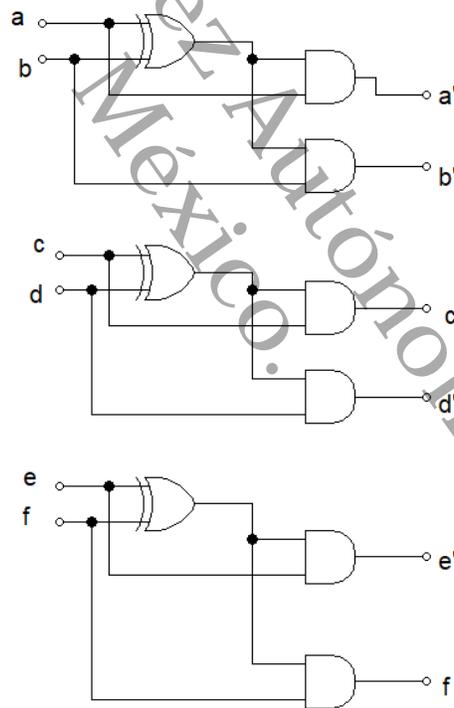


Figura 27. Circuito de protección del inversor trifásico.

Las tablas de verdad mostradas a continuación indican la secuencia de activación de cada switch para cada fase del motor BLDC.

Tabla 4. Tablas de verdad del circuito de protección para cada una de las fases del motor.

Fase U				Fase V				Fase W			
a	b	a'	b'	c	d	c'	d'	e	f	e'	f'
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0

Empleando este circuito de protección se garantiza que en caso de que se activen dos interruptores al mismo tiempo en una de las fases del motor a la salida se obtenga un estado bajo. Por ejemplo, siguiendo la tabla de verdad de la fase U tenemos que si a y b activos al mismo tiempo, las salidas del circuito de protección a' y b' se encuentran en estado bajo por lo que se cumple la función de proteger el circuito manejador del motor BLDC trifásico.

### 2.1.2. Circuito indicador.

Para garantizar que las señales se estén enviando de manera correcta primero pasa por un circuito indicador que se muestra en la Figura 28 que consta de leds y resistencias de  $330\Omega$  el cual su única función es servir de referencia de recepción de las señales que salen del FPGA y posteriormente entrar al circuito inversor.

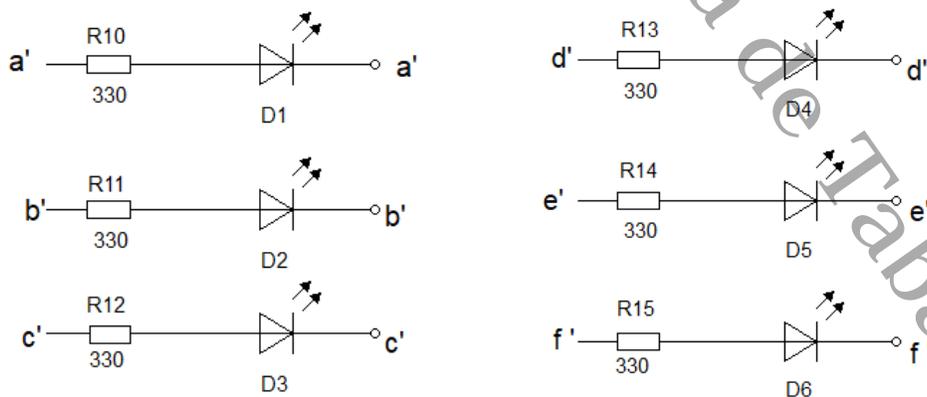


Figura 28. Circuito indicador.

Con base en los análisis y cálculos realizados, se puede proceder con la construcción del circuito electrónico de potencia necesario para la puesta en funcionamiento del motor.

## 2.2. Montaje del motor BLDC trifásico.

El motor Brushless trifásico DC utilizado como objeto de estudio en este trabajo fue el modelo DON800, de la marca NEWMOTECH CO. El motor BLDC está compuesto por un estator con 36 electroimanes y por un rotor el cual es una carcasa de acero donde están fijados 12 imanes permanentes de carbón. En la Figura 29 tenemos el motor BLDC utilizado donde a) muestra la parte fija del motor (estator) y b) la parte móvil (rotor).

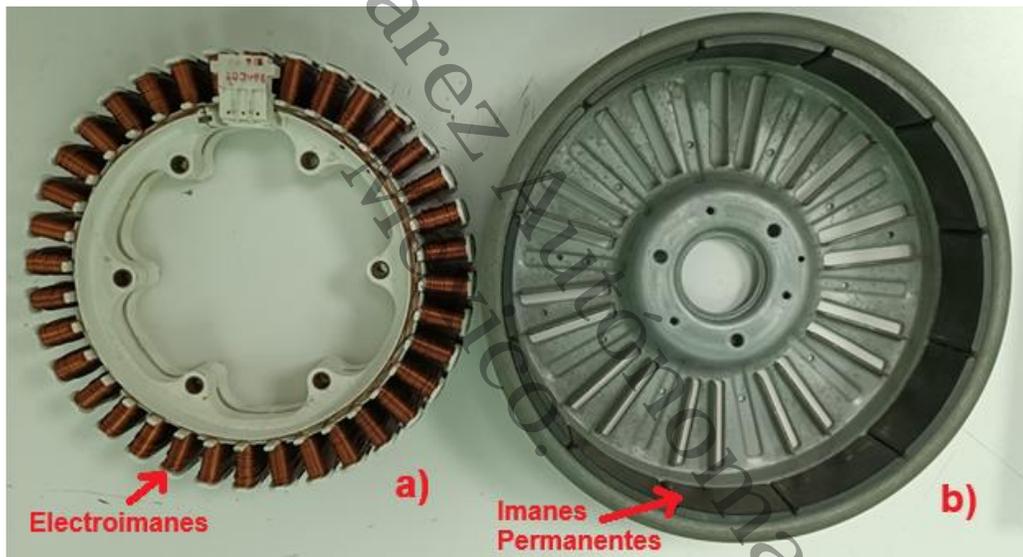


Figura 29. Motor BLDC trifásico utilizado. a) Estator, b) Rotor.

En la Tabla 5 se tiene describen las características del rotor y el estator que componen al motor BLDC utilizado. El motor cuenta con 12 imanes permanentes que forman parte del rotor y 36 boninas en su estator cuya función es actuar como electroimanes al estar en funcionamiento.

Tabla 5. Características físicas del motor BLDC trifásico.

Rotor	Estator
Diámetro: 30 cm	Diámetro: 26.5 cm

Altura: 6.5 cm	Altura: 6.5 cm
12 imanes permanentes	36 electroimanes
Peso: 2.3 Kg	Peso: 3.2 kg

El motor BLDC trifásico está montado a una base, como se muestra en la Figura 30, donde su principal propósito es asegurar un alineamiento preciso entre el estator y el rotor. Al estar alineados permite que el rotor gire libremente sin contacto físico alguno con el estator, evitando así cualquier tipo de interferencia o fricción que pueda perturbar su movimiento.



Figura 30. Montaje del motor BLDC a la base.

En la Figura anterior se muestra la base donde se fija el motor Brushless esta consta de una base de aluminio, 3 perfiles de aluminio (dos se encuentran fijos de manera vertical y el perfil faltante está colocado de manera horizontal uniendo así los 3 perfiles de aluminio), cuenta con 6 placas de aluminio colocadas de manera vertical (de las cuales 2 se encuentran fijas al perfil que está colocado de manera horizontal) y 2 chumaceras de 3/4". Sobre la placa frontal se coloca el estator con 4 tornillos que lo fijaran a esta, por otro lado, el rotor será colocado con un eje el cual se colocara dentro de las dos chumaceras que le permitirán tener movimiento continuo.

La placa de aluminio se encarga de dar soporte al estator por otro lado el estator esta fijo a la placa por medio de cuatro ejes como en la Figura 31 . Estas partes en conjunto fijan

el rotor del motor. Por otro lado, el acoplamiento del estator donde el rotor se encuentra fijo a un eje de aluminio el cual es insertado a las dos chumaceras que forman parte de la base del motor.



Figura 31. Placa de soporte y eje del motor.

Cuatro resortes tienen la función de mantener el estator fijo a la placa de aluminio como se muestra en la Figura 32. Con los cuatro tornillos mostrados en la Figura anterior de la placa de soporte se busca alinear el rotor y el estator donde al estar alineados se evitará cualquier tipo de interferencia o fricción que pueda perturbar su movimiento.

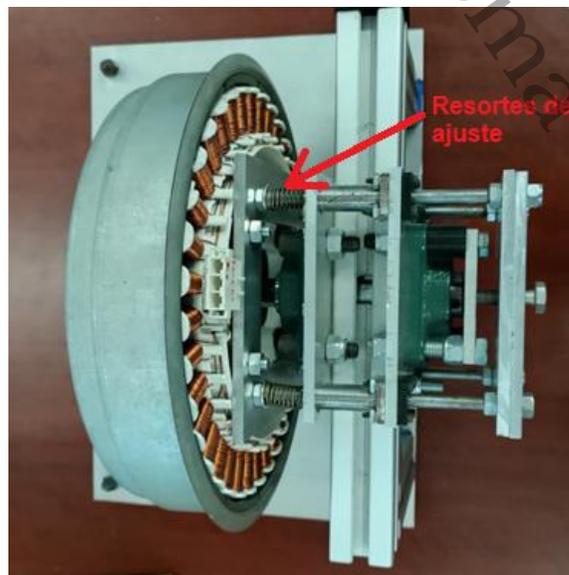
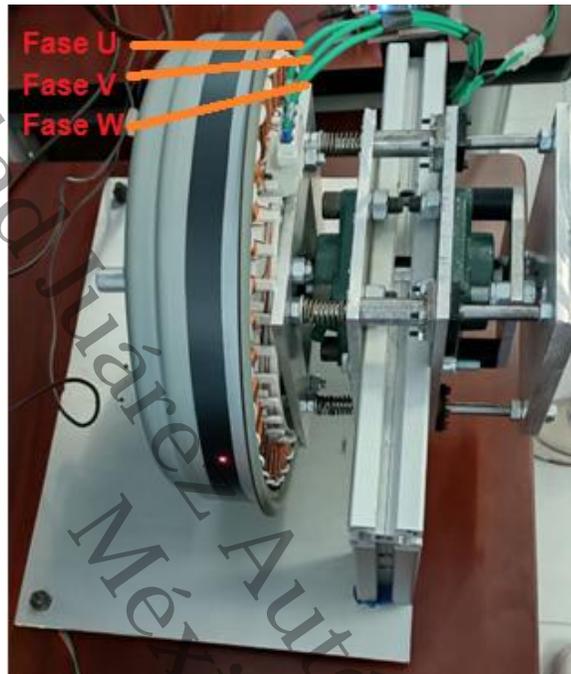


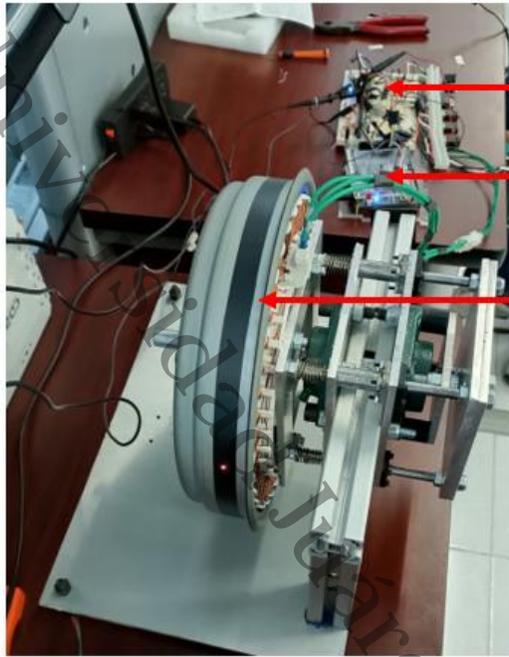
Figura 32. Resortes de ajuste.

Una vez que el motor es acoplado a la base de metal y se verifica que no exista ningún contacto físico entre el rotor y estator el motor está listo para ser conectado al circuito electrónico de potencia para la puesta en marcha del mismo. En la Figura 33 se muestra la conexión del circuito electrónico al motor BLDC trifásico.



*Figura 33. Conexión de las fases del motor BLDC trifásico al circuito electrónico.*

Una vez realizado el montaje del motor y haber construido el circuito de potencia se procede a realizar la conexión entre ellos. En la Figura 34 se puede observar el motor BLDC conectado al circuito electrónico de potencia. La tarjeta FPGA se conecta directamente al circuito de potencia donde las seis señales entran al circuito de protección posteriormente las señales pasan al circuito indicador por ultimo las señales entran al inversor trifásico el cual se encuentra conectado a las tres fases del motor BLDC.



Circuito de Potencia.

Tarjeta FPGA.

Motor BLDC.

Figura 34. Conexión del circuito de potencia con el motor BLDC.

Universidad Autónoma de Tabasco.

## Capítulo 3. Metodología de caracterización de la frecuencia óptima

Se implementa el algoritmo de control basado en conmutación trapezoidal usando una plataforma experimental en hardware basado en una arquitectura FPGA que consiste en un microprocesador con un lenguaje propiamente desarrollado en el Laboratorio de Robótica y Control de la Facultad de Ciencias de la Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. En este trabajo se usará para conmutar los transistores de potencia y generar las señales digitales senoidales al motor BLDC. Para el desarrollo de este trabajo, se realizó una estancia académica de dos semanas en el lugar antes mencionado, ver [Anexo A](#).

El presente trabajo está formado principalmente 4 partes como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 35.

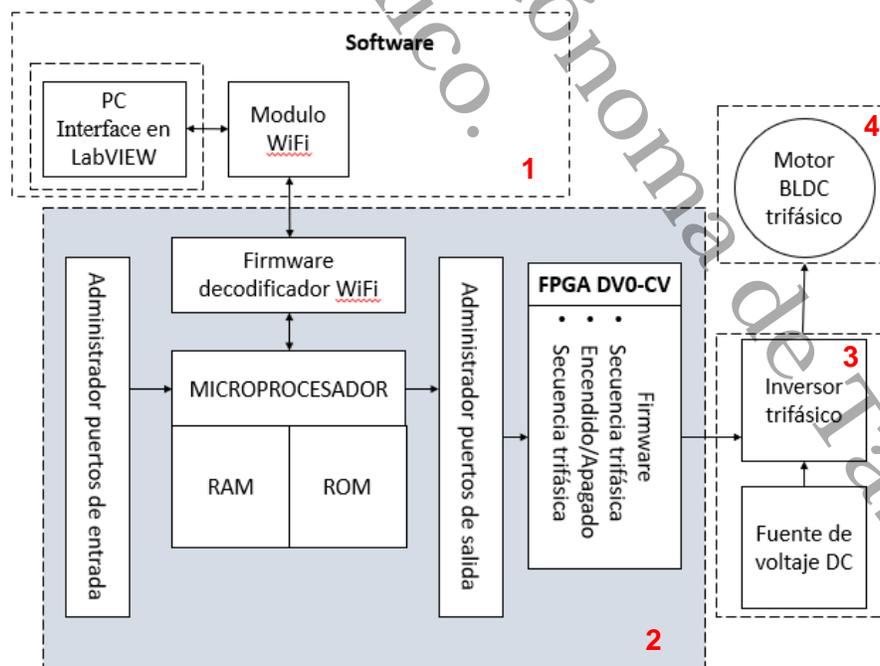


Figura 35. Diagrama de bloques del trabajo realizado.

Las partes fundamentales o principales son:

1. Interfaz en LabVIEW
2. Sistema embebido en la tarjeta FPGA DV0-CV
3. Circuito electrónico de potencia
4. Motor Brushless trifásico

Cada bloque de la figura anterior cuenta con una configuración para una tarea específica. En la sección anterior se realizó el análisis y cálculo del circuito electrónico para el manejo del motor BLDC trifásico por lo que en esta sección se explicara en que consiste el sistema embebido desarrollado en la tarjeta FPGA, la interfaz en LabVIEW y por último los pasos realizados para fijar el motor de modo que se realice su puesta en operación.

La Figura 36 muestra cada bloque mencionado anteriormente empleados en la caracterización del motor BLDC. El inversor trifásico constituido por transistores de potencia es alimentado por una fuente DC.

