



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de una tarjeta prototipo para un
motor Brushless Outrunner basado en la
medición de su contra-FEM**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico - Electrónico

PRESENTA

Juan Carlos Rivera Pastelín

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. José Castillo Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

Presidente: Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales

Secretario: M. en I. Sergio Quintana Thierry

Vocal: M. en I. José Castillo Hernández

1^{er} suplente: M. en I. Benjamín Valera Orozco

2^{do} suplente: M. en I. Juan Ricardo Damián Zamacona

Ciudad Universitaria, Laboratorio de Electrónica.

Ciudad de México

Asesor de tesis

M. en I. José Castillo Hernández

Agradecimientos

Principalmente a mi asesor el maestro José Castillo Hernández, que me ha mostrado uno de los campos más interesantes dentro del mundo de la electrónica, también por haberme brindado las herramientas para llevar a cabo este proyecto.

Particularmente al grupo de electrónica del ICAT que lo conforman los profesores: Miguel Ángel Bañuelos Saucedo, Juan Ricardo Damián Zamacona, Sergio Quintana Thierry, a Salvador Rodríguez Lozano por la ayuda en la fabricación de los circuitos impresos que se utilizaron en este trabajo, al intrépido Alex por todos los consejos y recomendaciones.

A «Pie de Cannabis (Rulo, Lalón, Rodo y Ray)» una banda de rock que me acompañó algunos fines de semana durante la universidad, gracias por todo lo compartido.

Al equipo Tripie que me adoptaron en un par de clases y se volvieron mis mejores amigos en la universidad: César, Gabo, Omar y Arantxa.

Resumen

En este trabajo se expone un método alternativo para la detección del rotor de un motor de corriente directa sin escobillas, en el cual se muestran de manera modular en dos tarjetas de diseño electrónico para llevar a cabo el método de detección y la parte del controlador para proporcionar la secuencia de giro apropiada para el motor, tomando en cuenta las ventajas que éste representa con respecto al método de detección proporcionado de sensores de efecto Hall. Tomando en cuenta las comparaciones de las formas de onda que nos permiten identificar la posición del rotor. Así mismo se detallan características básicas de los desarrollos y métodos empleados con fin de obtener un contexto adecuado de la estructura de este proyecto.

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Nomenclatura	VIII
1. Introducción	2
1.1. Motivación	2
1.2. Entorno actual	3
1.3. Descripción del problema	4
1.4. Relevancia y limitaciones	4
1.5. Método	5
1.6. Objetivo y resultados esperados	6
1.7. Estructura de la tesis	6
2. Antecedentes	8
2.1. Introducción	8
2.2. Máquinas eléctricas	8
2.3. Clasificación de motores	9
2.4. ¿Qué es un motor BLDC?	10
2.5. Tipos de motores BLDC	11
2.6. Estructura del motor BLDC Outrunner	13
2.7. Dispositivos de conmutación	18

2.8. Inversor	20
2.9. Sensores de posición	21
2.10. Secuencia de conmutación	22
2.11. Fuerza contra-electromotriz	24
2.12. Características del microcontrolador PIC18F4431	25
2.13. Señal de PWM	28
3. Desarrollo	29
3.1. Introducción	29
3.2. Características básicas del motor MTO6365-220HA	30
3.3. Inversor o puente trifásico completo	31
3.4. Circuito para detectar BEFM	36
3.5. Formas de onda	39
4. Conclusiones	44
A. Anexos	46
A.1. Placa de circuito impreso de detección de BEMF	46
A.2. Placa de circuito impreso del driver para motor BLDC	47
A.3. Circuito esquemático de BEMF	48
A.4. Código en lenguaje C	49

Índice de figuras

1.1. Diagrama de bloques del proyecto propuesto	5
2.1. Conversión electromecánica	9
2.2. Clasificación de motores eléctricos	10
2.3. Diferencia entre los estatores y rotores de un motor Inrunner y Outrunner	12
2.4. Motores BLDC Inrunner y Outrunner	12
2.5. Diferencia entre Inrunner y Slotless	13
2.6. Diagrama de circuito equivalente de un motor BLDC	14
2.7. Estructura de un motor BLDC Outrunner	16
2.8. a) Formas de onda de un BLDC, b) Formas de onda de un PMSM.	17
2.9. a) Diodo, b) BJT e IGBT, c) MOSFET, d) SCR.	19
2.10. Inversor trifásico	20
2.11. Seis segmentos que indican la posición y el valor de los senso- res de efecto Hall.	21
2.12. Flujo de corriente a través de la secuencia de los 6 pasos. . . .	23
2.13. Formas de onda de los sensores de efecto Hall, Contra FEM, corriente por fase y la secuencia de conmutación.	25
3.1. Esquema general del controlador	29
3.2. Motor BLDC Outrunner MTO6365HA-220.	30
3.3. Circuito trifásico de puente completo	35
3.4. Circuito de detección de cruce por cero para la detección de la posición utilizando las BEMF de cada fase del motor.	36

3.5. Señal PWM con la cual conmutan los transistores.	39
3.6. Señales de BEMF de sus respectivas fases a, b, y c sin acondi- cionar.	40
3.7. Señales de efecto Hall para las fases a, b, y c.	40
3.8. Señales de BEMF de sus respectivas fases a, b, y c acondicio- nadas.	41
3.9. Señales de la fase C: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente. .	41
3.10. Señales de la fase b: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente. .	42
3.11. Señales de la fase c: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente. .	42
3.12. Tarjeta prototipo en funcionamiento	43
A.1. Pistas del circuito impreso para detectar la BEMF	46
A.2. Pistas del circuito impreso del inversor	47
A.3. Circuito esquemático del detección de BEMF con el microcon- trolador PIC18F4431.	48

Índice de tablas

2.1. Secuencia para energizar el motor BLDC	23
3.1. Características de fabricante	30

Nomenclatura

AC	Corriente alterna
ADC	Convertidor analógico-digital
ACIM	Motor de inducción trifásico (asíncrono)
BEMF	Fuerza contra electromotriz o contra FEM
BJT	Transistor bipolar de unión o bipolar de juntura
BLDC	Motor de corriente directa sin escobillas
C_B	Capacitor de Bootstrap
D_{cycle}	Ciclo de trabajo
DC	Corriente continua
Drives	Dispositivo para el control de transistores
EMF o FEM	Fuerza electromotriz
ESR	Resistencia equivalente en serie
Gate	Compuerta o puerta de control
GTO	Tiristor con compuerta de apagado
IGBT	Transistor bipolar de compuerta aislada.
MCT	Tiristores óxido metálico controlados .
MOSFET	Transistor de óxido metálico de efecto de campo
MFMM	Módulo de movimiento o detección de posición retroalimentado
PMSM	Motor síncrono de imanes permanentes trifásico
PWM	Modulación por ancho de pulso
PCPWMM	Módulo de control de potencia de PWM
RPM	Revolución por minuto
SCR	Rectificador de silicio controlado

Slotless	Motor sin ranuras o dientes en el estátor
Stepper Motor	Motor a pasos
V_B	Voltaje de bootstrap
V_{pwr}	Voltaje de polarización de la fuente
Wound Field Motor	Motor de devanado inducido

*A mi madre, que siempre denotó un particular
interés en la formación educativa como herramienta
fundamental para el progreso.*

A mi hermano, sin él, esto no hubiese sido posible.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Actualmente el uso de motores eléctricos en el sector automotriz ha aumentado y con gran aceptación para sustituir a los motores de combustión interna. Esto se debe a diferentes causas, principalmente por el costo de fabricación y el impacto ecológico que estos representan.

Los motores eléctricos más frecuentes en la industria automotriz son motores de inducción y los motores de imanes permanentes. Aunado a esto se encuentran los motores sin escobillas de corriente directa, BLDC (Brushless Direct Current). Los motores BLDC han sido utilizados en diferentes industrias como la aeroespacial, médica, electrodomésticos, automatización e instrumentación. También son muy populares en aplicaciones de aeromodelismo, drones y patines eléctricos.

Un aliciente para este trabajo se basa en los siguientes puntos:

Diseño electrónico: En el laboratorio de electrónica del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), se lleva a cabo una de las líneas de desarrollo en la parte electrónica de la tracción de prototipos de autos eléctricos. Este proyecto conjunta diferentes áreas de la ingeniería eléctrica electrónica como son la electrónica analógica, instrumentación, programación de microcontroladores y electrónica de potencia.

Apoyo a un grupo de estudiantes: El equipo Miztli es un grupo conformado principalmente por estudiantes y asesorado por profesores del Centro de Investigaciones de Diseño Industrial. El ICAT apoyó a este equipo en los años 2018 y 2019 para la competencia Shell Eco Marathon Americas que se llevó a cabo en Sonoma, California. El equipo Miztli participó con el prototipo de auto eléctrico Mako en 2018 y con el prototipo Malaka en 2019, representando a nuestra Universidad y compitiendo con diferentes instituciones del continente americano.

1.2. Entorno actual

Los motores BLDC son atractivos por sus distintas aplicaciones, tanto para los investigadores en la academia y para centros de investigación y desarrollo del sector privado. Esto se debe por algunas de sus características que resaltan en [12]:

- Alta eficiencia (torque contra rapidez).
- Operación silenciosa (debido la frecuencia de conmutación).
- Tamaño compacto (comparado con los motores de inducción).
- Alta confiabilidad en operación.
- Bajos requerimientos de mantenimiento.

El equipo Miztli ha participado en la competencia en los años 2016 y 2017. En las cuales el equipo utilizó un motor de corriente directa de 48 volts, con una potencia de 1000 watts y una velocidad angular nominal de 3000 RPM. Considerando las ventajas mencionadas y los diseños de los autos de los otros equipos que calificaron dentro de los 20 primeros lugares, se propuso un diseño y una implementación por parte del laboratorio de Electrónica de un controlador para un motor Brushless Outrunner.

1.3. Descripción del problema

Generalmente a los motores BLDC se le suministra la energía a través de un inversor, basado en un puente trifásico, en donde los transistores son activados a través de un microcontrolador o procesador de señales digitales. Esta activación es controlada a partir de la detección de la posición angular del rotor, que se obtiene a través de sensores de posición magnéticos, mecánicos u ópticos. Algunos de estos sensores son sensibles a cambios de temperatura, otros tienen imperfecciones por fabricación o montaje y las lecturas obtenidas a través de ellos no son fidedignas o están distorsionadas [8].