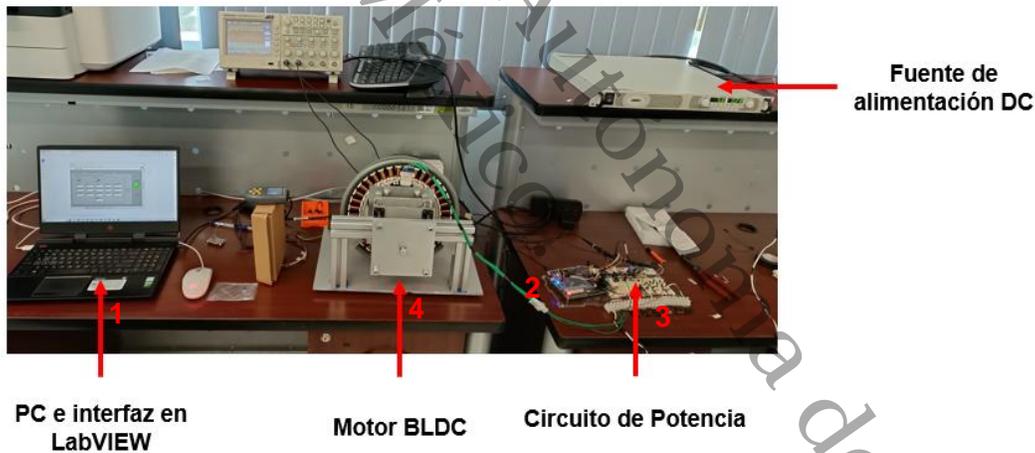


Figura 36. Hardware y equipos utilizados para la caracterización.

### 3.1. Control trapezoidal en la tarjeta FPGA

El **sistema embebido** implementado cuenta con un microprocesador, un módulo de memoria RAM, un módulo que administra los puertos de salida, de igual forma cuenta con un módulo para los puertos de entrada y por último un puerto de WiFi. Este sistema

cuenta con una unidad de procesamiento (CPU) la cual cuenta con decodificadores que administran las señales de entrada y salida de sus respectivos puertos al igual que cuenta con una unidad de memoria RAM. Para poder realizar la programación se cuenta con un módulo WiFi el cual es la forma de interacción directa con la PC. El sistema embebido cuenta con 6 puertos de entrada con un bus de 32 bits por otro lado cuenta con 3 puertos de salida de 32 bits como se muestra en la Figura 37. Estos puertos son decodificados por el Microprocesador de modo que los datos de entrada como de salida cuentan con su propio bus.

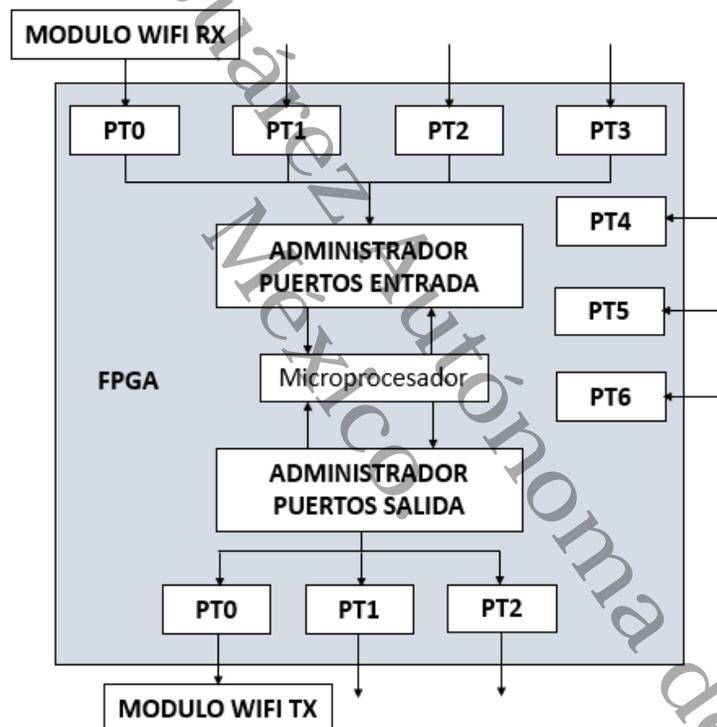


Figura 37. Puertos de entrada y salida.

La distribución de los puertos de entrada se muestra en la Tabla 6, donde en un inicio estos puertos estarán vacíos excepto el puerto PT0 el cual solo es usado para la comunicación WiFi.

Tabla 6. Distribución de puertos de entrada.

PT0	No usar PT0 [32]	Solo para lectura del módulo WiFi RX PT0[31-1]
-----	------------------	--

PT1	No usar PT1 [32]	Bits de usuario PT1 [31-1]
PT2	No usar PT2 [32]	Bits de usuario PT2 [31-1]
PT3	No usar PT3 [32]	Bits de usuario PT3 [31-1]
PT4	No usar PT4 [32]	Bits de usuario PT4 [31-1]
PT5	No usar PT5 [32]	Bits de usuario PT5 [31-1]
PT6	No usar PT6 [32]	Bits de usuario PT6 [31-1]

Para los puertos de salida de la Tabla 7 solo se encuentran disponibles dos puertos por que al igual que los puertos de entrada el puerto PT0 es exclusivo para la comunicación WiFi.

*Tabla 7. Distribución de los puertos de salida.*

PT0	No usar PT1 [32]	Solo para escritura del módulo WiFi RX PT0 [31-1]
PT1	No usar PT2 [32]	Bits de usuario PT1 [31-1]
PT2	No usar PT3 [32]	Bits de usuario PT2 [31-1]

Lenguaje de programación utilizado para el sistema embebido

Es necesario el uso de un lenguaje de programación denominado Código D para poder emplear el sistema embebido. En este lenguaje se basa en instrucciones básicas tales como operaciones aritméticas, trigonométricas, lógicas, operación bit a bit, manejo de números enteros y de punto flotante. En la Figura 38 se muestra la sintaxis para cada una de las operaciones antes mencionadas.

INSTRUCCIÓN Y SINTAXIS				
IF	R	>, <, >=, <=	R o N	
CÓDIGO A REALIZAR SI LA CONDICIÓN ES CIERTA				
ENDIF				
WHILE	R	>, <, >=, <=	R o N	
CÓDIGO A REALIZAR REPETIDAMENTE SI LA CONDICIÓN ES CIERTA				
ENDWHILE				
FOR	N (VALOR DE INICIO)	N (VALOR DE AUMENTO)	N (VALOR FINAL)	
CÓDIGO A REALIZAR REPETIDAMENTE				
ENDFOR				
DELAY				
R	=	N		
R	=	R	+	R o N
R	=	R	-	R o N
R	=	R	*	R o N
R	=	R	/	R o N
R	=	R o N	^	R o N
R	=	LN		R o N
R	=	EXP		R o N
R	=	SQRT		R o N
R	=	SIN		R o N
R	=	COS		R o N
R	=	TAN		R o N
R	=	CSC		R o N
R	=	SEC		R o N
R	=	COT		R o N
R	=	SINH		R o N
R	=	COSH		R o N
R	=	TANH		R o N
R	=	CSCH		R o N
R	=	SECH		R o N
R	=	COTH		R o N
R	=	ARCSIN		R o N
R	=	ARCCOS		R o N
R	=	ARCTAN		R o N
LRAM	DIRECCIÓN	R		
ERAM	R	DIRECCIÓN		
LPOR	P	R		
EPOR	R	P		

Figura 38. Instrucciones de programación del sistema embebido.

Se tienen diferentes sentencias las cuales son:

- IF (sentencia condicional)
- WHILE, FOR (sentencias cíclicas)
- DELAY (para realiza retardos ya que la velocidad máxima del sistema embebido es de 100MHz)
- Registros R (almacenan datos de 32 bits, estos datos son de tipo entero o de punto flotante)

Se hace uso de la memoria RAM debido a que se ven superados los doce registros para el procesamiento de datos. Para esto se tienen las instrucciones:

- ERAM (almacenar datos)
- LRAM (extraer datos)
- LPOR (escritura de puertos)
- EPOR (lectura de puertos)

Las operaciones LPOR y EPOR tienen la función de ingresar los datos al sistema embebido, realizar el respectivo procesamiento y enviar los datos.

La serie de instrucciones mencionadas anteriormente son utilizadas para la implementación del algoritmo deseado el cual es escrito en un archivo de texto, es necesario utilizar un traductor denominado compilador código D, el cual genera un lenguaje el cual sistema embebido pueda interpretar. El código D genera un código hexadecimal por el cual el sistema embebido interpretara el algoritmo deseado.

El firmware es la electrónica digital configurado dentro del FPGA, el cual es usado en otros trabajos tales como (Lopez-Gomez et al., 2020), (González-Arriaga et al., 2023). En este trabajo se implementa este sistema para generar la secuencia trifásica, dirección de giro, así como el encendido y apagado. En la Tabla 8, se tiene la secuencia para los 6 estados posibles. Se utiliza una máquina de estados para generar las salidas que necesita el inversor trifásico, en la tabla se muestra el valor binario y su equivalente en decimal correspondiente para cada estado.

Tabla 8. Valores de salida del Firmware.

Estado	Salida Binario						Salida Decimal
Estado 1	0	0	0	1	1	0	6
Estado 2	1	0	0	1	0	0	36
Estado 3	1	0	0	0	0	1	33
Estado 4	0	0	1	0	0	1	9
Estado 5	0	1	1	0	0	0	24

<b>Estado 6</b>	0	1	0	0	1	0	18
-----------------	---	---	---	---	---	---	----

El Firmware necesita de cinco señales de entrada como se indica:

- Giro del motor (Giro [1]), ocupa un bit de control
- Puesta en marcha (ON/OFF [1]), de igual forma ocupa un bit de control
- Frecuencia (INV-FR [21...0]), en este caso utiliza 22 bits de control
- RESET general del bloque n
- La señal de reloj de 100 MHz

El sistema embebido en cada puerto de salida cuenta con 32 bits, la Tabla 9 muestra la distribución de bits del generador de la secuencia trifásica.

Tabla 9. Mapeo de los puertos de salida.

PT1	No Usar	INVERSOR	ON/OFF	DIRECCION DE GIRO	FRECUENCIA
BIT	[32]	[31...26]	[25]	[24]	[23...1]

El firmware tiene 6 salidas físicas correspondientes a pines de los módulos de expansión de la tarjeta FPGA, la Tabla 10 muestra la distribución de pines correspondiente a los seis estados posibles.

Tabla 10. Distribución de pines de salida.

Salida	a	b	c	d	e	F
PIN	R16	T20	R15	R17	K19	P18

Para generar la secuencia de salida con la frecuencia deseada, es necesario usar contadores debido a que el sistema cuenta con un reloj de 100 MHz.

### 3.1.1. Diseño del Software, conmutación trapezoidal.

Al desarrollar el firmware y se agrega al sistema embebido, posteriormente se realiza el desarrollo del software para la puesta en marcha del motor BLDC trifásico, siguiendo el

diseño del firmware se necesita de tres parámetros: ON/OFF, dirección de giro y la Frecuencia, con estos se desarrolla el algoritmo en Código D donde se realizan los cálculos necesarios dependiendo de los tres parámetros de entrada mencionados anteriormente.

La frecuencia del inversor enviada por el sistema embebido al motor BLDC trifásico está dada por la siguiente ecuación:

$$T = \left( \frac{\frac{1}{F_{deseada}}}{Estados\ posibles} \right) (F_{reloj}) \quad (36)$$

Donde,

$F_{deseada}$  : es la frecuencia deseada para la conmutación

*Estados posibles* : son los 6 estados posibles por lo que toma un valor de 6

$F_{reloj}$  : es la frecuencia del reloj del sistema embebido que tiene un valor de 100MHz

Siguiendo la ecuación el cálculo es para encontrar el valor del Periodo. Con esta ecuación encontramos los valores de los contadores necesarios para obtener la frecuencia deseada.

### 3.1.2. Tarjeta FPGA modelo DE0-CV.

El sistema embebido esta implementado en una tarjeta FPGA (Field Programmable Gate Array) modelo DE0-CV fue elegida por la capacidad de compuertas que cuenta para su programación además es posible implementar módulos de propósito específico IP, con esto se pueden desarrollar un firmware adicional para una tarea específica. El sistema embebido solo utiliza una parte de la tarjeta FPGA para emular el microprocesador.

La tarjeta FPGA que se utiliza en este trabajo cuenta con una ranura de expansión para aumentar la capacidad de memoria insertando una tarjeta SD, cuenta con una SDRAM propia que la utiliza para almacenar instrucciones de los programas desarrollados.

También cuenta con puertos de entrada y salida tipo USB, VGS y PS/2; asimismo cuenta con dos bloques de expansión para terminales de 40 pines, las cuales pueden ser configuradas como interfaces de entrada o salida. Cuenta con cuatro botones, incluye un botón de *reset general* de la tarjeta y un bloque de 10 switch como se muestra en la Figura 39.

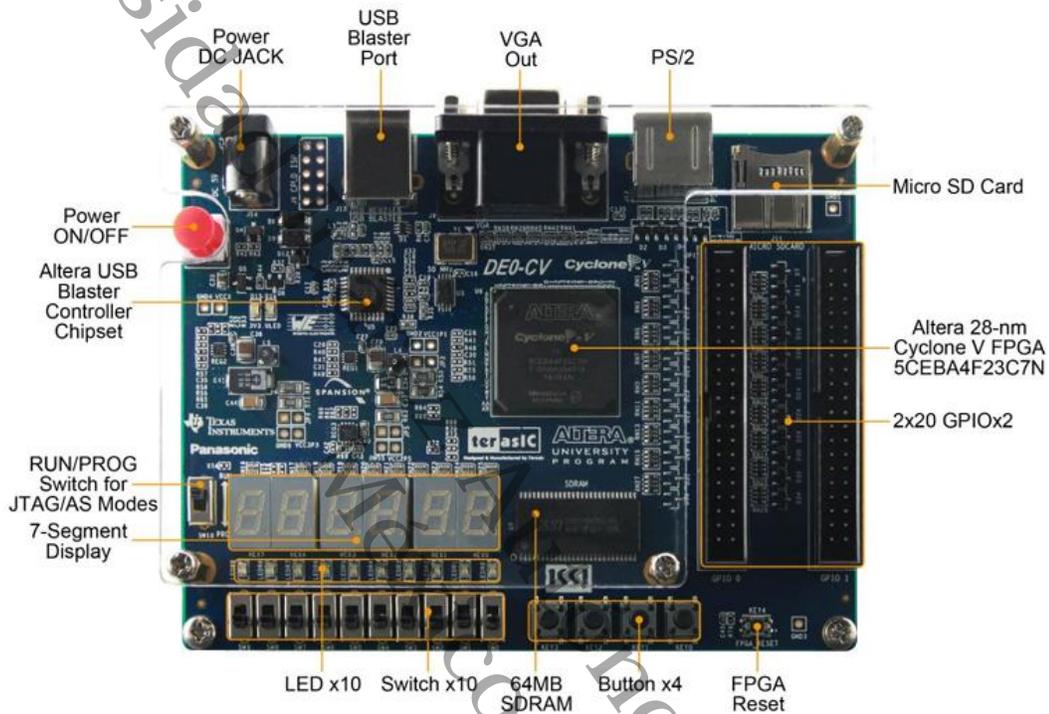


Figura 39. FPGA modelo DE0-CV. (Mitzi Mendoza, 2020).

La tarjeta FPGA modelo DE0-CV tiene las siguientes características:

- Chip Cyclone V
- 49 K elementos de lógica programable
- 3080 K bits de memoria embebida
- 4 PLLs fraccionales
- Dispositivo de configuración serial de Altera EPCS64
- 64 M byte SDRAM, x 16 bits de bus de datos
- Dos bloques de 40 pines de expansión
- Socket para tarjetas Micro SD

El reparto de los pines físicos los cuales son utilizados para conectar al sistema físico según el software programado se muestra en la siguiente Figura 40.