1.4. Relevancia y limitaciones

Lo destacado de este trabajo es proporcionar una alternativa en la detección de la posición del rotor y comparar los beneficios que se tiene con respecto a técnicas ya utilizadas comúnmente. Haciendo hincapié en la futura integración en prototipos de autos eléctricos que se desarrollen dentro del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología. El trabajo con el motor propuesto está íntimamente ligado con el campo de la electrónica de potencia, en el diseño de inversores, el control de los inversores con microcontroladores, con electrónica analógica para el método de detección de la posición del rotor y éste último método relacionado con técnicas de detección sin sensores.

1.5. Método

Como se puede observar en la figura 1.1, el diagrama de bloques que nos permite visualizar el trabajo segmentado en 3 principales bloques.

El convertidor de DC/AC, la carga en cuestión y la unidad de control que realiza las instrucciones requeridas para el funcionamiento del sistema.

La descripción del diagrama es el siguiente:

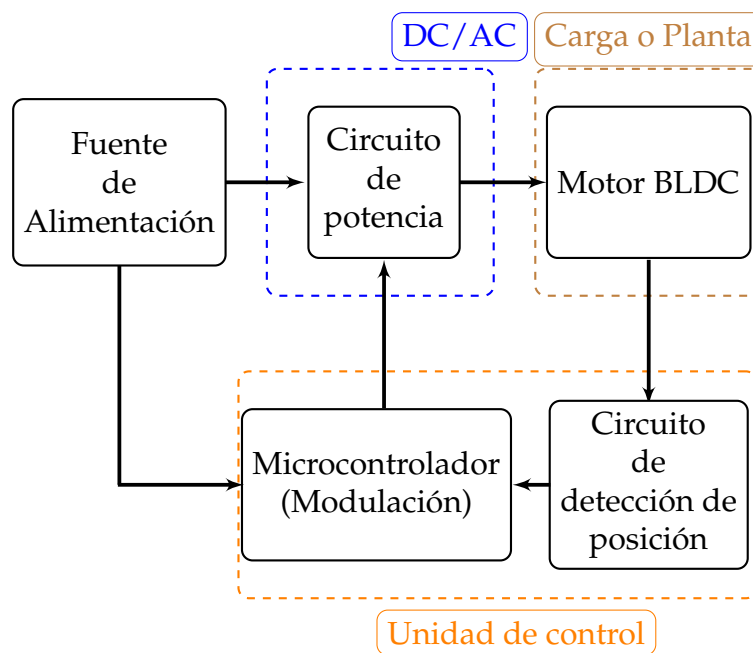


FIGURA 1.1: Diagrama de bloques del proyecto propuesto

- La fuente de alimentación será una fuente de poder o una batería que polarice los componentes dentro del sistema.
- El circuito de potencia es un puente trifásico con dispositivos IGBT.
- El motor BLDC es la carga o planta del sistema propuesto.
- El circuito de detección de posición utiliza técnicas para la detección de la fuerza contra-electromotriz y los sensores de efecto Hall para detectar cuando esta no exista.
- El microcontrolador es la parte esencial para dar las instrucciones a partir de las lecturas de la posición junto con el valor del convertidor

analógico-digital para energizar y activar los transistores adecuados para los devanados del motor.

1.6. Objetivo y resultados esperados

- Comparar y probar un método de detección de la posición del rotor de un motor BLDC.
- Implementación de la electrónica necesaria para llevar a cabo el método de detección.

La implementación del sistema de detección nos brinda confiabilidad al detectar la posición del rotor y ejecutar la secuencia de giro respectiva para cada transición del rotor, esto reduce los picos de corriente del motor, así entonces disminuir el consumo de energía en condiciones de operación de éste.

1.7. Estructura de la tesis

En el capítulo 2 se introducen los antecedentes, como son la clasificación de motores, el motor BLDC y sus diferentes tipos que existen en el mercado y su estructura. Los distintos dispositivos de conmutación, introducción a los convertidores de corriente continua a corriente alterna como son los inversores. También se abordan los sensores de posición; particularmente los sensores de efecto Hall, estos están asociados con la conmutación del motor. Se describe el concepto de fuerza contra-electromotriz y sus características. Posteriormente se exponen algunos atributos del microcontrolador PIC18F4431, por último, se muestran algunas propiedades de la señal PWM que se utiliza en el sistema.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo del proyecto, donde se detallan algunos de los aspectos esenciales del motor MTO6365HA-220, el inversor implementado y el circuito de detección BEMF, especificando algunos de sus componentes. En este mismo capítulo también se muestran las formas de onda de las señales de interés junto con el sistema en funcionamiento.

Finalmente, se encuentra el 4, en el cual se presentan las conclusiones y las consideraciones en las mejoras a futuro de este proyecto.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Introducción

En este capítulo se expone los conocimientos previos para entender la estructura del motor BLDC y sus principales características, así como los dispositivos relacionados con su funcionamiento.

2.2. Máquinas eléctricas

En el proceso de conversión de energía en los sistemas electromecánicos, se pueden encontrar diversos dispositivos que operan con principios similares. Sus nombres o características dependen de las funciones que desempeñan, por ejemplo, en el campo de la instrumentación y control son frecuentemente denominados transductores. Los relacionados con producir alguna fuerza, a menudo vinculados con actuadores son los solenoides, relevadores y electroimanes. Finalmente, como se observa en la figura 2.1, podemos ubicar a los que transforman energía mecánica y eléctrica que son los generadores y los motores, a los cuales denominamos máquinas eléctricas.

2.3. Clasificación de motores

Una máquina eléctrica es capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Si la conversión es de energía mecánica hacia energía eléctrica se denomina generador, si la conversión es de energía eléctrica a energía mecánica se denomina motor [11].

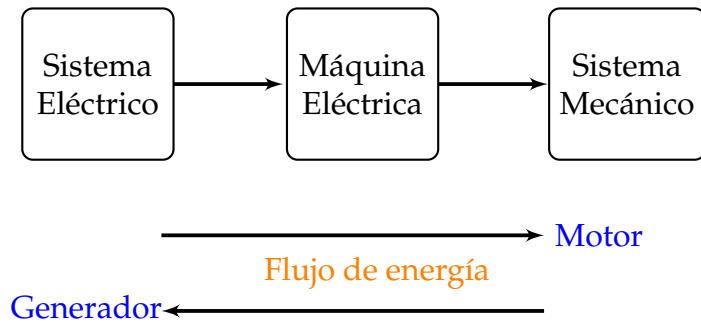


FIGURA 2.1: Conversión electromecánica

2.3. Clasificación de motores

En la literatura académica e industrial se pueden encontrar un sin fin de propuestas para clasificación de motores, ésta puede ser tan extensa como se desee, considerando aspectos prácticos para este trabajo se tomará una recopilación breve como se muestra en la figura 2.2, se propone al lector si desea profundizar sobre el tema considerar las siguientes referencias [1], [5] y [11].

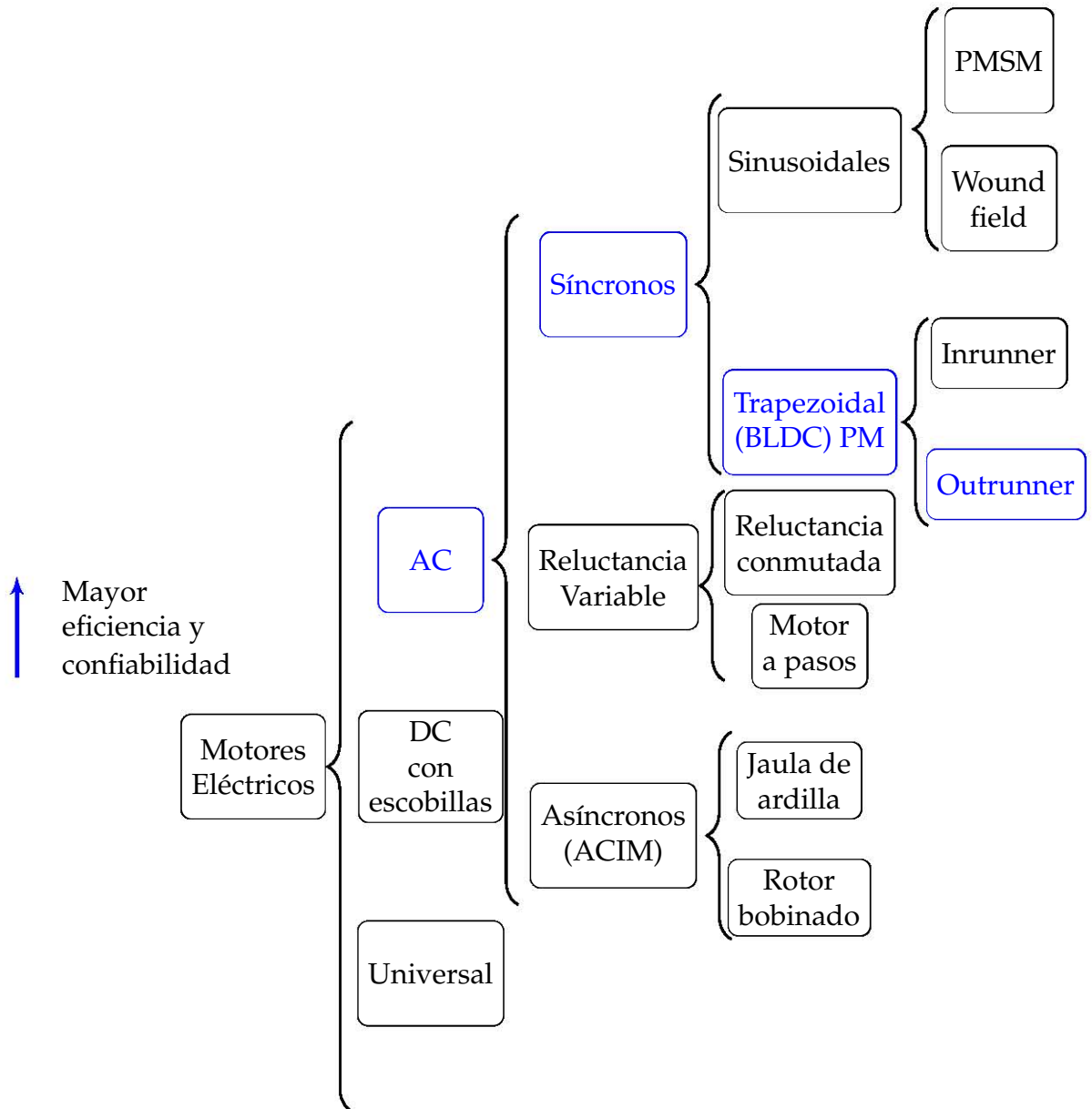


FIGURA 2.2: Clasificación de motores eléctricos

2.4. ¿Qué es un motor BLDC?