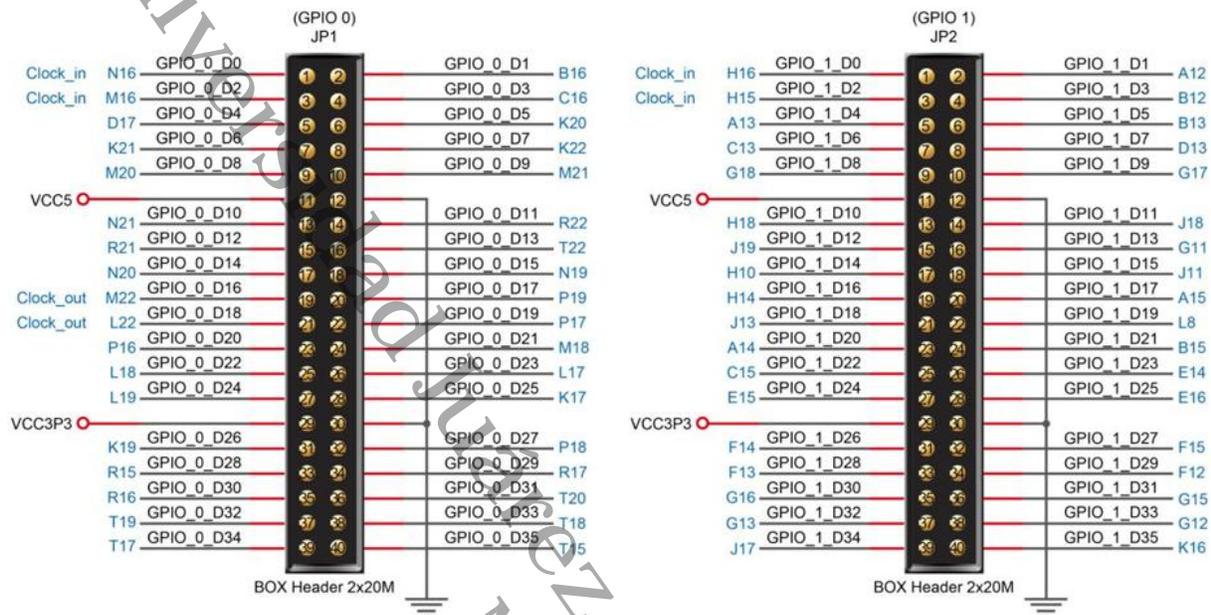


Figura 40. Distribución de pines FPGA DE0-CV.

### 3.1.3. Módulo de comunicación inalámbrica WiFi.

Para poder realizar la comunicación y lograr la programación entre la PC y el software es necesario utilizar un módulo de comunicación wifi. El módulo se conecta al sistema embebido por medio del puerto PT0. La Figura 41 muestra el módulo wifi modelo RN-XV utilizado.

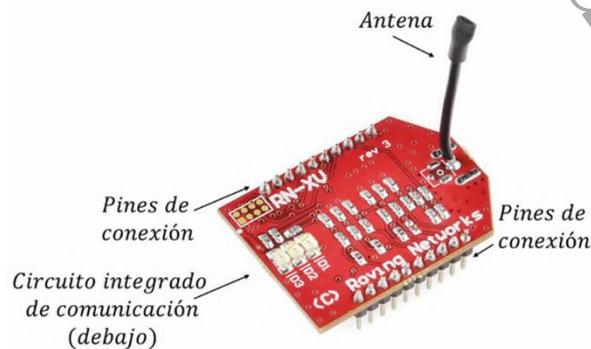


Figura 41. Módulo de comunicación inalámbrica Wifi.

Los pines de conexión del módulo WiFi son los mostrados en la Figura 42.

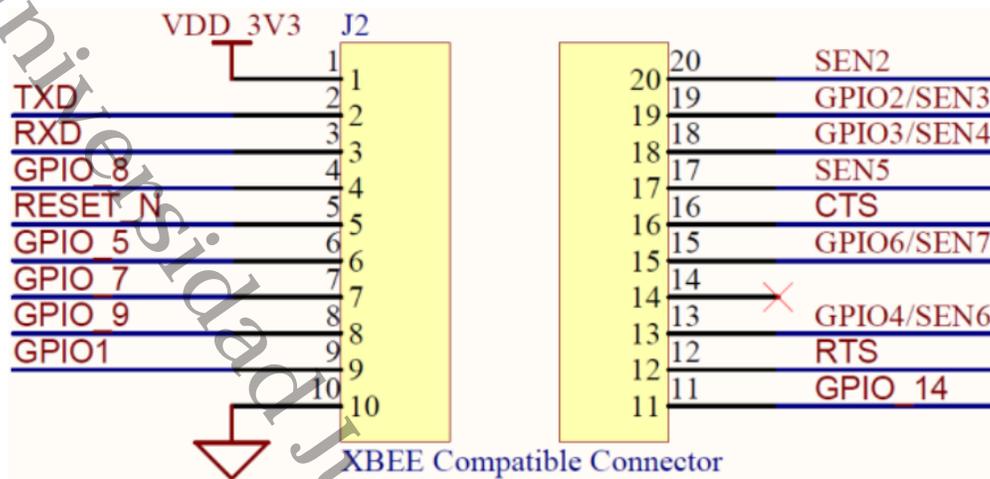


Figura 42. Pines de conexión del módulo WiFi.

El módulo wifi se configura mediante la asignación de un IP, su operación es de modo punto de acceso o AP (*Access Point*) con esto se crea una red inalámbrica por la cual se accederá por el ordenador, de esta forma se logra la comunicación directa entre la PC y el sistema embebido.

### 3.1.4. Comunicación entre la PC y la tarjeta FPGA.

La comunicación entre la PC y la tarjeta FPGA se establece mediante un módulo WiFi, el cual recibe los bits de información enviados desde la PC. Estos datos, configurados en la interfaz de LabVIEW, incluyen comandos específicos como encendido y apagado, ajuste de frecuencia y control del sentido de giro. Esta conexión inalámbrica permite que la FPGA interprete y ejecute las instrucciones en tiempo real. El módulo WiFi se conecta a la tarjeta FPGA de acuerdo con los pines especificados en la Tabla 11:

Tabla 11. Pines de conexión entre el módulo WiFi y la tarjeta FPGA.

Pines modulo WiFi	Pines FPGA
Alimentación a 3V	Pin 20 (salida de 3.3 V)
TXD	Pin T17
RXD	Pin T15
Tierra física	Tierra física

La Figura 43 ilustra gráficamente la conexión entre el módulo WiFi y la tarjeta FPGA, siguiendo la configuración de pines de la tabla anterior.

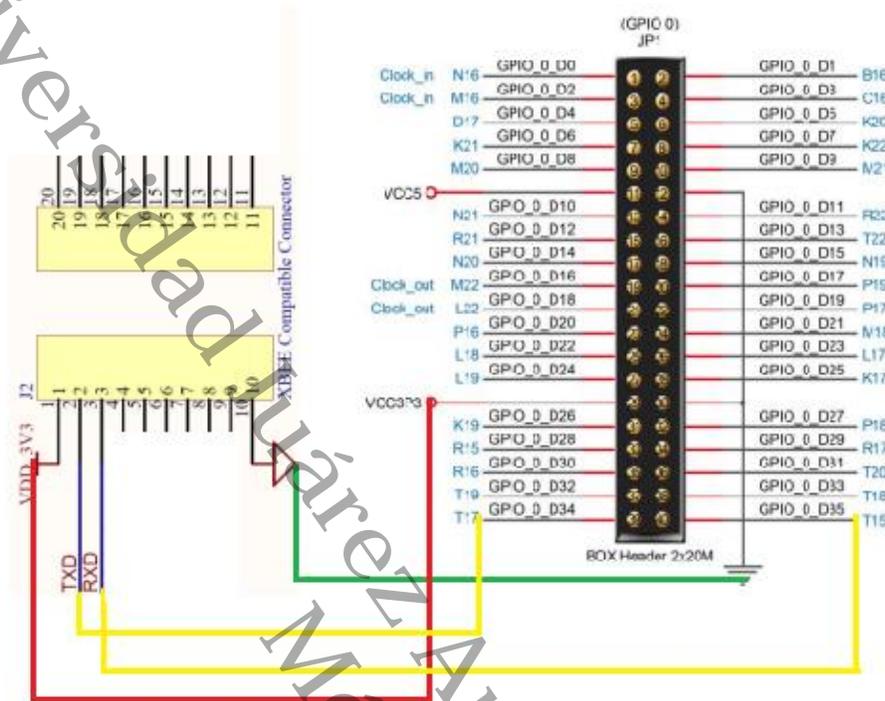


Figura 43. Conexión entre el módulo WiFi y la tarjeta FPGA.

### 3.1.5. Conexión con el circuito electrónico de potencia.

Las señales de salida del control por conmutación trapezoidal, implementado en la tarjeta FPGA, están asignadas a los pines especificados en la Tabla 12 donde cada pin de salida corresponde a un estado de los 6 posibles de este control.

Tabla 12. Salida de los 6 estados de la tarjeta FPGA.

Pin de salida del FPGA	Estado del control trapezoidal
R16	Señal a
T20	señal b
R15	Señal c
R17	Señal d
K19	Señal e

P18	Señal f
Pin 29	3.3 Vcc
Pin 30	Tierra física

Las salidas de la tarjeta FPGA se conectan directamente al circuito electrónico de potencia donde las señales entran al circuito de protección posteriormente al circuito controlador constituido por transistores y por último al circuito inversor el cual transforma la corriente directa en corriente alterna que alimenta las tres fases del motor Brushless trifásico y proceder con su puesta en marcha. La Figura 44 muestra la conexión del circuito electrónico con la tarjeta FPGA.

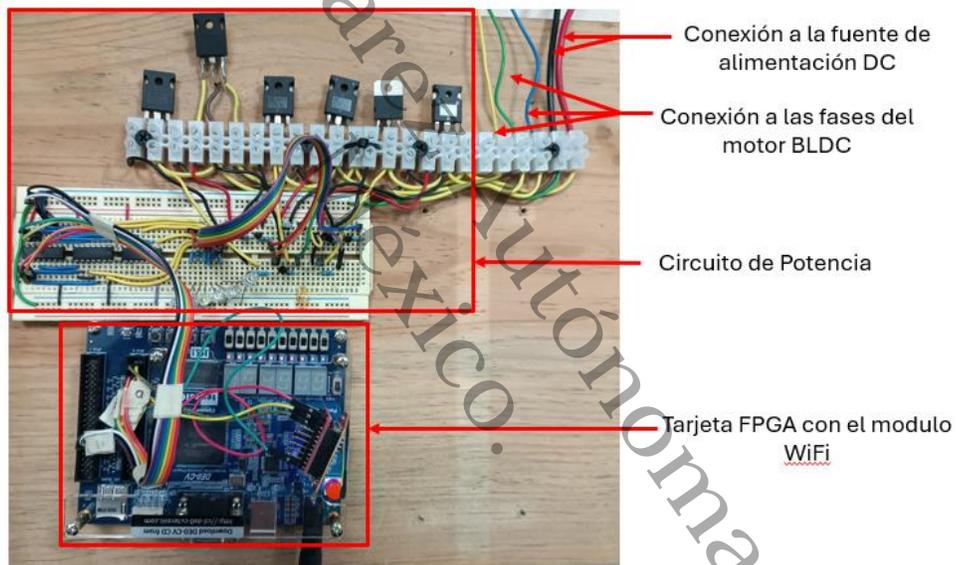


Figura 44. Conexión de la tarjeta FPGA con el circuito electrónico de potencia.

### 3.2. Interfaz en LabVIEW

La interfaz de LabVIEW es la plataforma utilizada para modificar las instrucciones según la necesidad del trabajo realizado, en este caso se encuentra desarrollado junto con el microprocesador, por lo que, en este trabajo se implementa para enviar la frecuencia, el sentido de giro y encendido/apagado del motor. En la Figura 45 se tienen 4 pestañas las cuales son, a) Descarga software, aquí se carga el archivo Hexadecimal, b) Descargar

Datos a RAM la cual es utilizada para el almacenamiento de los datos en la memoria RAM, c) Ejecución del Programa, como se indica aquí es donde se realiza la carga de los parámetros, así como la ejecución del sistema embebido, por último, en d) Manual de usuario, donde se encuentra indicaciones del uso de la interfaz de usuario.

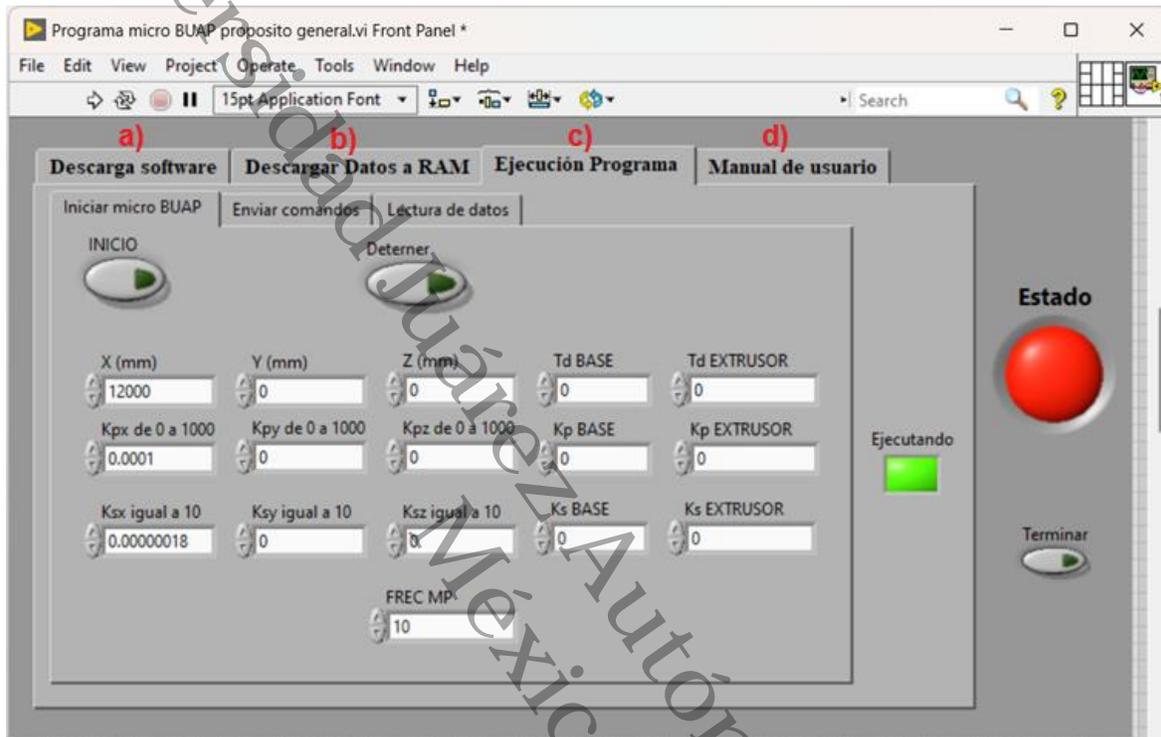


Figura 45. Interfaz en LabVIEW.

Esta interfaz de usuario tiene comunicación directa con el sistema embebido por medio de la conexión WiFi de la PC puesto que la tarjeta FPGA cuenta con un módulo WiFi. En la Figura 46 se muestra el nombre de la red a la que se debe conectar la PC.



Figura 46. Red inalámbrica creada por el módulo WiFi.

Para la ejecución correcta del sistema embebido se debe realizar una serie de pasos para configurar correctamente el envío de los parámetros deseados:

1. Descarga del software donde se realiza la carga del archivo hexadecimal como muestra la Figura 47.

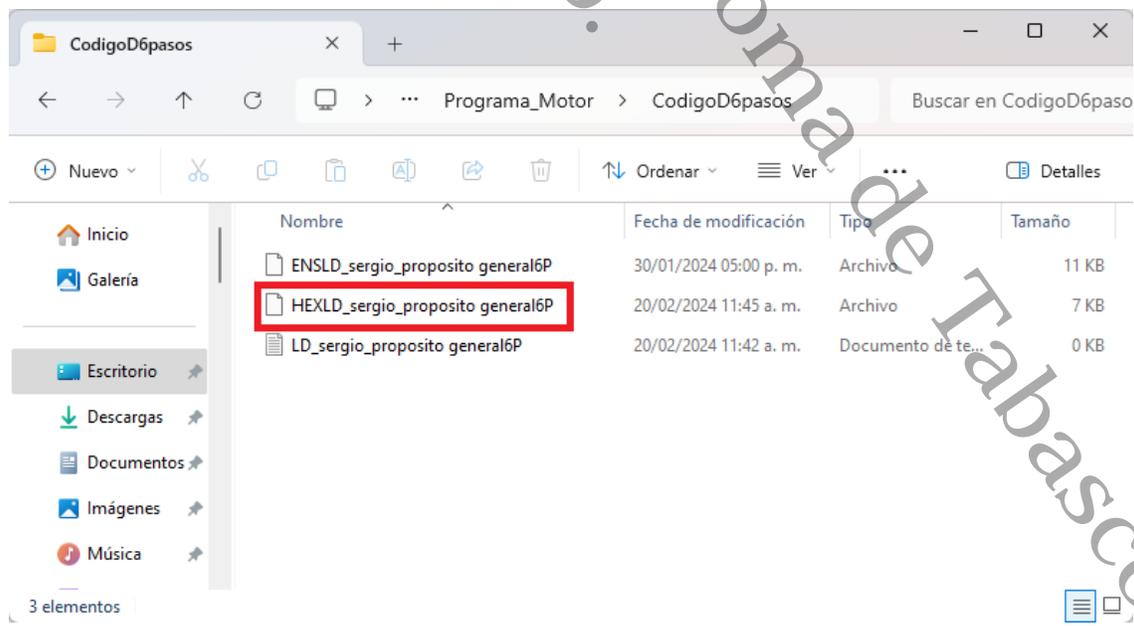


Figura 47. Descarga del archivo hexadecimal.

- En la ejecución del programa se modifican ciertos parámetros deseados como muestra Figura 48 son donde se determina:
  - Encendido/Apagado
  - Frecuencia deseada
  - Sentido de giro (derecha/izquierda)

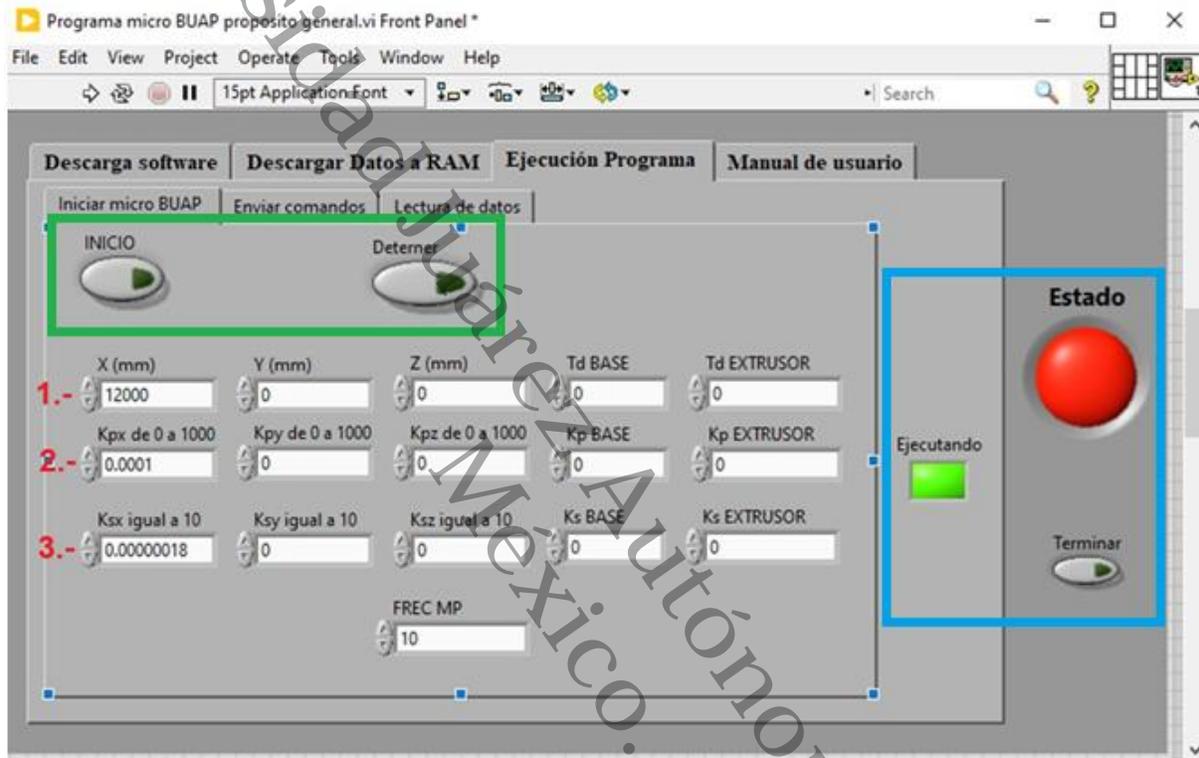


Figura 48. Ejecución del programa.

Es importante verificar que la conexión se haya realizado correctamente por lo que se tiene un indicador de Estado señalado por el recuadro color azul en la Figura 48, su función es indicar el estatus de la comunicación entre la PC y el sistema embebido para que al momento de la descarga del archivo Hexadecimal no se presente perdida de información. Por otro lado, se cuenta con la opción Terminar la cual finaliza la comunicación WiFi.

- Estos parámetros son enviados al sistema embebido por medio del botón INICIO que se encuentra señalado por el recuadro color verde en la Figura 48, por medio de este botón se activa el sistema embebido el cual iniciara el procedimiento

matemático y lógico programado. De igual forma se tiene el botón DETENER el cual detiene el envío de los parámetros al sistema embebido.

El encendido y apagado se controla con un bit es decir solo puede tomar valores de 1 o 0, para la frecuencia esta va desde 1 hasta 50 Hz la cual se puede incrementar de 1 Hz y por último se tiene el sentido de giro que de igual manera se controla con un bit como se mencionó anteriormente solo toma valores de 1 y 0.

El proceso para realizar la conmutación comienza desde determinar los parámetros deseados en la interface de LabVIEW, estos datos se envían por medio de una red WiFi creada por un módulo WiFi el cual está conectado a la tarjeta FPGA la cual decodifica los datos enviados para que las señales tengan la frecuencia deseada, estas señales tienen pines de salida determinados los cuales van conectados directamente al circuito de protección constituido por compuertas lógicas, siguiendo por un circuito indicador el cual su única función es verificar que se estén enviando las señales por ultimo las señales entran al circuito controlador e inversor el cual esta alimentado por una fuente DC y finalmente las tres señales de salida del inversor trifásico entran a cada una de las fases correspondientes para realizar la conmutación y el motor entre en operación.

### **3.3. Técnica de caracterización**

#### **3.3.1. Implementación de la técnica de caracterización**

El diagrama de la Figura 49 muestra los pasos necesarios para la técnica de caracterización llevada a cabo con el objetivo de encontrar la frecuencia de funcionamiento optima del motor BLDC trifásico.

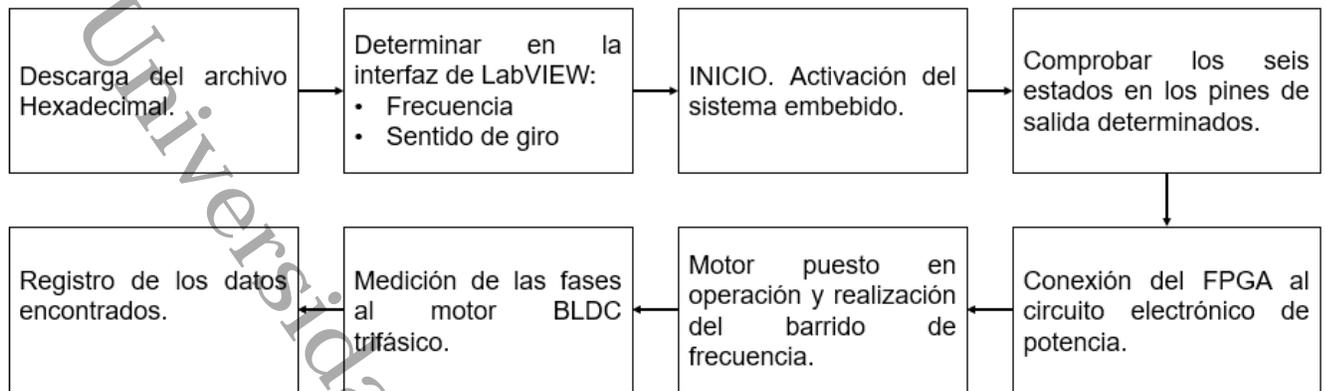


Figura 49. Procedimiento para la implementación de la técnica de caracterización.

Los primeros 3 procedimientos se describieron en el capítulo anterior en donde se realizan por medio de la interfaz de LabVIEW.

Antes de conectar las seis salidas de la tarjeta FPGA al circuito electrónico de potencia para la puesta en marcha del motor BLDC trifásico, es fundamental verificar el correcto envío de la señal de control trapezoidal. Para ello, se realiza la medición de los seis estados posibles, como se muestra en la Figura 50. Empleando un osciloscopio se asegura que las 6 señales tengan la misma amplitud y se encuentren desfasadas  $60^\circ$  una respecto a otra de igual forma que la frecuencia que se determinó en la PC sea la correcta, con esto garantiza una correcta conmutación del motor evitando calentamiento en el mismo, así como en el circuito electrónico.

Una vez asegurado el correcto envío de los seis estados del control trapezoidal se realiza la conexión al circuito electrónico de potencia donde se conectan directamente a la entrada del circuito de protección siguiendo el diagrama mostrado en la Figura 25.

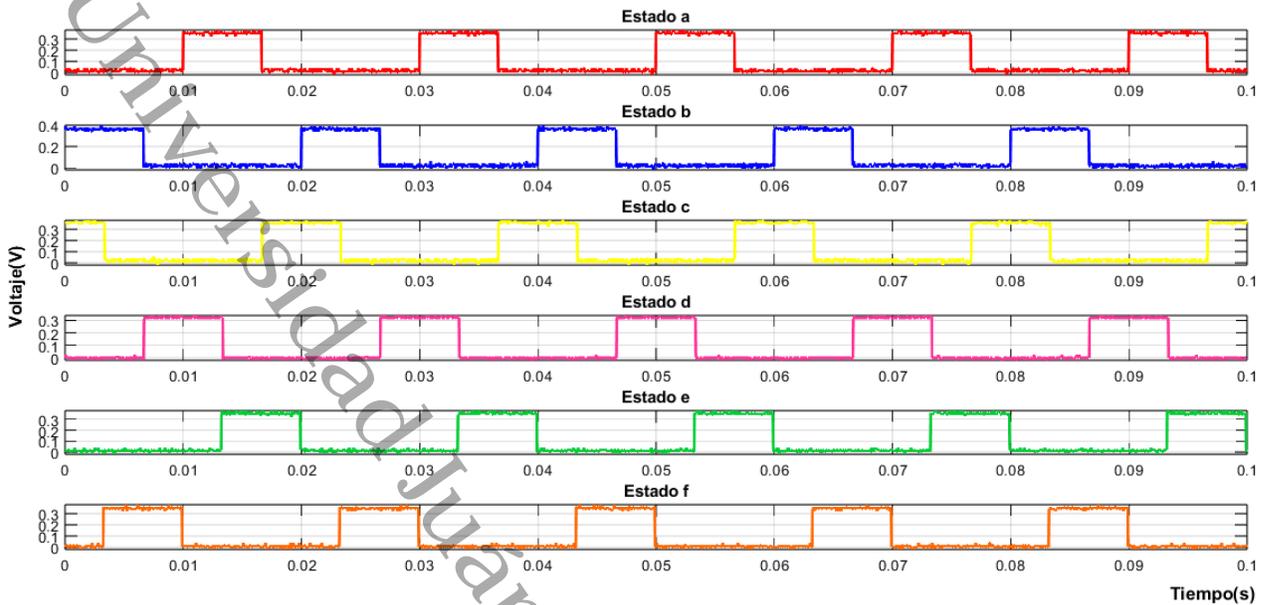


Figura 50. Señales del control trapezoidal de la tarjeta FPGA.

Esta sección tiene como objetivo determinar la frecuencia óptima de funcionamiento de un motor Brushless trifásico mediante una técnica de caracterización basada en un barrido de frecuencia y encontrar un voltaje donde el rotor mantenga un giro constante sin presentar alguna perturbación. El método tiene como fin encontrar un valor de frecuencia que garantice una operación estable del motor. Al fijar la frecuencia deseada y enviada al sistema embebido se enciende la fuente de voltaje de DC, iniciando con un valor de 0 V posteriormente se aumenta el voltaje poco a poco para observar el comportamiento del motor con diferentes valores de voltaje hasta encontrar un valor de voltaje donde el giro del rotor se mantenga constante. Al ir variando los valores del voltaje desde 0 hasta el valor de voltaje encontrado para la frecuencia determinada se observa como el motor presenta alta vibración en su operación hasta que en un rango de voltaje el motor se estabiliza. Para el estudio se establecieron frecuencias en un rango de 0 a 22 Hz, para cada valor se identificó un voltaje adecuado que permitiera al motor operar de manera estable. Además, se registró la corriente demandada correspondiente a cada frecuencia seleccionada, así como la velocidad en RPM. Los datos encontrados se registraron y permitieron analizar el rendimiento del motor bajo diferentes condiciones de operación los resultados se describirán en el capítulo posterior.

### 3.3.2. Medición de las fases del motor BLDC trifásico.

Como parte del trabajo se tomó la medición de las tres fases del motor BLDC puesto en marcha a una frecuencia de 22 Hz y con un voltaje de 40 V encontrado para ese valor de frecuencia. Con la función MATH del osciloscopio se realizó la medición de fase a fase, donde este realiza la operación matemática correspondiente para obtener la suma de las fases. La Figura 51 muestra las mediciones realizadas de cada una de las fases, así como la obtención de la medición de fase a fase.

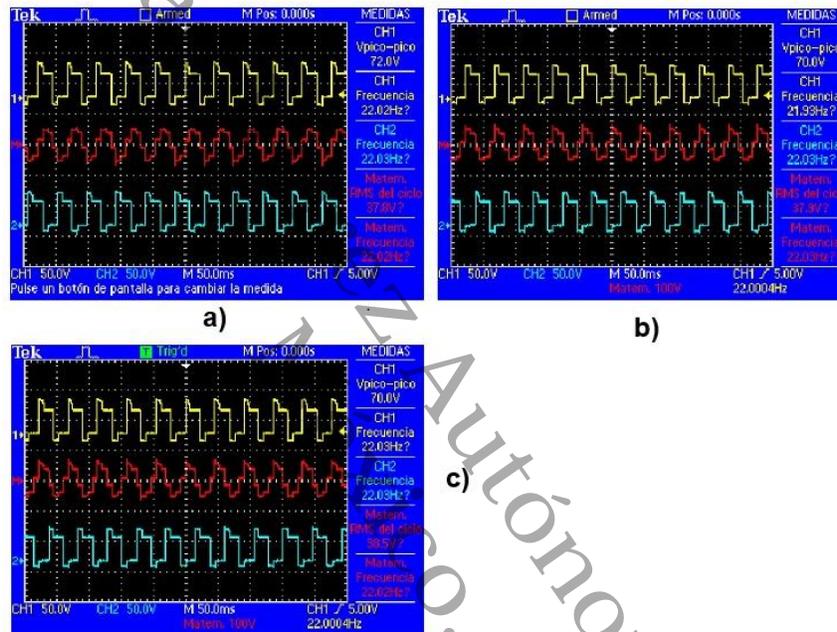


Figura 51. Medición entre fases del motor BLDC trifásico.

De la Figura 51 el inciso a) corresponde a la medición  $V_{uv}$  donde la señal de color amarillo es la fase U, la señal de color azul es la señal V. La señal de color rojo es la medición de fase a fase  $V_{uv}$  la cual se encuentra con la función MATH del osciloscopio. En el inciso b) se tiene la medición entre fases  $V_{vw}$  en donde la fase V es la señal de color amarillo y para la fase W es la señal de color azul. Por último, inciso c) muestra la medición entre la fase  $V_{wu}$  donde W es la señal de color amarillo y U es la señal de color azul. La medición de estas señales será de gran utilidad debido a que se realiza la comparación con la simulación del circuito electrónico de potencia.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1. Simulación del circuito electrónico de potencia

La construcción del circuito electrónico se realizó en el programa PROTEUS por su facilidad de uso y principalmente por su conjunto de características que permiten el rápido diseño y prueba de los circuitos electrónicos. Por lo antes mencionado se procedió con la simulación del circuito electrónico de potencia del motor BLDC trifásico con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de los transistores que conforman el circuito los cuales en conjunto generan tres señales senoidales para la conmutación del motor siendo así la validación del correcto cálculo de las resistencias en el Capítulo 2. Por lo que en esta sección se muestra el desarrollo del circuito electrónico en la Figura 52 se puede observar la construcción del circuito esquemático en el programa PROTEUS.