Una definición formal o estándar establecida por instituciones representativas en el ramo de la ingeniería como son ANSI/IEEE Standard 100-1984 lo define como «Brushless Rotary Machinery» que puede interpretarse como: Máquina rotatoria sin escobillas.

2.5. Tipos de motores BLDC

Sin embargo, con la referencia de NEMA Standard MG7-1987, un motor BLDC está definido como: Una máquina rotatoria síncrona controlada por conmutación electrónica, donde el rotor está conformado por imanes permanentes con sensores de posición en el rotor.

Como su nombre lo indica, no cuenta con escobillas en el rotor para la conmutación necesaria para su secuencia de giro. Tiene una conmutación electrónica, a diferencia de los motores con escobillas que cuentan con conmutadores en la flecha de la máquina.

2.5. Tipos de motores BLDC

Básicamente podemos encontrar tres tipos de motores sin escobillas en el mercado:

Inrunner: Este tipo tiene la característica que los imanes permanentes están colocados al interior de los devanados del estátor.

Outrunner: A diferencia de los motores Inrunner, este tipo tiene la particularidad de tener los imanes permanentes al exterior de los devanados del estátor, los embobinados se encuentran en el núcleo del motor.

Tipo de disco: Los motores de este tipo también son conocidos como «Slotless» (sin ranuras de los laminados que interactúan con los devanados del estátor), esto se refiere a la analogía con los «dientes» que se ven en el estátor. Los laminados de acero del estátor están contruidos con anillos de acero y están apilados conjuntamente, los devanados están encapsulados con resina epoxica. Las ventajas producidas en los procesos de su fabricación no muestran fenómenos como el rizo en el torque, que son pérdidas producidas por la interacción de los devanados del estátor con los del rotor, se disminuyen las vibraciones en el motor.

Se debe tomar en cuenta la aplicación específica para determinar las cualidades necesarias para obtener el mejor rendimiento del motor, se puede añadir una clasificación particular, que son los que incluyen sensores y los que no cuentan con los mismos.

Motores BLDC

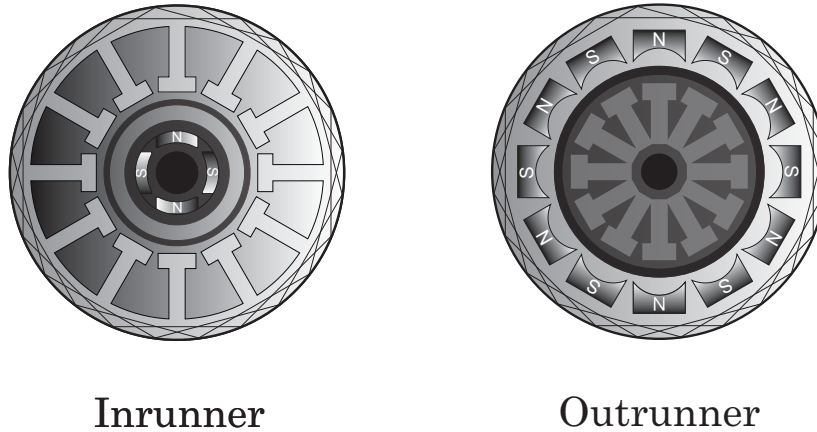


FIGURA 2.3: Diferencia entre los estatores y rotores de un motor Inrunner y Outrunner

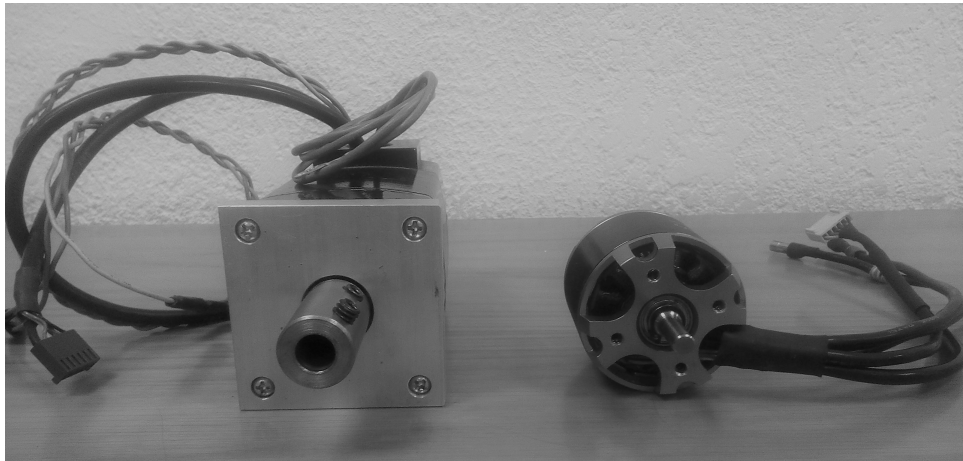


FIGURA 2.4: Motores BLDC Inrunner y Outrunner

Podemos encontrar diferencias como tamaños y estructura en la construcción entre los motores Inrunner y los motores Outrunner, como lo muestran las figuras 2.3 y 2.4. También se puede identificar la diferencia en la construcción de un motor «slotless» o sin ranuras con un motor Inrunner en la figura 2.5.

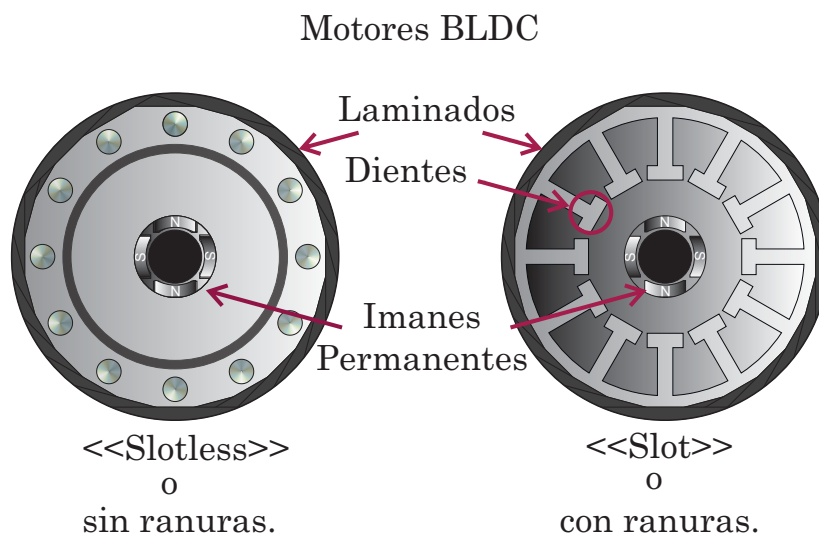


FIGURA 2.5: Diferencia entre Inrunner y Slotless

2.6. Estructura del motor BLDC Outrunner

Apoyándonos de la figura 2.2, nos permite deducir que el motor BLDC es una máquina eléctrica, de AC y tiene una estructura de fabricación muy similar a las máquinas de imanes permanentes. El BLDC es un motor síncrono, esto significa que el campo magnético generado por el estátor y el campo magnético generado por el rotor giran a la misma frecuencia. La estructura del estátor de un motor sin escobillas es muy parecida a la de un motor síncrono o a un motor de inducción, consiste en un conjunto de barras laminadas de acero colocadas en las ranuras que cortan axialmente a lo largo de la periferia interna [1].

El rotor está constituido por imanes permanentes con un par de polos definidos y embebidos en la superficie o en el interior del núcleo de hierro. Actualmente los imanes permanentes usualmente están hechos con base en materiales magnéticos denominados tierras raras como el NdFeB (imán de neodimio) como podemos apreciar en la figura 2.7.

La mayoría de los motores BLDC tienen 3 devanados conectados en la configuración de estrella como se muestra en la figura 2.6, cada uno de estos devanados están contruidos por bobinas interconectadas que están desfasados 120° .

Utilizando el modelo propuesto por [8] del motor BLDC puede ser descrito por las siguientes ecuaciones:

$$v_A = R_s i_A + L_s \frac{di_A}{dt} + e_{A_{BEFM}} \quad (2.1)$$

$$v_B = R_s i_B + L_s \frac{di_B}{dt} + e_{B_{BEFM}} \quad (2.2)$$

$$v_C = R_s i_C + L_s \frac{di_C}{dt} + e_{C_{BEFM}} \quad (2.3)$$

Para simplificar nomenclatura se utilizará e_{fase} para describir la BEMF por fase.

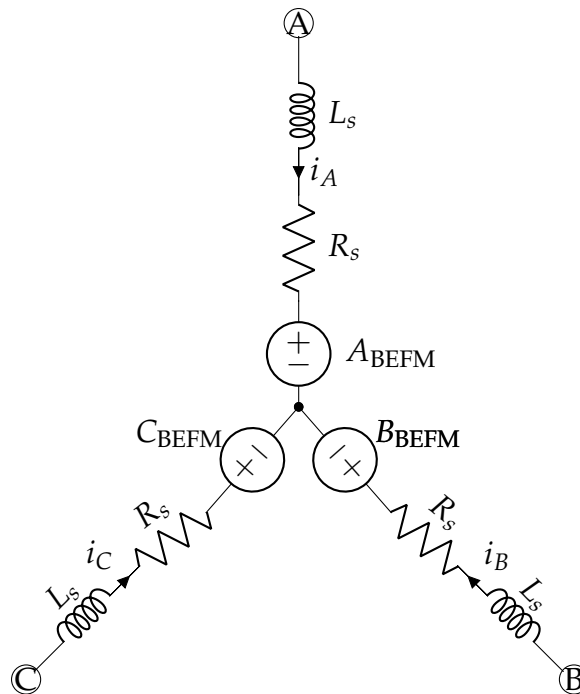


FIGURA 2.6: Diagrama de circuito equivalente de un motor BLDC

2.6. Estructura del motor BLDC Outrunner

Donde

v_A, v_B, v_C Voltajes de fase en el estátor.

i_A, i_B, i_C Corrientes de fase.

e_A, e_B, e_C BEMF por fase.

L_s Inductancia en los devanados del estátor.

R_s Resistencia en los devanados del estátor.

La BEMF es proporcional a la rapidez del rotor y también está en función del ángulo del rotor $e(\theta)$ que se pueden describir de forma periódica

$$e_A = \lambda \omega e'_a = \lambda \omega e(\theta) \quad (2.4)$$

$$e_B = \lambda \omega e'_b = \lambda \omega e\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

$$e_C = \lambda \omega e'_c = \lambda \omega e\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

Donde

λ Flujo inducido dentro del estátor a través de los imanes permanentes del rotor.