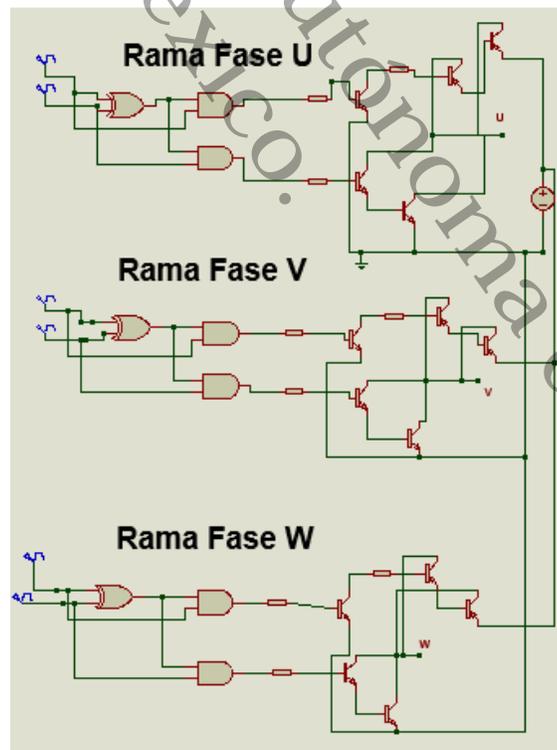


Figura 52. Circuito electrónico construido en PROTEUS.

Para la simulación del circuito se construyeron las tres ramas, cada rama está formada por los elementos que conforman el circuito electrónico, para los valores de las resistencias calculados en el Capítulo 2 se utilizaron los valores comerciales:

- 1 compuerta XOR (74LS08).
- 2 compuertas AND (74LS86).
- 2 transistores NPN (2N2222A).
- 1 transistor PNP (2N3906).
- 1 transistor de potencia NPN (TIP35C).
- 1 transistor de potencia NPN (TIP36C).
- 1 resistencia con valor de 820  $\Omega$ .
- 1 resistencia con valor de 1.2 K $\Omega$
- 1 resistencia con valor de 680  $\Omega$ .

Para una mejor perspectiva del desarrollo del circuito para su simulación en la Figura 53 se muestra una de las tres ramas correspondiente a la fase U. Como se ha mencionado las señales provenientes de la tarjeta FPGA (recuadro N°1) entran directamente al circuito de protección (recuadro N° 2) el cual está constituido por compuertas XOR y AND posteriormente pasa al circuito controlador (recuadro N° 3) el cual es alimentado con una fuente de voltaje DC.

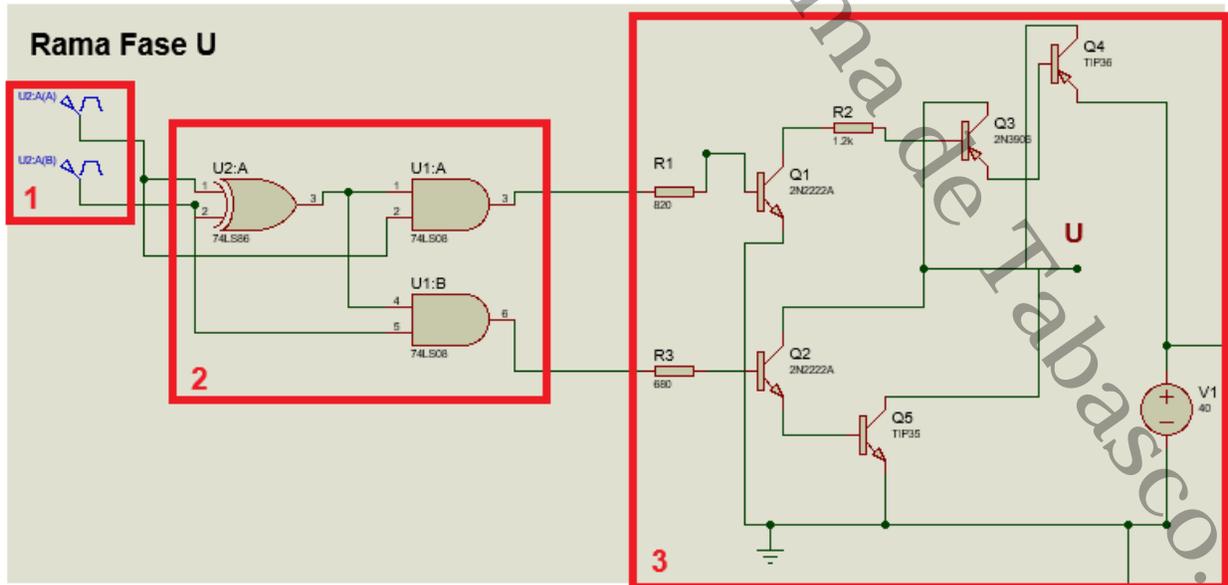


Figura 53. Rama para la fase U construida en PROTEUS.

Para lograr la simulación de los 6 estados posibles del control trapezoidal se utilizaron generadores de pulso los cuales se configuraron para lograr el desfase de 60° que debe tener cada señal una de la otra. Para ello se realizó un pequeño cálculo; sabiendo que utilizaremos una frecuencia de 22 Hz para la simulación entonces tenemos que el periodo es:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{22} \quad (37)$$

$$T = 0.04545s$$

Conociendo el periodo podemos aplicar una regla de 3 para los 6 estados posibles y encontrar el tiempo en que se enviara el pulso el cual determinaremos en los generadores de pulso en PROTEUS.

Para la señal a de 0-60° se tiene,

$$\frac{(0.04545)(0^\circ)}{360^\circ} = 0s \quad (38)$$

Para la señal b de 60°-120°,

$$\frac{(0.04545)(60^\circ)}{360^\circ} = 0.007575s \quad (39)$$

Ahora para la señal c de 120°-180°,

$$\frac{(0.04545)(120^\circ)}{360^\circ} = 0.1515s \quad (40)$$

Siguiendo con la señal d de 180°-240°,

$$\frac{(0.04545)(180^\circ)}{360^\circ} = 0.02272s \quad (41)$$

Para la señal e de 240°-300° se tiene,

$$\frac{(0.04545)(240^\circ)}{360^\circ} = 0.03030s \quad (42)$$

Por último, para la señal f de 300°-360°,

$$\frac{(0.04545)(300^\circ)}{360^\circ} = 0.03787s \quad (43)$$

Con estos cálculos se pueden configurar los generadores de pulso para cada rama como muestra la Figura 54. Conociendo que a y b controlan la rama de la fase U, c y d controlan la rama de la fase V finalmente por ultimo las señales e y f controlan la rama de la fase W.

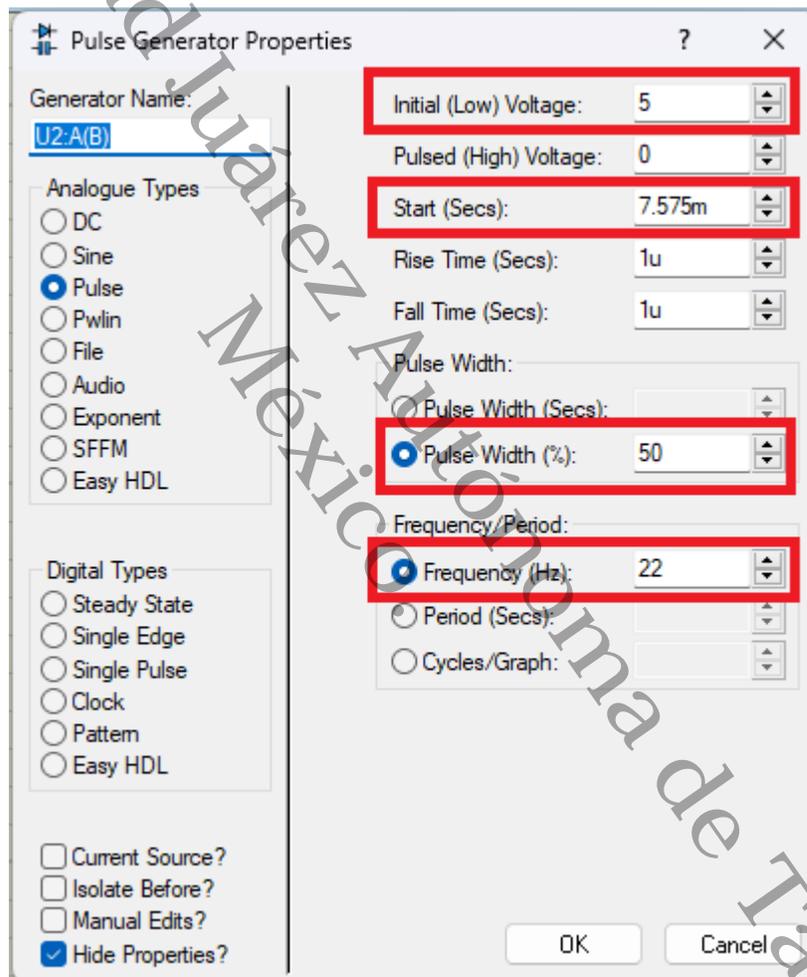


Figura 54. Configuración del generador de pulsos en PROTEUS.

En las propiedades del generador de pulsos se configuro el inicio en LOW a una amplitud de 5 V, así como el tiempo de inicio del pulso los cuales fueron calculados anteriormente,

el ancho de pulso al 50 % y, por último, se determina la frecuencia de 22 Hz. Por último, se configuro la fuente de voltaje a 40 V siguiendo la Tabla 13.

Al configurar y conectar el osciloscopio a la salida de cada una de las ramas y posteriormente realiza la simulación se encontraron como resultado las señales de la Figura 55. En donde la señal color amarillo corresponde a la fase U, la fase V está dada por la señal de color azul por lo que la señal de la fase W es la señal de color rosa.

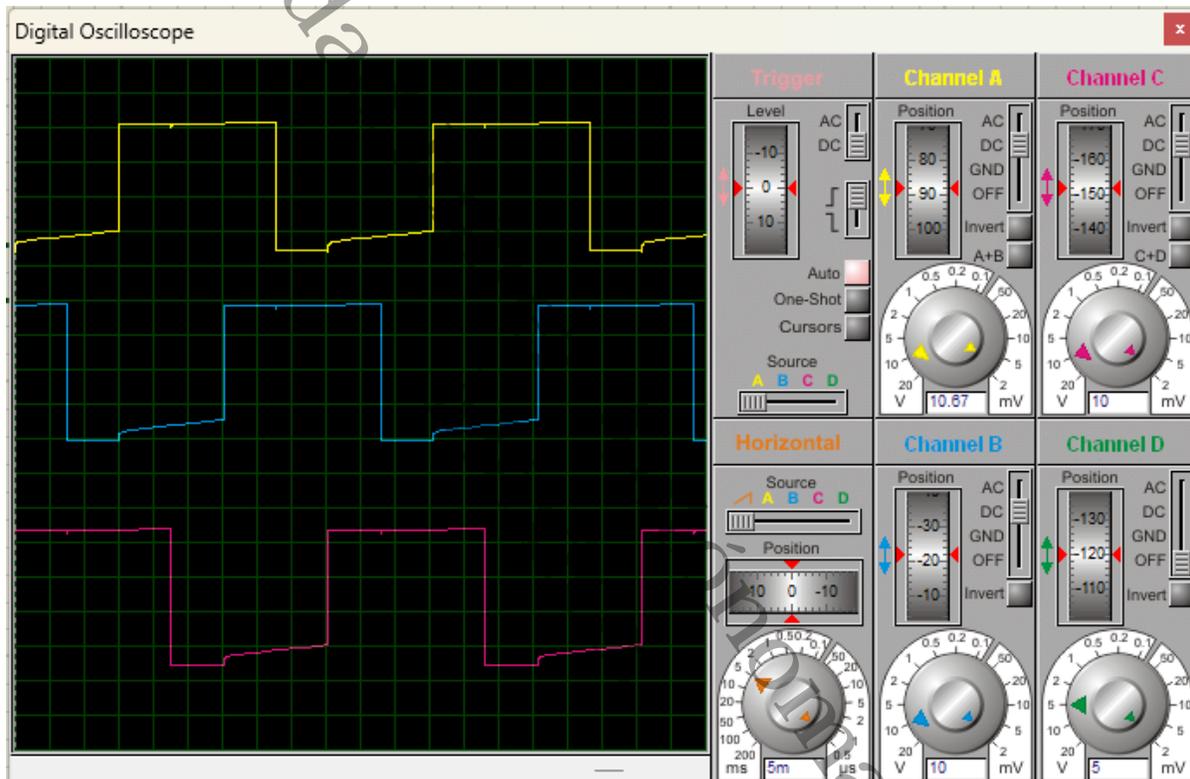


Figura 55. Medición a la salida de cada rama del circuito electrónico en PROTEUS.

Las señales de la figura anterior son el resultado del circuito electrónico de potencia donde a partir de alimentar de 40 V de DC se generan 3 señales senoidales para la conmutación del motor las cuales se encuentran desfasadas  $120^\circ$  una de la otra.

## 4.2. Comparación de medición de señales de las fases

En el Capítulo 3 se realizó la medición de cada una de las fases del motor BLDC puesto en operación, con estas mediciones podemos realizar una comparación entre mediciones tanto experimental como en las señales encontradas en la simulación. Como no se pueden descargar los datos directamente del osciloscopio se utilizó una sonda de voltaje conectada a las salidas del circuito electrónico y esta se enviaba a un graficador analógico del cual los datos se pueden descargar en un archivo .DAT, se realizó la descarga de los datos de la simulación para las 3 fases. Por otro lado, al descargar los datos de las señales experimentales el osciloscopio por default genera un archivo Excel por lo cual se realizó la transformación de los datos a un archivo .DAT para facilitar el manejo de los datos y trabajar con un solo tipo de archivo.

Se utilizó el programa Matlab para realizar los gráficos de las señales de cada una de las fases por lo que se realizó un código, ver [Anexo B](#), donde se unió en un solo gráfico la medición de fase realizada experimentalmente, así como la señal encontrada en la simulación del circuito. Una vez que se corre el código anterior en Matlab se obtiene como resultado el gráfico de la Figura 56 el cual corresponde a la medición de cada una de las fases del motor BLDC trifásico.

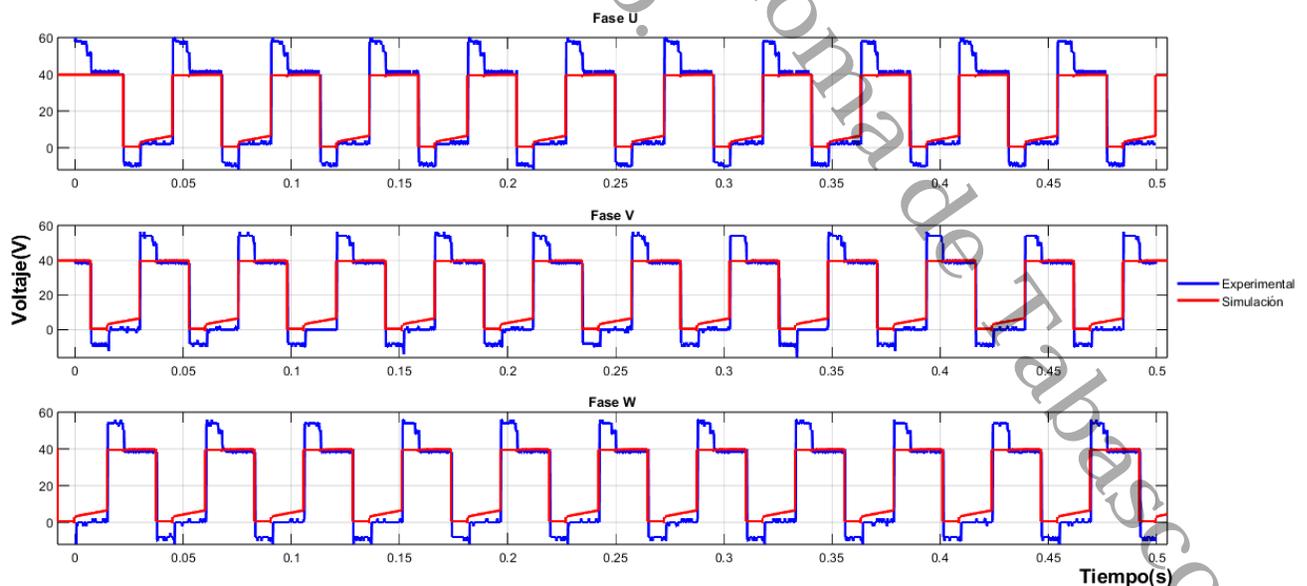


Figura 56. Comparación de señales de la medición de cada una de las fases.