θ Ángulo del rotor.

En la figura 2.7¹ nos muestra los componentes de la estructura de un motor BLDC outrunner comercial:

1 Frente de aluminio maquinado con ranuras.

2 Acoplamiento para propela.

3 Agujeros para montar el motor.

¹Imagen extraída de https://www.scorpionsystem.com/info/brushless_outrunner_motors/

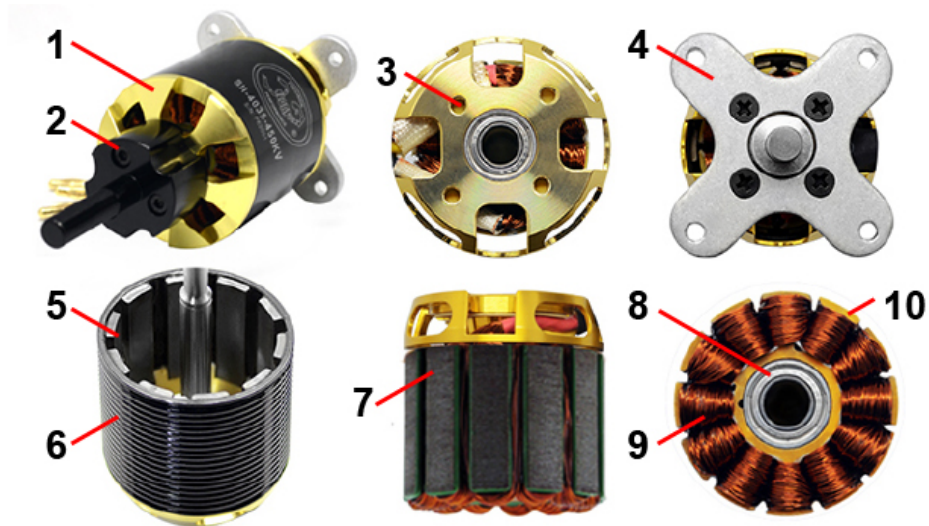


FIGURA 2.7: Estructura de un motor BLDC Outrunner

- 4 Base para sujetar el motor.
- 5 Imanes permanentes del motor.
- 6 El casco del rotor con imanes permanentes.
- 7 Imanes permanentes del estátor.
- 8 Rodamientos para colocar la flecha.
- 9 Devanados del estátor.
- 10 Dientes de los imanes permanentes del estátor.

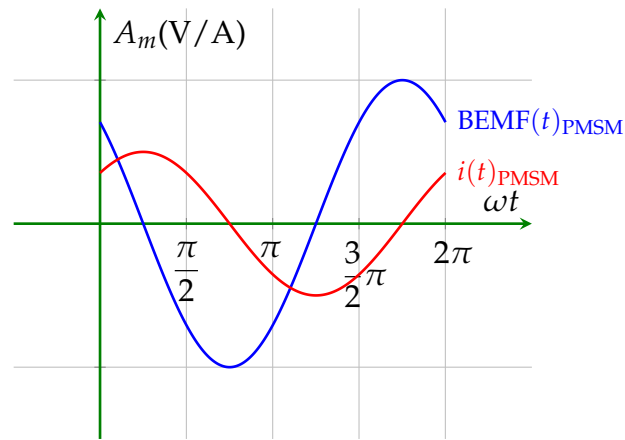
Se pueden encontrar dos variantes en los embobinados del estatores:

Trapezoidal: Mayormente encontrada en motores BLDC, ya sean Inrunner, Outrunner o tipo de disco.

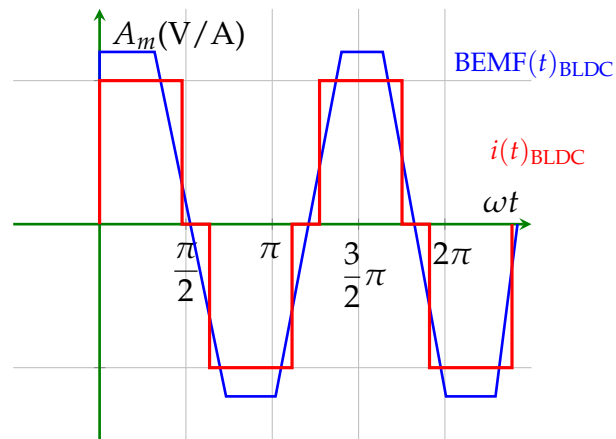
Sinusoidal: Es muy común en las PMSM tener una BEFM, dado que son excitados con una señal sinusoidal y la corriente tiene una forma similar.

2.6. Estructura del motor BLDC Outrunner

Las diferencias de sus formas de onda se muestran en la figura 2.8



(a) Formas de corriente y BEMF de un PMSM



(b) Forma de onda de corriente y de BEMF de un motor BLDC

FIGURA 2.8: a) Formas de onda de un BLDC, b) Formas de onda de un PMSM.

2.7. Dispositivos de conmutación

Los dispositivos de conmutación o interruptores electrónicos están caracterizados por tener dos estados, «encendido» y «apagado». En algunos casos su comportamiento se aproxima a interruptores ideales, en los cuales, cuando se encuentran encendidos sus voltajes son cercanos a cero y cuando están apagados la corriente es cero. Los dispositivos reales presentan disipaciones o pérdidas de energía cuando están encendidos, así mismo durante las transiciones de encendido a apagado y viceversa. Los dispositivos semiconductores utilizados como interruptores se pueden clasificar por cuadrantes, por región de conducción y finalmente en activos y pasivos.

Los interruptores electrónicos se pueden clasificar como no controlados o pasivos, semicontrolados y controlados o activos, un ejemplo de clasificación por conducción se observa en la figura 2.8.

Los interruptores pasivos no tienen terminal de control, caso particular de los diodos, cabe mencionar que el estado de los diodos depende de las formas de onda de voltaje y corriente aplicados, por lo cual son no controlados.

El SCR (Silicon Controlled Rectifier) es un caso especial, cuando está encendido está en la categoría de activo y cuando se encuentra apagado es pasivo., este es un ejemplo de un interruptor semicontrolado.

Los transistores se denominan activos debido a que cuentan con una terminal de control, ya sea ésta la base de un BJT (Bipolar Junction Transistor) o el gate de un transistor de efecto de campo FET o MOSFET, (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), GTO (Gate Turn-Off Thyristors), MCT (MOS-Controlled Thyristors) y particularmente IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistors) son interruptores controlados.

La conducción del BJT y el IGBT está limitada en una sola dirección o un sólo cuadrante, con diferentes arreglos con un diodo de protección puede ser en

2.7. Dispositivos de conmutación

dos cuadrantes. En el caso de los MOSFETs, puede conducir de manera inversa, aunque comúnmente también sólo se utiliza en el mismo cuadrante al igual que un BJT o IGBT [14].

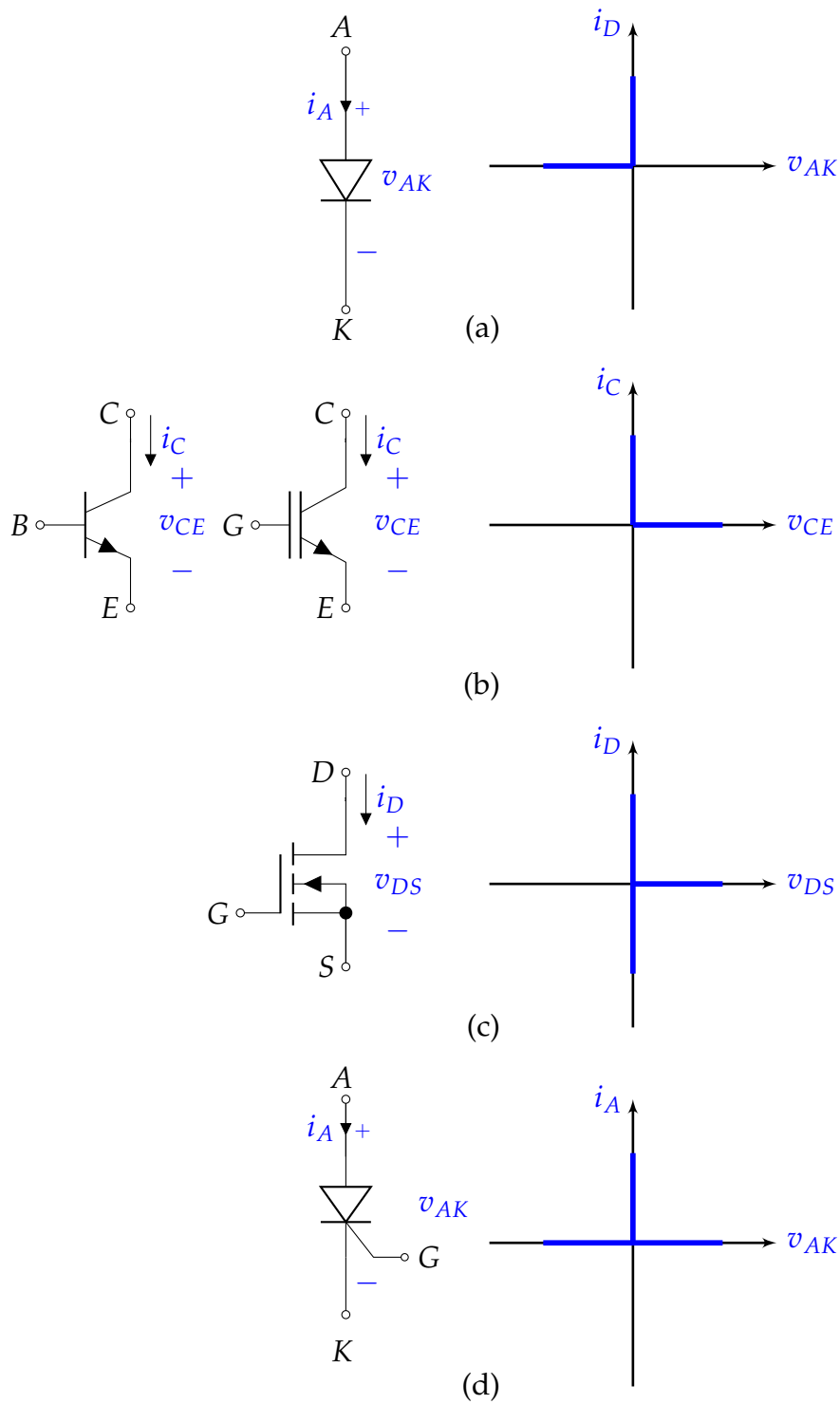


FIGURA 2.9: a) Diodo, b) BJT e IGBT, c) MOSFET, d) SCR.

2.8. Inversor

Los convertidores de DC/AC son mejor conocidos como inversores, la función de un inversor es cambiar una entrada de voltaje de DC a un voltaje simétrico de AC con magnitud y frecuencia deseada. La forma de onda de voltaje ideal de los inversores debería ser sinusoidal. Sin embargo, las formas de onda de los inversores prácticos son no sinusoidales con ciertos armónicos. Para aplicaciones de baja y media potencia, la forma de señal cuadrada o cuasi-cuadrada puede ser bastante aceptable. La salida de voltaje puede ser fija o variable a una frecuencia fija o variable. Si la entrada de voltaje es fija y no controlable, se puede obtener un voltaje variable, a través de la técnica PWM (Pulse Width Modulation), usualmente llevada a cabo por un microcontrolador o circuito integrado.

Los inversores se pueden clasificar en dos tipos:

- Monofásico
- Trifásico

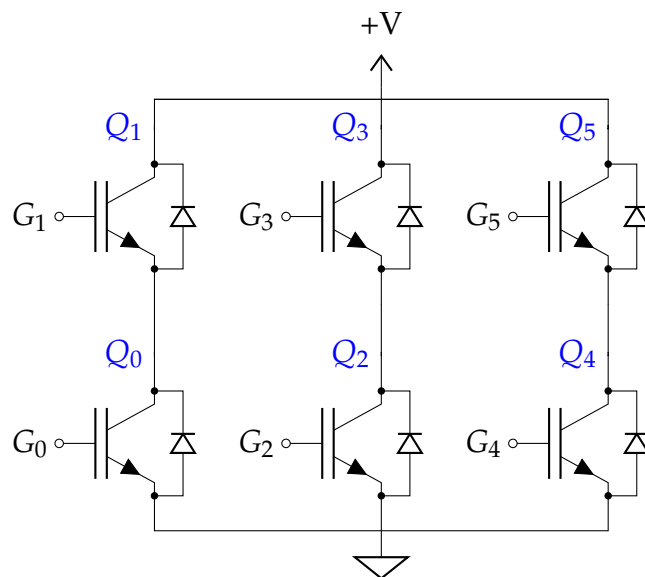


FIGURA 2.10: Inversor trifásico

La topología que nos muestra la figura 2.10 puede ser implementada por los distintos dispositivos de conmutación activa, en este ejemplo se presenta el caso particular con dispositivos IGBT.

2.9. Sensores de posición

Para determinar la posición angular del rotor es necesario contar con algún tipo de sensor que nos permita obtener una señal eléctrica con respecto a su posición, usualmente se utilizan sensores de efecto Hall y del tipo ópticos. Los sensores de efecto Hall se encuentran montados en una tarjeta de circuito impreso y embebida dentro del estátor como muestra la figura 2.11, la mayoría de los motores tienen un conjunto de imanes montados al final de la flecha del rotor para activar los sensores de efectos Hall.

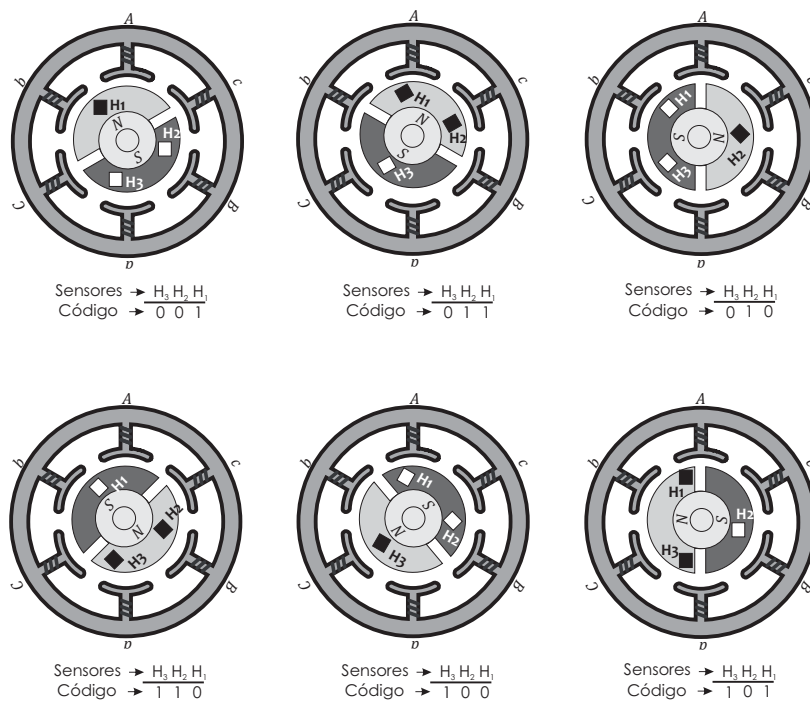


FIGURA 2.11: Seis segmentos que indican la posición y el valor de los sensores de efecto Hall.

Cada vez que uno de éstos imanes pasa por el sensor, el sensor nos arroja una señal con valores altos o bajos, que indica la polaridad del imán, como resultado, podemos determinar la posición del rotor. Los sensores de efecto Hall están montados ya sea cada 60° o 120° con respecto a los otros, cada sensor coincide con una de las fases del estátor, así entonces los tres sensores de efecto Hall pueden dividir la región de los 360° en seis segmentos de 60° o en tres segmentos de 30° .

2.10. Secuencia de conmutación

En cada rotación de 60 grados eléctricos, uno de los sensores de efecto Hall cambia de estado, de tal forma que se producen seis cambios o pasos que completan un ciclo eléctrico. El número de ciclos eléctricos está relacionado con los ciclos mecánicos a través del número de par de polos del rotor. Para mantener los flujos del estátor y el rotor síncronos es necesario tener la información de la posición, para energizar las fases en la dirección del flujo de corriente como se muestra en la figura 2.12 [12].

En la tabla 2.1, nos indica qué transistores activar con respecto al monitoreo de la posición del rotor, esto se efectúa a través de las señales de los sensores de efecto Hall o métodos de detección de BEMF que comúnmente se denominan «Sensorless» o sin sensores, esta secuencia de los 6 pasos o control escalar, normalmente sólo la frecuencia y la magnitud del voltaje que se le suministra al motor es controlado.

2.10. Secuencia de conmutación

Secuencia	HALL CBA	Transistores activos
1	001	(Q_5, Q_2)
2	010	(Q_3, Q_0)
3	011	(Q_5, Q_0)
4	100	(Q_1, Q_4)
5	101	(Q_1, Q_2)
6	110	(Q_3, Q_4)

TABLA 2.1: Secuencia para energizar el motor BLDC

Cada secuencia de conmutación tiene a uno de los devanados energizado positivamente (la corriente entra hacia el embobinado), el segundo devanado se energ por donde sale la corriente del devanado y el tercer devanado restante no está energizado.

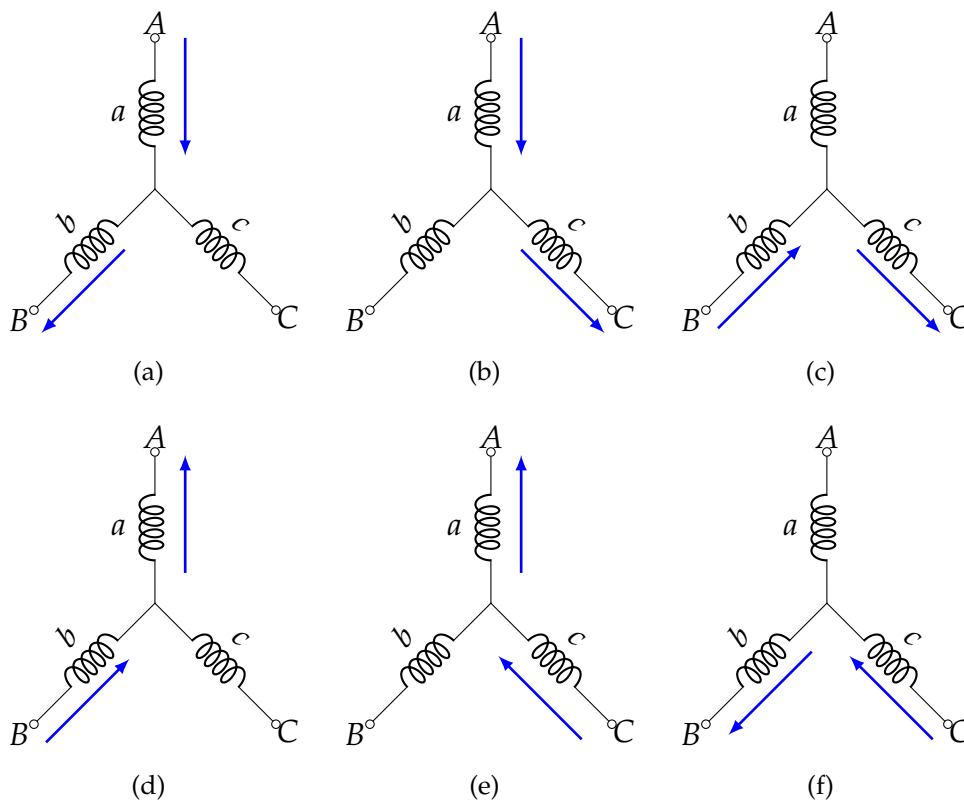


FIGURA 2.12: Flujo de corriente a través de la secuencia de los 6 pasos.

2.11. Fuerza contra-electromotriz

Cuando un motor BLDC rota, cada devanado genera un voltaje conocido como BEMF, la cual se opone al voltaje principal suministrado a los devanados de acuerdo con la Ley de Lenz. La polaridad de esta BEMF es en dirección opuesta al voltaje de polarización. La BEMF depende de tres factores principalmente:

- La velocidad angular del rotor.
- El campo magnético generado por los imanes del rotor.
- El número de vueltas en los devanados del estátor.

Una vez diseñado el motor, el campo magnético del rotor y el número de vueltas del embobinado del estátor permanecen constante. Ahora el factor que predomina es el de la velocidad angular o la rapidez angular del rotor, así la rapidez se incrementa la BEMF también crece.

La relación de las formas de onda de los sensores de efecto Hall, contra FEM y las formas de onda de corriente del motor se visualizan en la figura 2.13.