De la Figura 56 las señales de color azul corresponden a las mediciones realizadas de manera experimental en cambio las señales de color rojo corresponden a las señales encontradas en la simulación del circuito electrónico de potencia. Se puede notar picos de voltaje en las señales experimentales este fenómeno se debe a que el motor demanda más energía instantáneamente, viéndose superada brevemente la fuente de voltaje por otro lado en las señales de la simulación este fenómeno no existe. Este fenómeno no se presenta en la simulación ya que todo el circuito como las señales son ideales en cambio las señales experimentales se presentan diferentes fenómenos que afectan a las señales lo que en la simulación no existe.

De igual forma se tomó la medición de fase a fase del motor BLDC e igual del mismo que las señales de fase los datos de los archivos de Excel se pasaron a archivos .DAT para facilitar su manejo. Por el contrario, para generar las señales de fase a fase de la simulación se siguió la Tabla 2 la cual tiene la secuencia de conmutación para generar las señales senoidales. Igual que el caso anterior se elaboró un código en Matlab, ver [Anexo C](#), para graficar las señales correspondientes. Una vez que se corre el código se genera el grafico de la Figura 57 donde las señales experimentales de fase a fase, así como las señales de simulación se encuentran en un solo gráfico.

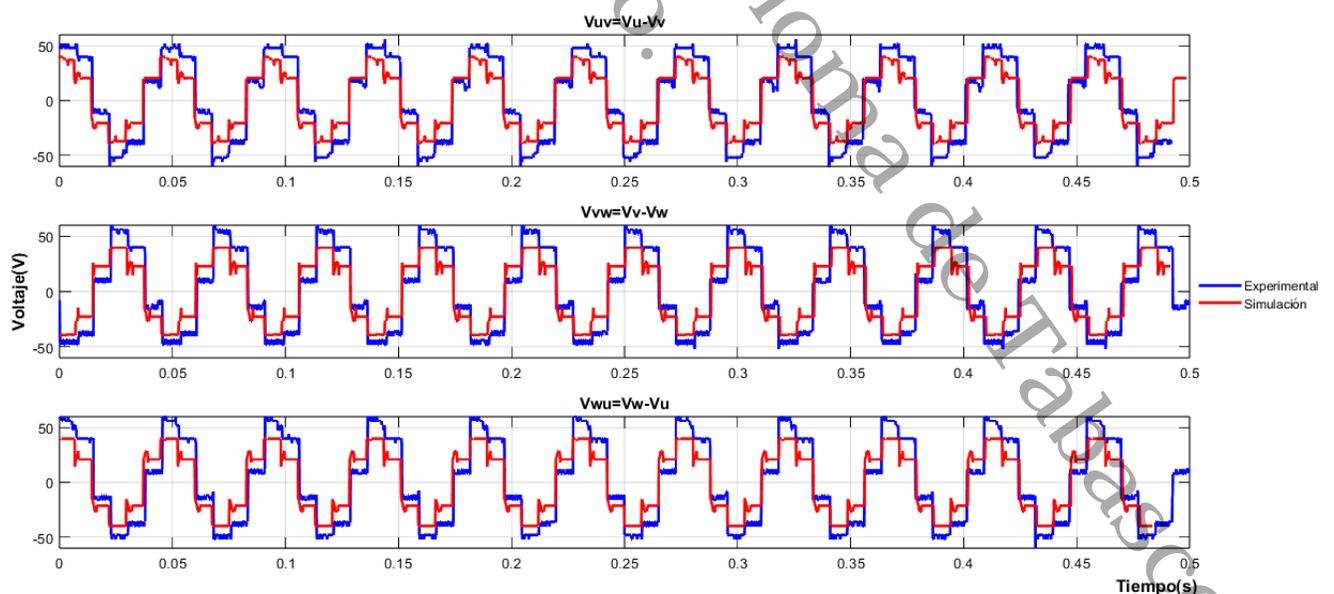


Figura 57. Comparación de señales de la medición de fase a fase.

En el gráfico anterior se encuentra la comparación de la medición de fase a fase  $V_{uv}$ ,  $V_{vw}$ ,  $V_{wu}$ , tanto las señales experimentales (señales de color azul), así como las señales de la simulación (señales de color rojo). Igual que el caso anterior se presentan picos de voltaje por cortos periodos de tiempo, pero la señal se estabiliza.

Con los resultados encontrados y los gráficos anteriores podemos decir que los cálculos realizados para el circuito electrónico son correctos por lo que se espera un buen funcionamiento del motor BLDC trifásico.

### 4.3. Resultados experimentales de la caracterización

Como se mencionó anteriormente en el método de caracterización implementado se realizó un barrido de frecuencia donde se busca un voltaje donde el motor operara de manera estable por otro lado se tomaba la medición de otras variables. En la Tabla 13 se resumen los datos obtenidos, cada color de la tabla corresponde a un rango de trabajo del motor BLDC.

Tabla 13. Datos registrados en el barrido de frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM
0	0	0	0
0.5	4.2	0.5	2.5
1	4.5	1	2.5
1.5	4.7	1.5	2.5
2	5.3	2	4.9
2.5	5.5	2.5	4.9
3	6.9	0.45	7.4
4	8.4	0.13	9.9
5	9.8	0.13	12.4
6	11.5	0.14	15
7	13	0.13	17.5
8	14.4	0.13	20

9	16	0.14	22.4
10	17.5	0.13	25
11	19	0.14	27.5
12	20.4	0.14	29.9
13	22	0.14	32.5
14	24	0.83	34.9
15	26	0.84	37.4
16	28	0.86	39.9
17	30	0.87	42.4
18	32	0.87	44.9
19	34	0.87	47.4
20	36	0.88	49.9
21	38	0.88	52.4
22	40	0.88	54.9

Con los datos de la tabla anterior se puede graficar las variables respecto a la frecuencia fijada en el barrido de frecuencia y así poder visualizar de una manera grafica el comportamiento del motor BLDC trifásico. Al graficar el voltaje respecto a la frecuencia como se muestra en la Figura 58 se puede observar un comportamiento no lineal.

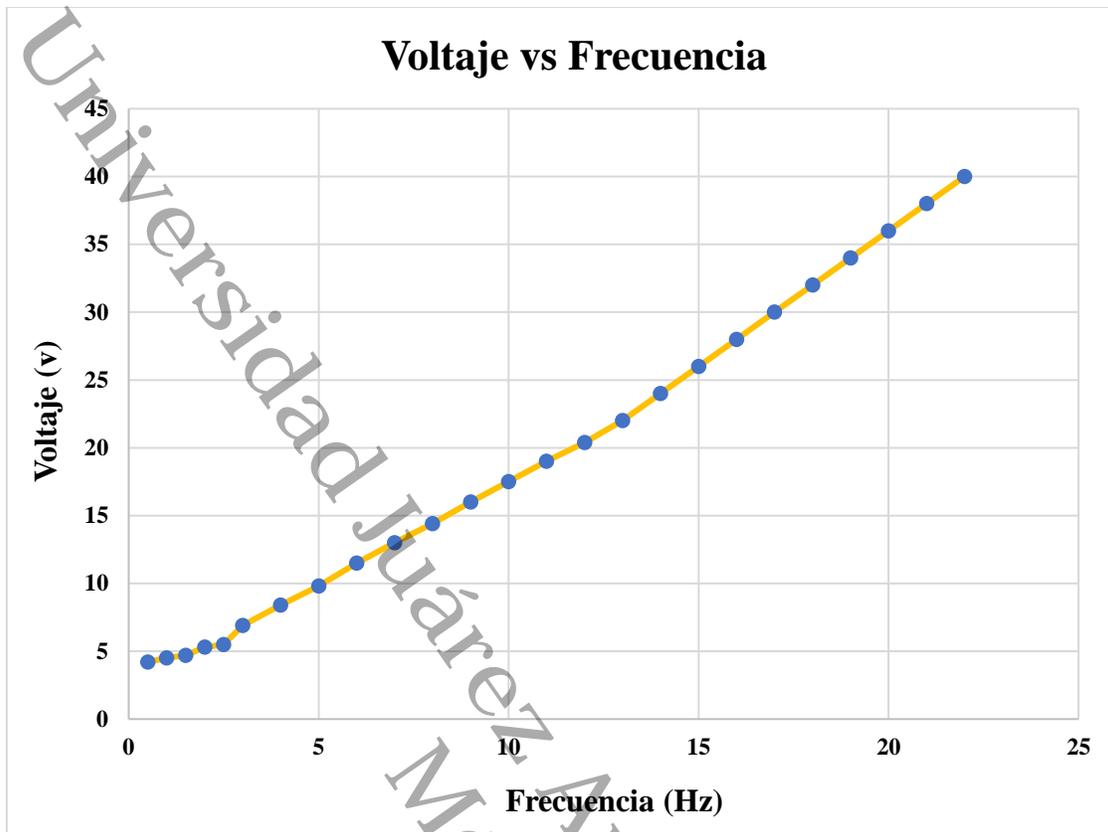


Figura 58. Gráfico Voltaje respecto a la Frecuencia.

A partir del gráfico anterior, se pueden identificar tres comportamientos distintos en el voltaje encontrado para cada valor de frecuencia determinado. Estos comportamientos pueden separarse y representarse individualmente, como se muestra en la Figura 59, para facilitar su análisis.

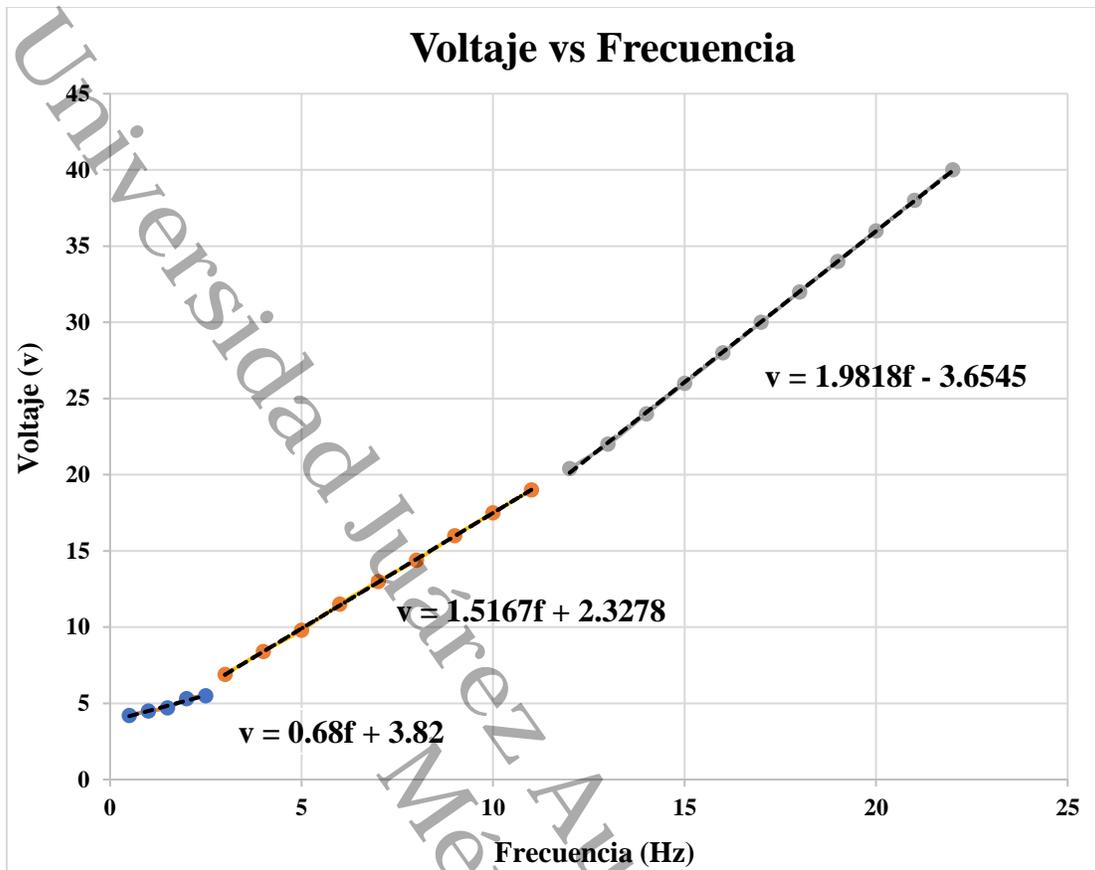


Figura 59. Identificación de los tres comportamientos encontrados.

Al aplicar líneas de tendencia a los gráficos mostrados podemos encontrar sus ecuaciones características de cada una de ellas las cuales son:

$$\begin{aligned}
 v &= 0.68f + 3.82 \\
 v &= 1.5167f + 2.3278 \\
 v &= 1.9818f - 3.6545
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

De la misma manera se graficaron las RPM registradas por cada valor de frecuencia determinada, el gráfico encontrado se muestra en la Figura 60.

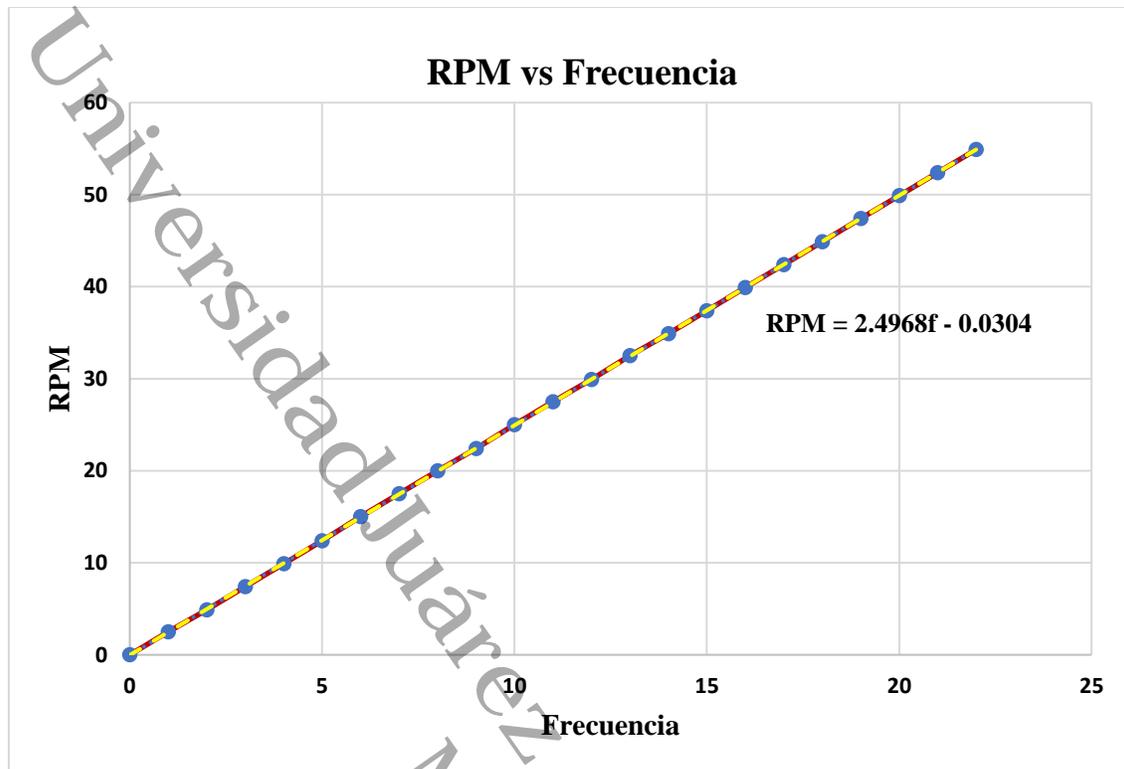


Figura 60. Gráfico RPM respecto a la Frecuencia.

Para el caso de velocidad del motor en RPM se puede observar que tiene un comportamiento lineal y la ecuación que describe este comportamiento es:

$$RPM = 2.4968f - 0.0304 \quad (45)$$

En los gráficos anteriores se describen el comportamiento y funcionamiento particular del motor BLDC trifásico puesto en marcha en diferentes frecuencias. Los voltajes encontrados para cada valor de frecuencia nos dieron como resultado tres diferentes comportamientos de los cuales el primer comportamiento no está operando adecuadamente esto se debe a que el voltaje es muy bajo para realizar una conmutación adecuada y por esta razón el motor demanda corrientes altas en comparación con los otros comportamientos. En el segundo comportamiento tenemos una estabilidad mucho más pronunciada y la corriente de demanda bajo considerablemente. Por último, para el último comportamiento se tiene una mayor estabilidad de giro y la corriente de mantiene en un rango estable por lo que el motor está en un rango de trabajo donde no presenta ninguna perturbación. Por otro lado, el comportamiento de la velocidad registrada del

motor muestra una relación completamente lineal. Esto indica que, en el rango de frecuencias determinado, la velocidad del motor responde de manera proporcional a los cambios en la frecuencia.