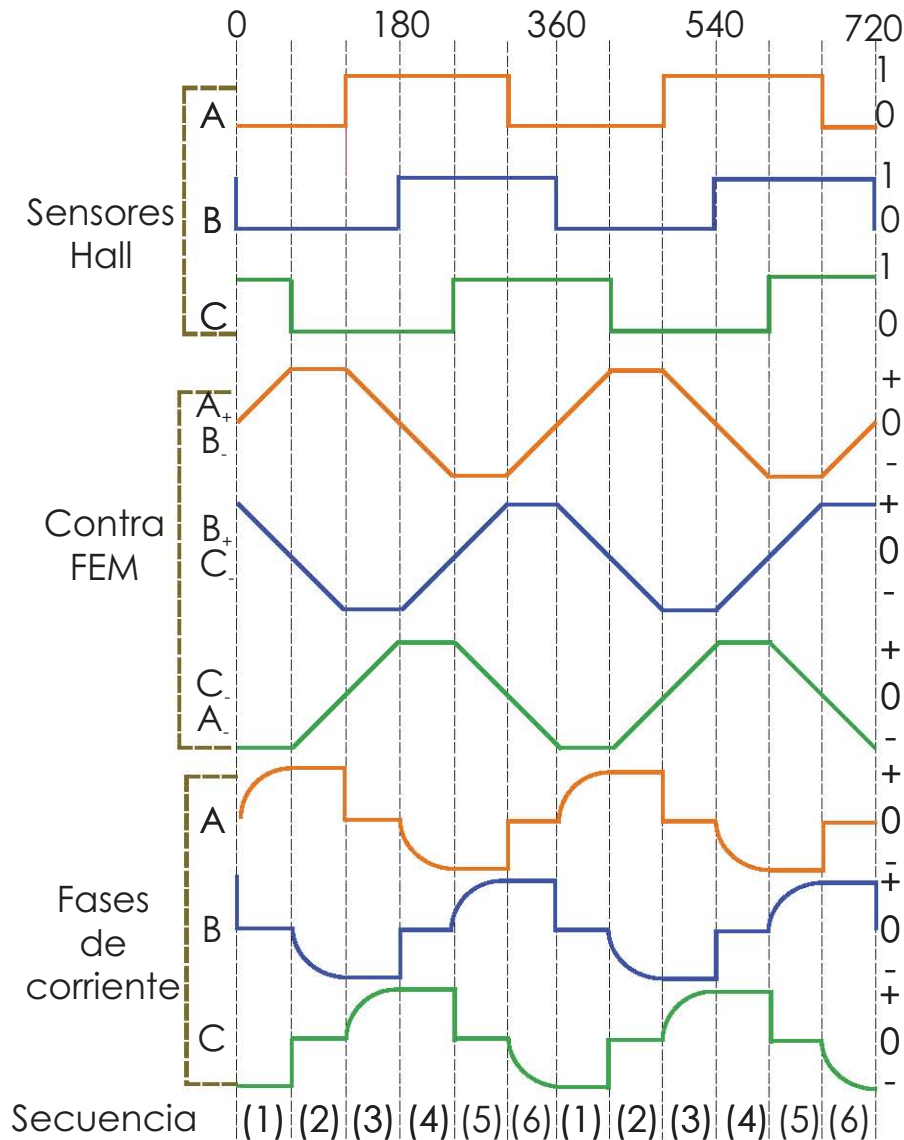


FIGURA 2.13: Formas de onda de los sensores de efecto Hall, Contra FEM, corriente por fase y la secuencia de conmutación.

2.12. Características del microcontrolador PIC18F4431

Para poder llevar a cabo la modulación de los seis pasos es necesario utilizar un microcontrolador para establecer una señal de PWM y el ciclo de trabajo del mismo. Para ello se cuenta con un microcontrolador de 8 bits de propósito específico para el control de motores, caso particular; el motor BLDC outrunner.

Lo distintivo del microcontrolador son los siguientes módulos:

- Módulo de control de potencia (Power Control PWM Module)
- Módulo de detección de posición o movimiento. (Motion Feedback Module)
- Módulo del convertidor analógico/digital de alta rapidez de 10 bits.

El módulo de control potencia, es un módulo que genera múltiples señales de PWM que están sincronizadas con una sola base de tiempo, se distingue por:

- 8 terminales de salida PWM enumeradas del 0 al 7 y agrupados en pares, con 4 generadores de ciclo de trabajo.
- Resolución del ciclo de trabajo de 14 bits dependiendo del período de la señal PWM.
- Las señales de PWM pueden trabajar en modo complementario o modo independiente.
- Modos de salida por alineación por flanco o central.
- Interrupción por base de tiempo del PWM.

Módulo de detección de posición o movimiento cuenta con las siguientes características:

- 3 (Input Capture N°X) entradas independientes IC1, IC2 e IC3.
- Módulos flexibles de operación para medir el período y el ancho del pulso.
- Módulo de especial para lectura de sensores de efecto Hall.
- Salidas de eventos especiales para otros módulos.
- Interfaz QEI, lecturas de sensores ópticos en cuadratura.

2.12. Características del microcontrolador PIC18F4431

- Medición de rapidez.

Módulo de convertidor analógico/digital de alta velocidad de 10 bits o ADC

- 9 canales de lectura analógicos.
- Ajuste de tiempo de adquisición.
- Disparo de inicio de conversión por interrupción.
- Activación de una interrupción cuando termina una conversión.

Para mayor información de las características del microcontrolador consulte [9].

2.13. Señal de PWM

El periodo de la señal PWM se establece con el registro PTEPER que se divide en los registros PTPERH y PTPERL, que corresponde con la resolución de la parte alta y baja de la señal. El valor del ciclo de trabajo se establece a través de los registros PDCH y PDCL del canal de PWM correspondiente. El valor del período T_{pwm} está definido por la ecuación 2.7, en donde PTMRPS establece un valor de prescalamiento y f_{osc} corresponde a la frecuencia del oscilador externo del microcontrolador.

$$T_{pwm} = \frac{(PTPER + 1) \cdot PTMRPS}{f_{osc}/4} \quad (2.7)$$

Por ejemplo, para un período de 50 μs se utiliza el valor de 1 para que corresponde a una frecuencia de 20 kHz, un prescalamiento de 1 y con una frecuencia de oscilación de 40 MHz, el valor del registro PTPER debe ser de 499.

$$50\mu s = \frac{(PTPER + 1) \cdot 1}{40MHz/4} \quad (2.8)$$

$$PTPER = 499$$

El ciclo de trabajo en función del valor obtenido por el convertidor ADC y el registro PTPER está definido en 2.9.

$$D_{cycle} = \frac{\text{valor ADC}}{4 \cdot PTPER} \quad (2.9)$$

Un ejemplo de cómo obtener el ciclo de trabajo se muestra a continuación:

$$D_{cycle} = 1024 / (4 \cdot 499)$$

$$D_{cycle} \approx 51 \%$$

Capítulo 3

Desarrollo

3.1. Introducción

En este capítulo se abordará lo relacionado con el diseño del inversor y el diseño del método de detección de la BEMF, características básicas del motor, formas de onda de los sensores de efecto Hall y las señales obtenidas por la fuerza contra-electromotriz por fase del motor.

La imagen 3.1 sintetiza los elementos interconectados en el proyecto, tomándose con subsistemas al microcontrolador, el circuito drive, inversor, motor y circuito de detección.

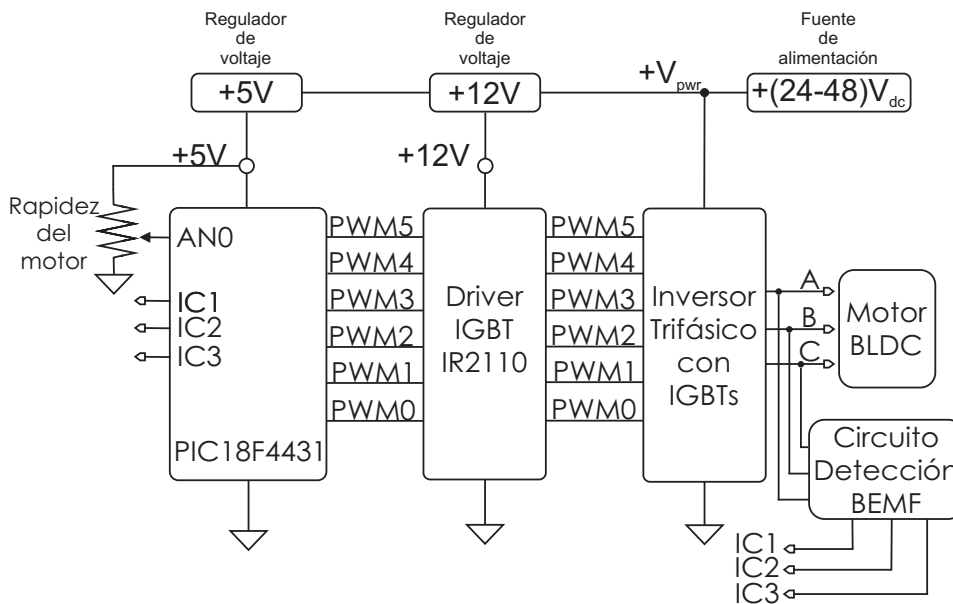


FIGURA 3.1: Esquema general del controlador

3.2. Características básicas del motor MTO6365-220HA

El motor MTO6365-220, es un motor BLDC Outrunner cuyo fabricante es la empresa china Maytech, las características inmediatas relativas al motor se muestran en la siguiente tabla:

Características	Unidades
KV	200 rpm/V
Idle Current	0.8A
Maximum Current	65A
Input Voltage	2-12s Lipo
Maximum Output Power	3520 W
Motor Weight	0.668 kg

TABLA 3.1: Características de fabricante

El fabricante nos señala que el nivel de voltaje de trabajo no debe ser mayor que un arreglo de baterías 2s-12 Lipo, que corresponde con un voltaje de 44 volts. El parámetro Idle current se refiere a la corriente mínima para vencer la inercia y la corriente máxima que el fabricante expone es de 65 A. Por último, el peso del motor es 0.668 kg.



FIGURA 3.2: Motor BLDC Outrunner MTO6365HA-220.

En las pruebas realizadas en el laboratorio, las condiciones de operación del motor se mantuvieron controladas; es decir, la fuente de alimentación no superó los límites máximos sugeridos por el fabricante.