Con los datos obtenidos podemos determinar que el motor puede operar de manera estable en el rango de frecuencia de 3 a 22 Hz ya que a frecuencias bajas el motor no tiene una estabilidad y presenta mucha vibración al estar en funcionamiento. De este rango podemos dividirlo de 3 a 13 Hz en donde el motor presento una mayor estabilidad además que la corriente de demanda bajo considerablemente. Por último, para el rango de 14 a 22 Hz el motor mantuvo un funcionamiento estable, pero para este rango se registró mayor velocidad y la corriente de demanda se mantenía estable. Es importante destacar que el motor mantenía un torque alto en cada rango de frecuencia por lo que estos rangos de frecuencia, así como las ecuaciones que describen el comportamiento del motor encontrado serán útiles al momento de aplicar un tipo de control.

#### **4.4. Propuesta de diseño de la PCB del circuito de potencia**

Se presenta una propuesta de diseño de PCB para el circuito de potencia realizado en el protoboard para la caracterización del motor BLDC. Cabe resaltar que esta propuesta no forma parte de los objetivos del presente trabajo, sino que se ha ofrecido como un aporte complementario que puede ser considerado y fabricado para la continuación de este proyecto en investigaciones futuras.

Por lo tanto, el software Proteus cuenta con la herramienta PCB Layout en la cual se empleó para el diseño de la PCB del circuito electrónico de potencia mostrado en la Figura 25. Se capturó del circuito esquemático, el cual también fue utilizado para la simulación y comprobación del correcto funcionamiento de este en el Capítulo 4. Para este caso se determinaron como entradas a las seis señales, así como a los 5 V provenientes de la tarjeta FPGA y el voltaje de la fuente de alimentación DC. De forma similar se determinaron las tres salidas del circuito inversor correspondientes a las fases del motor U, V y W, en la Figura 61 se muestra el circuito realizado.



decidió por un ancho de pista T200 con el propósito de evitar calentamiento debido a la corriente que puede demandar el motor que es de 10 A.

En la cara la capa superior (Top Copper) mostrada en la Figura 62 se distribuyen las pistas de color rojo que corresponden de alimentación de voltaje para las compuertas lógicas las cuales se alimentan a 3.3 V tomados de la tarjeta FPGA, así como el voltaje de la fuente DC que alimenta los transistores de potencia del circuito inversor.

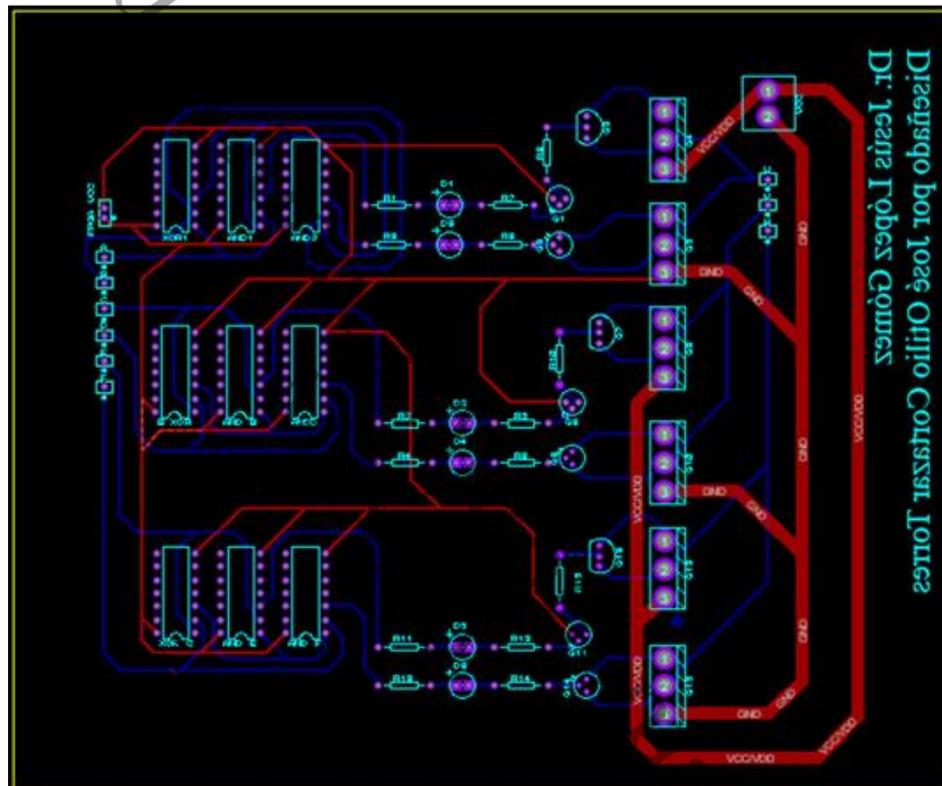


Figura 62. Distribución de las pistas de la PCB diseñada.

Por otro lado, en la capa inferior (Bottom Copper) de la figura anterior se muestran las pistas de color azul las cuales interconectan los componentes electrónicos encargados de realizar la conmutación del motor BLDC.

Puesto que realizar el plano de tierra es un paso importante en el diseño de una PCB ya que puede evitar interferencia o ruido entre las pistas lo que puede degradar la integridad de las señales. Se crearon planos de masa en la cara inferior y superior como se muestra en la Figura 63 para realizar la tierra aislada para cada capa de la PCB.

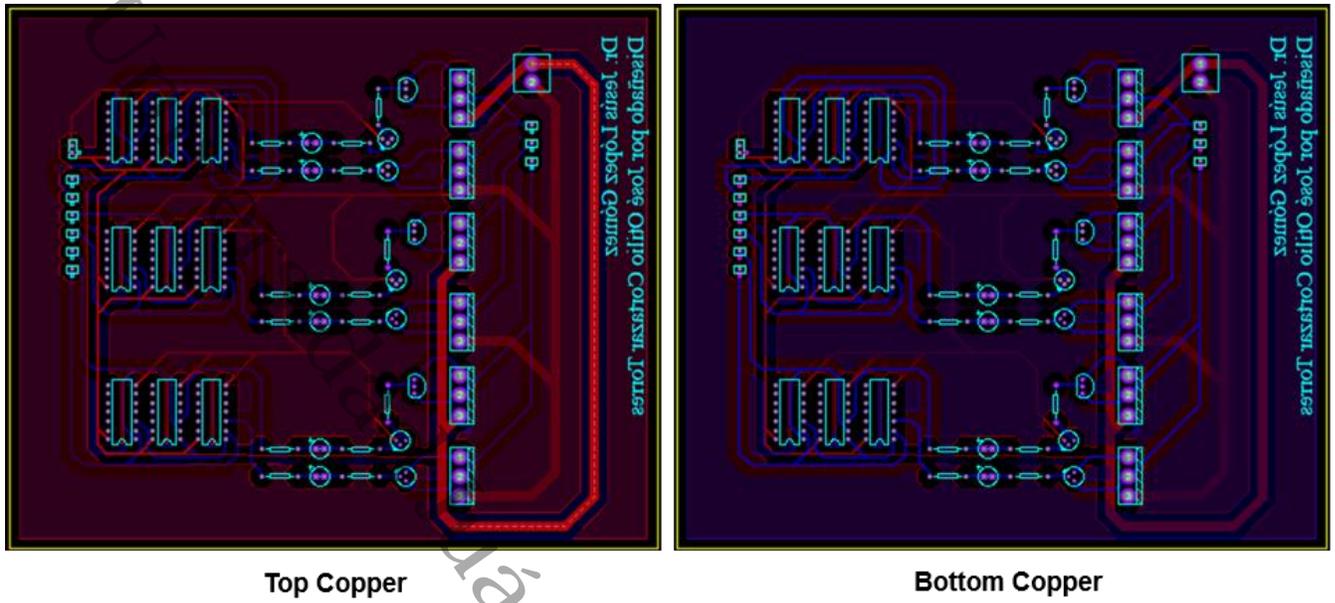


Figura 63. Tierra aislada para cada capa de la PCB.

Proteus permite obtener la previsualización del diseño de la PCB en la Figura 64 se tiene como se vería el diseño final realizado. Se puede los componentes electrónicos que conforman el circuito de potencia, las pistas de conexión en la capa superior e inferior, así como las tierras aisladas para cada capa.

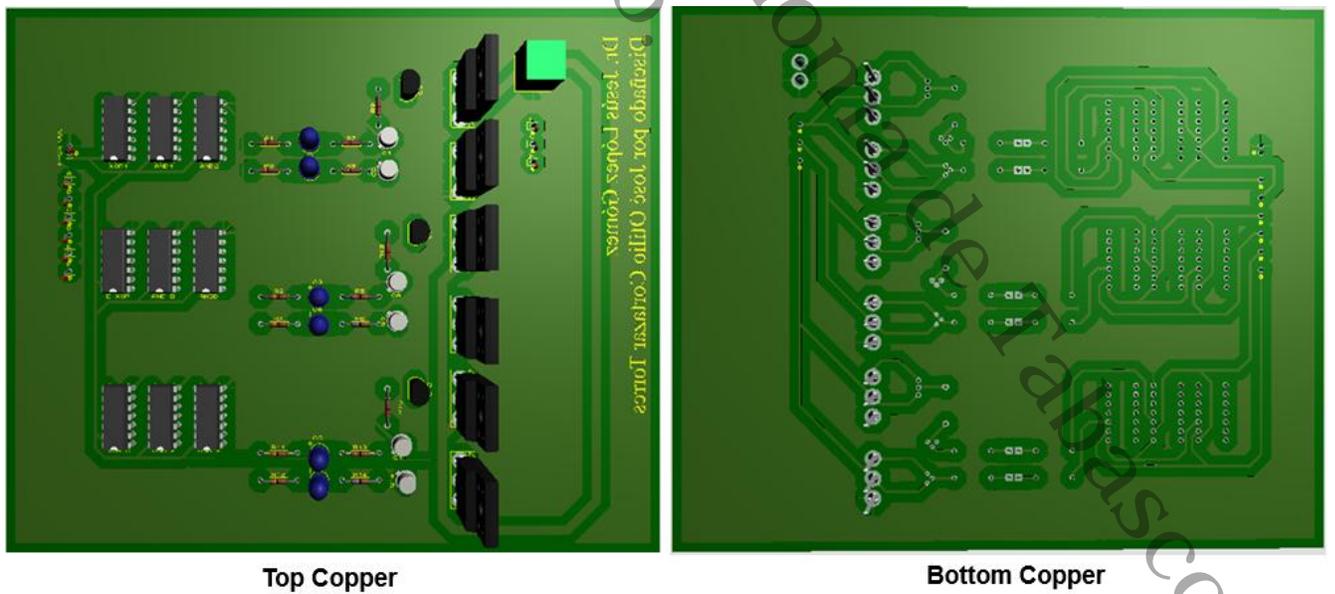


Figura 64. Previsualización del diseño de la PCB.

## Conclusiones

Los motores Brushless con el paso de los años han ganado gran popularidad en gran medida a las ventajas que presenta en comparación a otros motores eléctricos. Al no existir un contacto físico entre rotor y estator no se presentan los problemas asociados con el uso de escobillas lo que conlleva un mantenimiento mínimo y su vida útil sea alta. Como tal el motor presenta muchas ventajas, pero su principal desventaja es el uso de un circuito electrónico para realizar la conmutación. Esta es la razón primordial por la que implementar la técnica de caracterización y determinar una frecuencia optima de funcionamiento aumentaría en gran medida la vida útil del motor asimismo del circuito electrónico encargado de realizar la conmutación.

La simulación del circuito electrónico de potencia permitió realizar el análisis y comparación entre las mediciones experimentales con las mediciones tomadas en la simulación. Con los gráficos obtenidos podemos decir que los cálculos realizados para la configuración Darlington para los transistores fueron correctos dado que los resultados se encontraron señales sinusoidales desfasadas  $120^\circ$  una respecto a otra correspondientes a las fases U, V; W. De igual forma se generaron de manera correcta las señales de medición fase a fase por lo que se espera una correcta conmutación lo que conlleva a un buen funcionamiento del motor BLDC trifásico.

Los resultados experimentales dieron como resultado tres diferentes comportamientos en la búsqueda del voltaje en el barrido de frecuencia. Se puede decir que se cumple la característica de este tipo de control por conmutación debido que a frecuencias bajas el motor presento muchas perturbaciones al momento de operación lo que conlleva a una alta demanda de corriente. Se encontró un rango de 14 a 22 Hz donde el motor puesto en operación presento gran estabilidad y la corriente de demanda se mantuvo constante. Por lo anterior podemos decir que el motor trabajara de manera eficiente en ese rango de frecuencia.

Por otro lado, el motor respecto a la velocidad en RPM se obtuvo un comportamiento completamente lineal lo que indica que la velocidad cambia de manera constante respecto a la frecuencia. Esta relación lineal encontrada es muy importante ya que facilita el control del motor debido a que si existe cambio en la frecuencia habrá un cambio en la velocidad del motor BLDC trifásico.

Cabe destacar que el trabajo realizado se inició durante el XX VIC UJAT 2024 (ver [Anexo E](#)). Asimismo, se presentaron avances del proyecto en el Día Internacional de la Cultura Científica 2024 (IDCS 2024, ver [Anexo D](#)), llevado a cabo en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Para concluir el encontrar y determinar una frecuencia óptima de operación en el motor BLDC trifásico representa una gran ventaja en el funcionamiento del mismo puesto que se puede aprovechar de manera eficiente las características físicas de funcionamiento lo que conlleva a aumentar la vida útil del circuito electrónico de potencia ya que al no presentarse calentamiento debido a perturbaciones en el funcionamiento del motor.

## Anexo A. Constancia de Estancia Académica



### CONSTANCIA

A QUIEN CORRESPONDA  
PRESENTE

El que suscribe Dr. Gerardo Mino Aguilar, Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, hace constar

Que el C. **José Otilio Cortázar Torres**

Estudiante de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la Carrera de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, realizó su estancia académica con las siguientes actividades en el laboratorio de automatización de la Facultad de Ciencias de la Electrónica en la Maestría en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización (MCEA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, haciendo pruebas experimentales para la puesta en marcha y caracterización de un motor brushless DC para su elaboración de sus tesis de licenciatura, estas actividades se dirigieron bajo la asesoría del Dr. **Sergio Vergara Limón** y el apoyo de los estudiantes de la MCEA **Victor Manuel Leyva Osorio** de la generación 2023 y **Juan Francisco Pintor Michimani** de la generación 2022, durante el periodo del 29 de enero al 9 de febrero de 2024.

Se extiende la presente para los fines que a los interesados convengan.

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 16 de febrero de 2024

Dr. Gerardo Mino Aguilar  
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado

c.c.p. Archivo  
DR. GMA/mal



## Anexo B. Código MATLAB de comparación de resultados de una Fase del motor

```
clear all;
clc;
%Fase U
sP1=load ('dato.DAT');
X1=sP1(:,1);
Y1=sP1(:,2);

sP2=load ('U_OSCIL.DAT');
T1=sP2(:,1);
U=sP2(:,2);

%Fase V
sP3=load ('datoV.DAT');
X2=sP3(:,1);
Y2=sP3(:,2);

sP4=load ('V_OSCIL.DAT');
T2=sP4(:,1);
V=sP4(:,2);

%Fase W
sP5=load ('datoW.DAT');
X3=sP5(:,1);
Y3=sP5(:,2);

sP6=load ('W_OSCIL.DAT');
T3=sP6(:,1);
W=sP6(:,2);

%Grafico de las señales
```

```
%Grafico Fase U
subplot(3,1,1),plot(T1,U),title ('Fase U')
hold on
subplot(3,1,1),plot(X1-0.008,Y1)
xlim([0 0.5])
ylim([0 60])
```

```
%Grafico Fase V
subplot(3,1,2),plot(T2,V),title ('Fase V')
hold on
subplot(3,1,2),plot(X2-0.008,Y2)
xlim([0 0.5])
ylim([0 60])
```

```
%Grafico Fase W
subplot(3,1,3),plot(T3,W),title ('Fase W')
hold on
subplot(3,1,3),plot(X3-0.008,Y3)
xlim([0 0.5])
ylim([0 60])
```

## Anexo C. Código MATLAB de comparación de resultados de Fase a Fase del motor BLDC

```
clear all;
clc;
%Señal Vuv
sP1=load ('UV_OSCIL.DAT');
X1=sP1(:,1);
Y1=sP1(:,2);

sP2=load ('S_UV.DAT');
T1=sP2(:,1);
U=sP2(:,2);

% %Señal Vvw
sP3=load ('VW_OSCIL.DAT');
X2=sP3(:,1);
Y2=sP3(:,2);

sP4=load ('S_VW.DAT');
T2=sP4(:,1);
V=sP4(:,2);

%Señal Vwu
sP5=load ('WU_OSCIL.DAT');
X3=sP5(:,1);
Y3=sP5(:,2);

sP6=load ('S_WU.DAT');
T3=sP6(:,1);
W=sP6(:,2);

%Grafico fase a fase UV
```

```
subplot(3,1,1),plot(X1-0.008,Y1),title ('Vuv=Vu-Vv')
hold on
subplot(3,1,1),plot(T1-0.001,U)
xlim([0 0.5])
ylim([-60 60])
```

```
% %Grafico fase a fase VW
```

```
subplot(3,1,2),plot(X2,Y2),title ('Vvw=Vv-Vw')
hold on
subplot(3,1,2),plot(T2-0.008,V)
xlim([0 0.5])
ylim([-60 60])
```

```
%Grafico fase a fase WU
```

```
subplot(3,1,3),plot(X3,Y3),title ('Vwu=Vw-Vu')
hold on
subplot(3,1,3),plot(T3-0.016,W)
xlim([0 0.5])
ylim([-60 60])
```

## Anexo D. Certificado de participación IDCS 2024



# CERTIFICATE OF PARTICIPATION

The IDSC Committee hereby gives this certificate to:  
**José Otilio Cortázar Torres y Jesús López Gómez**

“Sistema Electrónico de Control Usando Dispositivo FPGA para un Motor Trifásico tipo Brushless”

for its participation in the celebration of the  
International Day for Scientific Culture 2024.

Salvador Jara Guerrero  
President, Somedicyt

September 28th, 2024



## Anexo E. Constancia de participación del XX VIC UJAT 2024



UJAT  
UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO  
\*ESTUDIO EN LA BODA. ACCIÓN EN LA TI\*

SECRETARÍA  
DE INVESTIGACIÓN,  
POSGRADO Y  
VINCULACIÓN

DIRECCIÓN  
DE INVESTIGACIÓN

LEGADO  
UJAT

Otorga la presente

# CONSTANCIA

**A:** **JOSÉ OTILIO CORTAZAR TORRES**

Por haber participado en el XX Verano de la Investigación Científica UJAT, realizado del 21 de junio al 09 de agosto 2024 a través de la plataforma Microsoft Teams Aula Virtual de la UJAT.

ID DPDI-VIC-2024-0074

  
**Dra. Karina Pérez Hernández**  
Directora de Investigación SIPy UJAT

**XX Verano de la Investigación Científica UJAT**

30 de septiembre de 2024  
Villahermosa, Tabasco

**20 AÑOS de historias científicas UJAT**

Verano de la Investigación Científica UJAT 2024

Comercio de Universidades Mexicanas

## Anexo F. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de Tesis:</b>	Determinación de la frecuencia óptima y control PWM de un motor Brushless
<b>Autor de la Tesis:</b>	José Otilio Cortazar Torres
<b>ORCID:</b>	0009-0000-3325-1365
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>El uso de motores BLDC es en aplicaciones donde se requiere un control y un uso constante, por lo que, estos motores tienen la ventaja de presentar un mantenimiento mínimo, pueden proporcionar un alto torque, velocidades altas, y menor inercia por estas razones este tipo de motor ha ganado camino en la industria y en otras áreas. El objetivo principal en este trabajo de investigación fue presentar una técnica de caracterización por medio del control basado en conmutación trapezoidal (seis pasos). Para ello, se construye el circuito de potencia constituido por un circuito de protección, un circuito indicador y, por último, el circuito inversor encargado de la conmutación para el cual se realizan los cálculos pertinentes y se utiliza una configuración Darlington debido a que esta configuración puede proporcionar la corriente que el motor demanda. La simulación del circuito de potencia nos muestra un correcto funcionamiento en la conmutación al comparar las señales tomadas a la salida del circuito inversor trifásico de forma experimental y se visualiza con la simulación. De igual forma se comparan las señales medidas de fase a fase del motor BLDC. La caracterización se basa en encontrar una frecuencia óptima en función de un rango de voltaje con el propósito de que esta frecuencia se debe encontrar en una zona lineal en la cual se puede traducir a una alta eficiencia en el motor BLDC. Los resultados muestran que al graficar las variables encontradas respecto a las frecuencias fijadas presentan comportamientos distintos, el voltaje se presenta no lineal, y se destacan tres comportamientos de los cuales se encuentran las ecuaciones que describen su comportamiento. Para el caso de la velocidad del motor medida en RPM se ha encontrado un comportamiento</p>

	<p>lineal. El comportamiento y las características de funcionamiento encontrados son de manera particular del motor BLDC trifásico, esto en puesto en marcha al fijar diferentes frecuencias. Con los resultados encontrados, el motor BLDC proporciona diferentes niveles de velocidad y torque según la frecuencia encontrada y fijada, por lo que, el motor se puede adaptar y aplicar en diversas aplicaciones donde se requiere confiabilidad en el control y desempeño óptimo en el funcionamiento.</p>
<p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p>	<p>BLDC, Control PWM, EMF, Frecuencia óptima, Motor Brushless, PCV</p>
<p><b>Abstract</b></p>	<p>The use of BLDC motors is in applications where control and constant use is required, therefore, these motors have the advantage of having minimal maintenance, can provide high torque, high speeds, and lower inertia for these reasons this type of motor has gained ground in industry and other areas. The main objective in this research work was to present a characterization technique by means of control based on trapezoidal commutation (six steps). For this purpose, the power circuit is built, consisting of a protection circuit, an indicator circuit and, finally, the inverter circuit in charge of the commutation for which the relevant calculations are performed and a Darlington configuration is used because this configuration can provide the current demanded by the motor. The simulation of the power circuit shows a correct operation in the commutation by comparing the signals taken at the output of the three-phase inverter circuit experimentally and visualized with the simulation. In the same way, the signals measured from phase to phase of the BLDC motor are compared. The characterization is based on finding an optimum frequency in function of a voltage range with the purpose that this frequency must be found in a linear zone in which it can be translated to a high efficiency in the BLDC motor. The results show that when plotting the variables found with respect to the fixed frequencies they present different behaviors, the voltage presents a non-linear behavior and three behaviors or zones stand out, of which the equations that describe their behavior are found. For the case of the motor speed measured in RPM, a linear behavior has been found. The behavior and operating characteristics found are particular to the three-phase BLDC motor, that is, when set in motion at different frequencies. With the results found, the BLDC motor provides different levels of speed and torque according to the frequency found and set, so the motor can</p>

	be adapted and applied in various applications where reliability in control and optimum performance in operation is required.
<b>Keywords</b>	BLDC, Control PWM, EMF, Optimal frequency, Motor Brushless, PCV.
<b>Referencias citadas:</b>	<p>Ali, H. J., Shary, D. K., &amp; Abbood, H. D. (2024). A Review of Intelligent Techniques Based Speed Control of Brushless DC Motor (BLDC). 24(1).</p> <p>AN885, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. (2003).</p> <p>Azizah, N. S., &amp; Saputro, J. S. (2023). Development of Control and Monitoring of BLDC Motor Speed without Sensor with Back Emf Detection.</p> <p>Chowdhury, D., Chattopadhyay, M., &amp; Roy, P. (2013). Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor. <i>Procedia Technology</i>, 10, 279-286. <a href="https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.362">https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.362</a></p> <p>Dong, L., Huang, Y., Jatskevich, J., &amp; Liu, J. (2016). Improved Fault-Tolerant Control for Brushless Permanent Magnet Motor Drives With Defective Hall Sensors. <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i>, 31(2), 789-799. <a href="https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2526621">https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2526621</a></p> <p>Ertl, D., &amp; Weber, L. (2020). A Method for Real-Time Sensorless Speed Control of Brushed DC Motors in Cost Constrained Systems. <i>2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)</i>, 152-157. <a href="https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9248712">https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9248712</a></p> <p>González-Arriaga, D. M., Vargas-Treviño, M. A. D., Vergara-Limon, S., De León, C. L. C.-D., López-Gómez, J., Vargas-Treviño, M., &amp; Guerrero-García, J. (2023). Design of a Software Platform to Generate Convolutional Neural Networks for the Parametric Identification of a Cartesian Robot. <i>IEEE Access</i>, 11, 63371-63387. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289078">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289078</a></p> <p>Kim, T.-H., &amp; Ehsani, M. (2004). Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds. <i>IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS</i>, 19(6).</p>

<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.2; transform: rotate(-45deg);">Universidad Mariano Fajardo</p>	<p>Kolano, K. (2019). Improved Sensor Control Method for BLDC Motors. IEEE Access, 7, 186158-186166. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960580">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960580</a></p>
	<p>López Arias, Castañeda González, R., Jonny. (2023). DISEÑO Y MODELADO DE SIMULACIÓN 3D DE UN PROTOTIPO ESTRUCTURAL PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR BRUSHLESS.</p>
	<p>Lopez-Gomez, J., Vargas-Trevino, M. A. D., Vergara-Limon, S., Vargas-Trevino, M., Gutierrez-Gutierrez, J., Palomino-Merino, A. D., Martinez-Solis, F., &amp; Felix-Beltran, O. G. (2020). Influence of PWM Torque Control Frequency in DC Motors by Means of an Optimum Design Method. IEEE Access, 8, 80691-80706. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990158">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990158</a></p>
	<p>Mitzi Mendoza, J. J. (2020, octubre). DISEÑO PRELIMINAR DE UN MOTOR TRIFÁSICO TIPO BRUSHLESS.</p>
	<p>Mohanraj, D., ArulDavid, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Barnawi, A. B., Chokkalingam, B., &amp; Mihet-Popa, L. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. IEEE Access, 10, 54833-54869. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011</a></p>
	<p>S. Selva Pradeep, S., &amp; Marsaline Beno, M. (2022). Hybrid Sensorless Speed Control Technique for BLDC Motor Using ANFIS Automation. Intelligent Automation &amp; Soft Computing, 33(3), 1757-1770. <a href="https://doi.org/10.32604/iasc.2022.023470">https://doi.org/10.32604/iasc.2022.023470</a></p>
	<p>Saritas, I., &amp; Buyukyildiz, C. (2020). Sensorless Brushless DC Motor Control Using Type-2 Fuzzy Logic. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 8(4), 184-190. <a href="https://doi.org/10.18201/ijisae.2020466311">https://doi.org/10.18201/ijisae.2020466311</a></p>
<p>Seminario Gastelo, J. M. (2021, diciembre). Diseño de controlador de velocidad de motor brushless DC mediante la fuerza contraelectromotriz.</p>	
<p>Sierra, S. A. R. (s. f.). Título: CONTROL HÍBRIDO DE MOTORES DC SIN ESCOBILLAS USANDO.</p>	

	<p>Sikora, A., Zielonka, A., &amp; Woźniak, M. (2022). Minimization of Energy Losses in the BLDC Motor for Improved Control and Power Supply of the System under Static Load. <i>Sensors</i>, 22(3), 1058. <a href="https://doi.org/10.3390/s22031058">https://doi.org/10.3390/s22031058</a></p> <p>Solomon, D., Greco, A., Masselli, C., Gundabattini, E., Rassiah, R., &amp; Kuppan, R. (2020). A Review on Methods to Reduce Weight and to Increase Efficiency of Electric Motors Using Lightweight Materials, Novel Manufacturing Processes, Magnetic Materials and Cooling Methods. <i>Annales de Chimie - Science Des Matériaux</i>, 44(1), 1-14. <a href="https://doi.org/10.18280/acsm.440101">https://doi.org/10.18280/acsm.440101</a></p> <p>Tacuri, J., &amp; Eduardo, J. (s. f.). Caracterización del funcionamiento de un motor eléctrico de corriente continúa sin escobillas Brushless con 1000 watts de potencia.</p> <p>Villarejo Mañas, J. A. (2017, septiembre). Modelado y Simulación del Funcionamiento y Control de un Motor BLDC.</p> <p>Xia, C. (2012). Permanent magnet brushless DC motor drives and controls [Electronic resource]. Wiley-Science Press.</p>
--	---

## Referencias

- Ali, H. J., Shary, D. K., & Abbood, H. D. (2024). *A Review of Intelligent Techniques Based Speed Control of Brushless DC Motor (BLDC)*. 24(1).
- AN885, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. (2003).
- Azizah, N. S., & Saputro, J. S. (2023). *Development of Control and Monitoring of BLDC Motor Speed without Sensor with Back Emf Detection*.
- Chowdhury, D., Chattopadhyay, M., & Roy, P. (2013). Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor. *Procedia Technology*, 10, 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.362>
- Dong, L., Huang, Y., Jatskevich, J., & Liu, J. (2016). Improved Fault-Tolerant Control for Brushless Permanent Magnet Motor Drives With Defective Hall Sensors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2), 789-799. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2526621>
- Ertl, D., & Weber, L. (2020). A Method for Real-Time Sensorless Speed Control of Brushed DC Motors in Cost Constrained Systems. *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 152-157. <https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9248712>
- González-Arriaga, D. M., Vargas-Treviño, M. A. D., Vergara-Limon, S., De León, C. L. C.-D., López-Gómez, J., Vargas-Treviño, M., & Guerrero-García, J. (2023). Design of a Software Platform to Generate Convolutional Neural Networks for the

- Parametric Identification of a Cartesian Robot. *IEEE Access*, 11, 63371-63387.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289078>
- Kim, T.-H., & Ehsani, M. (2004). Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 19(6).
- Kolano, K. (2019). Improved Sensor Control Method for BLDC Motors. *IEEE Access*, 7, 186158-186166. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960580>
- López Arias, Castañeda González, R., Jonny. (2023). *DISEÑO Y MODELADO DE SIMULACIÓN 3D DE UN PROTOTIPO ESTRUCTURAL PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR BRUSHLESS.*
- Lopez-Gomez, J., Vargas-Trevino, M. A. D., Vergara-Limon, S., Vargas-Trevino, M., Gutierrez-Gutierrez, J., Palomino-Merino, A. D., Martinez-Solis, F., & Felix-Beltran, O. G. (2020). Influence of PWM Torque Control Frequency in DC Motors by Means of an Optimum Design Method. *IEEE Access*, 8, 80691-80706.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990158>
- Mitzi Mendoza, J. J. (2020, octubre). *DISEÑO PRELIMINAR DE UN MOTOR TRIFÁSICO TIPO BRUSHLESS.*
- Mohanraj, D., Arul David, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Barnawi, A. B., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 10, 54833-54869.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>

- S. Selva Pradeep, S., & Marsaline Beno, M. (2022). Hybrid Sensorless Speed Control Technique for BLDC Motor Using ANFIS Automation. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 33(3), 1757-1770. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.023470>
- Saritas, I., & Buyukyildiz, C. (2020). Sensorless Brushless DC Motor Control Using Type-2 Fuzzy Logic. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 8(4), 184-190. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2020466311>
- Seminario Gastelo, J. M. (2021, diciembre). *Diseño de controlador de velocidad de motor brushless DC mediante la fuerza contraelectromotriz.*
- Sierra, S. A. R. (s. f.). *Título: CONTROL HÍBRIDO DE MOTORES DC SIN ESCOBILLAS USANDO.*
- Sikora, A., Zielonka, A., & Woźniak, M. (2022). Minimization of Energy Losses in the BLDC Motor for Improved Control and Power Supply of the System under Static Load. *Sensors*, 22(3), 1058. <https://doi.org/10.3390/s22031058>
- Solomon, D., Greco, A., Masselli, C., Gundabattini, E., Rassiah, R., & Kuppan, R. (2020). A Review on Methods to Reduce Weight and to Increase Efficiency of Electric Motors Using Lightweight Materials, Novel Manufacturing Processes, Magnetic Materials and Cooling Methods. *Annales de Chimie - Science Des Matériaux*, 44(1), 1-14. <https://doi.org/10.18280/acsm.440101>
- Tacuri, J., & Eduardo, J. (s. f.). *Caracterización del funcionamiento de un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas Brushless con 1000 watts de potencia.*
- Villarejo Mañas, J. A. (2017, septiembre). *Modelado y Simulación del Funcionamiento y Control de un Motor BLDC.*

Xia, C. (2012). *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls* [Electronic resource]. Wiley-Science Press.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.