3.3. Inversor o puente trifásico completo

En el diseño de circuitos de electrónica de potencia siempre se tiene como objetivo el disminuir las pérdidas ya sean por conmutación o en los elementos que conforman el circuito en cuestión, tomando diferentes aspectos que el sistema requiera. Las pérdidas ocurren cuando se encuentran en un estado activo, dado que el voltaje en un interruptor no es cero. También las pérdidas de conmutación se llevan a cabo en las transiciones de los estados, porque no ocurren instantáneamente.

Para poder llevar a cabo el encendido o el apagado de transistores donde los niveles de voltaje de control están fuera de los niveles lógicos, que usualmente están por entre de los 5V como límite superior y como límite inferior de 0V.

Para manejar este tipo de transistores que exceden estos valores, es necesario utilizar otros dispositivos como etapa intermedia, usualmente se emplean componentes discretos de conmutación como son los transistores bipolares o de tecnología FET. Aunque también existen circuitos integrados que nos permiten llevar a cabo esta función, lo cuales se denominan Drives Circuits o Electric Drives, se consideran las configuraciones de Low Side y High side. La configuración Low Side nos indica la posición de la terminal del emisor o source dependiendo del dispositivo de conmutación que se utilice esté conectado a un punto de referencia denominado tierra. En el caso de la configuración de High Side, el punto de referencia no es la tierra, al cual se describe como una referencia o punto que no está fijo o que está «flotando» con respecto a la tierra del circuito como se expone en [4]. Para ello se utiliza un

circuito integrado IR2110 de la compañía International Rectifier, que nos permite llevar a cabo el uso de los dispositivos IGBT IRG4PC40UD como nos muestra 3.3, lo cual consiste en lo siguiente:

IGBT: IRG4PC40UD están optimizados por el fabricante para trabajar con conmutaciones duras en un rango de frecuencia entre 8-40 [KHz] y un voltaje máximo de colector a emisor máximo de $V_{CES} = 600V$.

Circuito de Bootstrap: Es uno de los métodos más ampliamente usados para proporcionar el voltaje necesario para activar el High Side, está conformado por un diodo y un capacitor, este circuito nos permite encender al IGBT que tiene que vencer el voltaje de umbral del gate del transistor.

$$V_B > V_{GE(th)}$$

Con respecto [7]:

Capacitor de Bootstrap mínimo:

$$C_B \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \quad (3.1)$$

- Q_g : Carga del gate IGBT en estado alto.
- f : Frecuencia de operación.
- $I_{qbs(max)}$: Corriente máxima cuasiestática V_{BS} .
- Q_{ls} : Carga requerida para desplazar los niveles internos, típicamente 5 [nC].
- V_{cc} : Voltaje de alimentación de la parte lógica.
- V_{LS} : Caída de voltaje a través del High Side del inversor.
- V_f : Caída de voltaje a través del diodo.
- V_{Min} : Voltaje mínimo entre V_B y V_s

3.3. Inversor o puente trifásico completo

El valor mínimo C_B ronda aproximadamente los 100nF, tomando en cuenta la referencia [7], se sugiere que el valor mínimo obtenido sea al menos 10 veces mayor, por tanto, C_B es cercano a 0.1 μ F.

Además, se requiere que cuente con un valor bajo en su ESR, por lo cual se utilizó un capacitor de tantalio. En el caso del diodo, se recomienda que tenga un tiempo de recuperación menor a los 100ns y un voltaje inverso alrededor de 600V, las cuales el diodo MUR160 cumple satisfactoriamente.

Capacitores de acoplamiento: Para la parte lógica del driver se utilizó un capacitor de 470nF, para la parte de la salida se utiliza un capacitor por lo menos 10 veces el valor del capacitor Bootstrap como sugiere [6], en este caso se utiliza uno cuyo valor es de 10 μ F a 25V.

Resistencias de encendido de los IGBT: La resistencia de encendido se define como:

$$R_{g(\text{on})} = R_{\text{total}} - R_d \quad (3.2)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{V_{cc} - V_{ge(th)}}{C_{ies(\text{off})} \left(\frac{dv_{out}}{dt} \right)} \quad (3.3)$$

- V_{cc} : voltaje de polarización del circuito integrado.
- $V_{ge(th)}$: voltaje de umbral del IGBT.
- $\frac{dv_{out}}{dt}$: Taza de cambio de V_{cc} con respecto al tiempo de umbral que tarda en llegar al $V_{ge(th)}$.
- C_{ies} : Capacitancia de entrada cuando $V_{ge(th)} = 0$.
- R_d : Resistencia de salida del driver IR2110.

Sustituyendo los valores respectivos, se obtiene:

$$R_{total} = \frac{(12 - 6)V}{(1500\text{pF}) \left(\frac{48V}{400\text{ns}} \right)}$$

$$R_{total} = 33.333\Omega$$

Se toma con referencia el valor de $R_d \approx 7\Omega$ con respecto a las hojas de aplicación [7].

$$R_{g(\text{on})} = (33.33-7)\Omega$$

$$R_{g(\text{on})} \approx 26\Omega$$

$$R_{g(\text{off})} \approx 22\Omega$$

Capacitores: Se utiliza un capacitor de propileno de un $0.1\mu\text{F}$, tiene la función de suprimir transitorios de voltaje o de corriente cuando la carga es mayormente de tipo inductiva, se debe colocar lo más cercano a las terminales de los transistores de potencia, es útil para corrientes menores de 50A como se recomienda en [13]. También se utilizan capacitores de $1000\mu\text{F}$ a 60V que sirven para disminuir el rizo de corriente.

Reguladores de voltaje: Para obtener el voltaje de 12V y 5V se utilizaron los reguladores LM317 y el 7805.

3.3. Inversor o puente trifásico completo

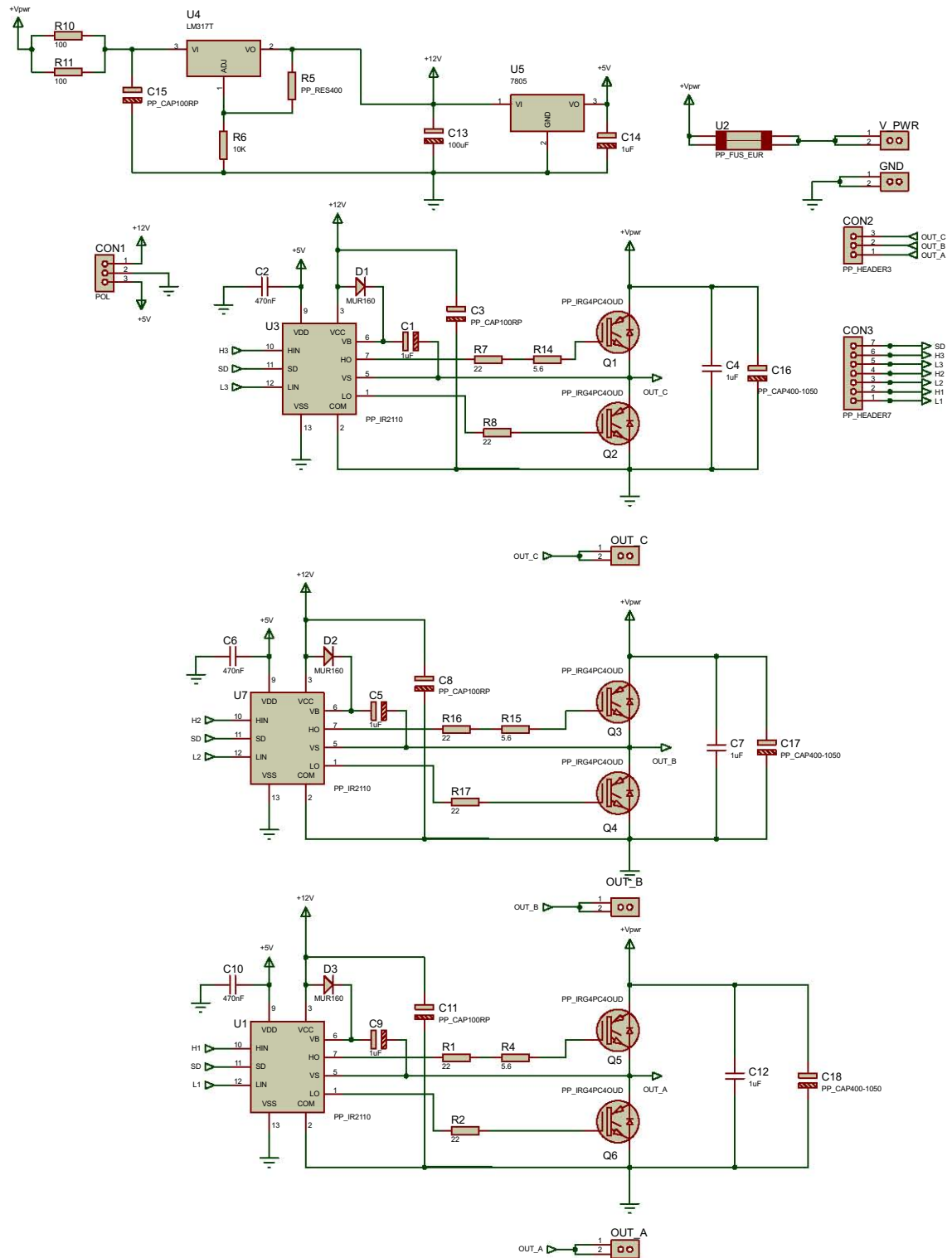


FIGURA 3.3: Circuito trifásico de puente completo

3.4. Circuito para detectar BEFM

Para poder detectar la BEFM y obtener una señal que nos indique su posición con la relación de sus niveles lógicos, se realiza un acondicionamiento de señales para las tres fases del motor BLDC y se utiliza la técnica de detección de cruce por cero con un punto neutro virtual.

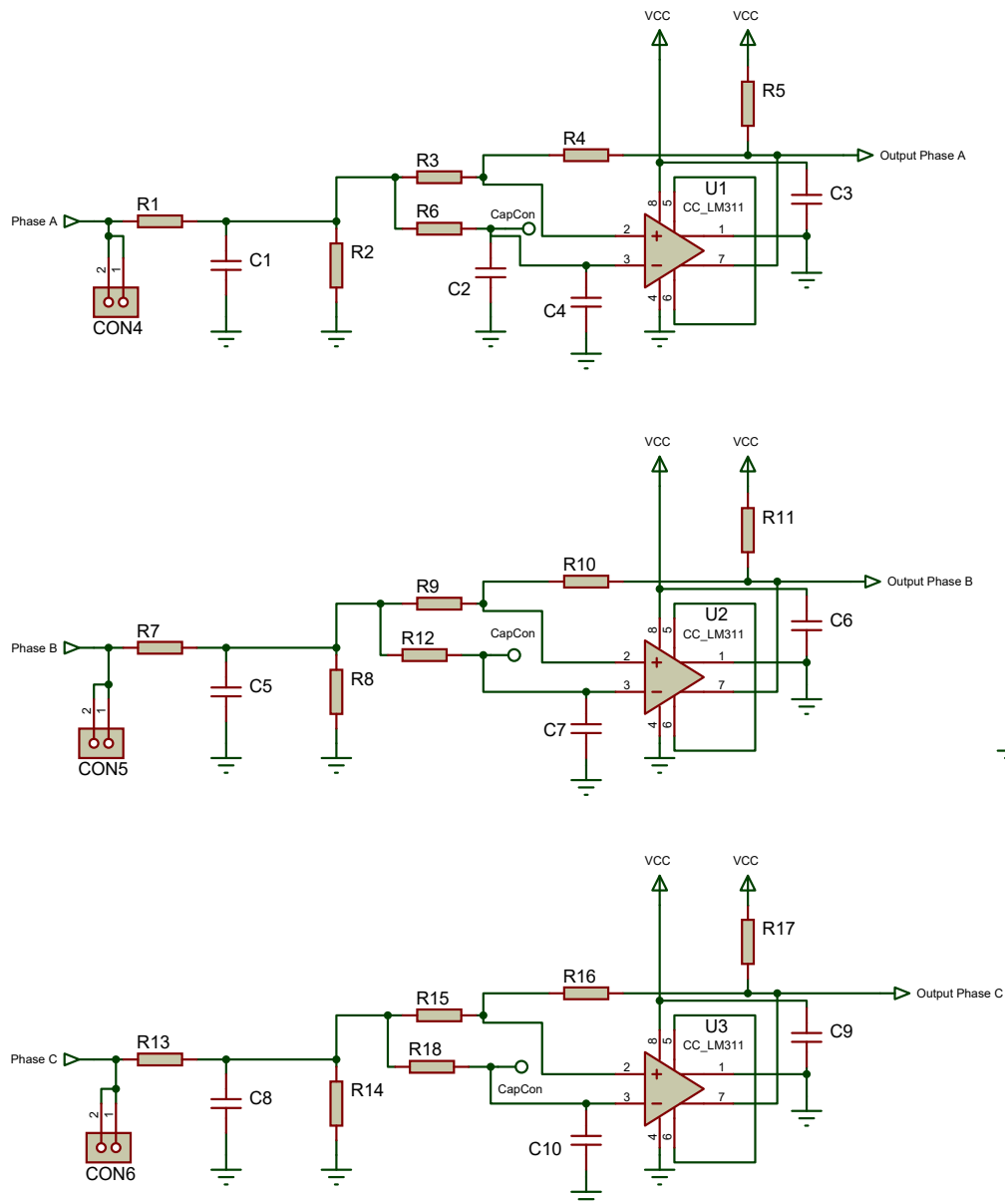


FIGURA 3.4: Circuito de detección de cruce por cero para la detección de la posición utilizando las BEMF de cada fase del motor.

3.4. Circuito para detectar BEFM

Debido a las características de la señal PWM y la detección de cruce por cero con un punto neutro virtual; ésto significa que no podemos acceder al neutro del motor debido a la construcción del mismo, se propone crear un punto de referencia similar al del neutro del motor, con un arreglo de resistencias R_6 , R_{12} y R_{18} como se muestra en la figura 3.4, debido a que éste punto de referencia fluctúa, ésto genera un modo común de voltaje alto y también considerar la interferencia producida de la conmutación de los transistores, al igual que los armónicos de la frecuencia conmutación, que puede influir en la señal que queremos utilizar para detectar la posición del rotor, para ello se debe acondicionar con técnicas de filtrado y divisores de voltaje, el divisor de voltaje reduce el voltaje en modo común y junto con el filtro paso bajas de primer orden suavizan el efecto de los armónicos y de alguna señal indeseada de alta frecuencia, el valor de los filtros del circuito y el divisor es el mismo para cada fase, así entonces sólo usaremos la fase A para determinar los valores de frecuencia de corte y para el divisor de voltaje.

$$\begin{aligned}f_c &= \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \\f_c &= \frac{1}{2\pi \cdot 27\text{k}\Omega \cdot 47\text{nF}} \\f_c &\approx 125\text{Hz}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Divisor de voltaje

$$\begin{aligned}v_{oa} &= v_i \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \\v_{oa} &= e_a \left(\frac{2.2\text{k}\Omega}{27\text{k}\Omega} \right) \\v_{oa} &\approx 80 \cdot 10^{-3} e_a\end{aligned}\tag{3.5}$$

La BEMF de cada fase es comparada con el punto neutro virtual usando comparadores de voltaje, el detector de cruce por cero es un comparador no inversor con histéresis, tomando la referencia [15] podemos definir el ancho de histéresis a ΔV_T

$$\begin{aligned}\Delta V_T &= \frac{R_3}{R_4} (V_{OH} - V_{OL}) \\ \Delta V_T &= \frac{10\text{k}\Omega}{1\text{M}\Omega} (5 - 0)\text{V} \\ \Delta V_T &= 50\text{mV}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Se utiliza un circuito integrado LM311 que es un comparador con salida a colector abierto para poder utilizar las salidas compatibles con tecnología TTL o poder ser leídas con un puerto digital de un microcontrolador.

3.5. Formas de onda

En la figura 3.5 se muestra la señal de PWM con las características mencionadas en la sección 2.13, es decir, de frecuencia de 20 kHz y de voltaje de 5 V. En la imagen la señal presenta un ciclo de trabajo del 50 por ciento. Cabe mencionar que el microcontrolador permite una función especial de sobreescritura con el registro OVDCON que permite activar o no las señales de PWM en función de la posición detectada del motor.

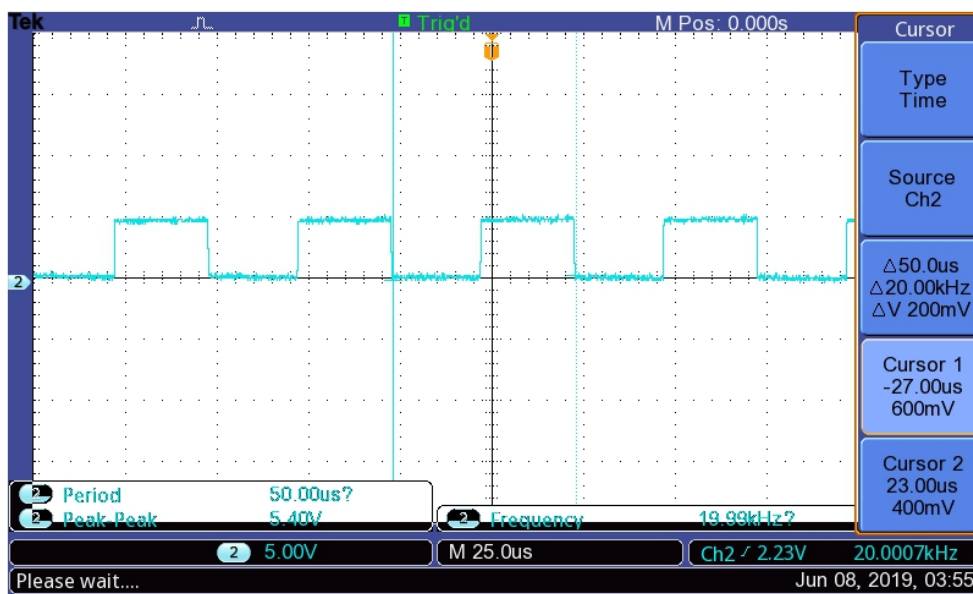


FIGURA 3.5: Señal PWM con la cual conmutan los transistores.

La BEMF generada en cada uno de los devanados se desfasan 120 grados entre ellas, en cada secuencia se energiza dos fases y las tercera se queda abierta, la combinación de tres detectores de cruce por cero nos permiten obtener la posición para realizar la modulación y energizar el motor.

Por diferentes aspectos de fabricación y montaje, los sensores de efecto Hall muestran señales más distorsionadas o de menor legibilidad. El problema de la distorsión tiene una repercusión en la modulación del motor, al ser leído un valor erróneo de la posición.

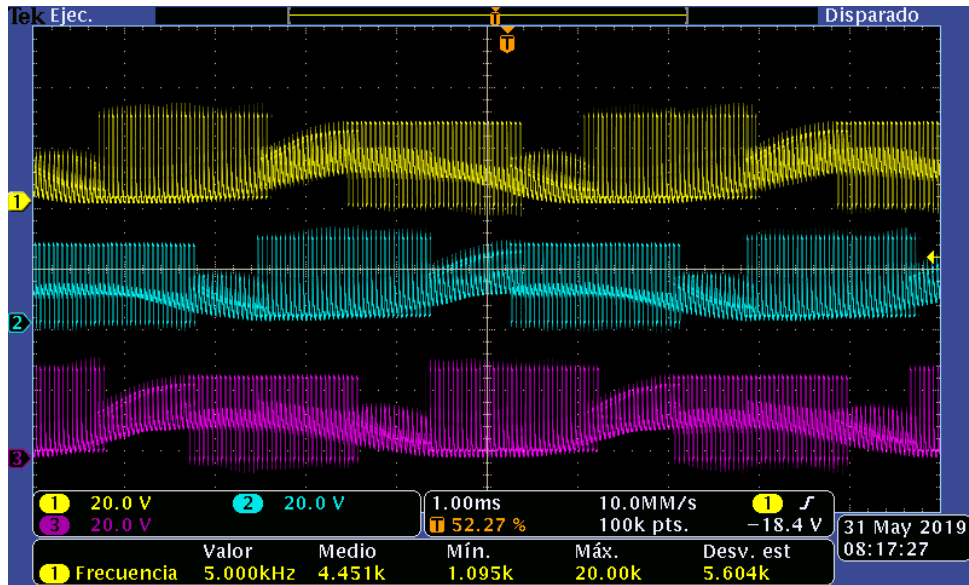


FIGURA 3.6: Señales de BEMF de sus respectivas fases a, b, y c sin acondicionar.

A continuación, se muestran en las figuras 3.7 y 3.8 las señales obtenidas de los sensores de efecto Hall y la BEMF por fase respectivas del motor, la frecuencia es aproximadamente 208Hz. Es importante mencionar que el registro de las señales en el osciloscopio en ambos casos se realizó usando la opción de detección de picos para resaltar sus características.

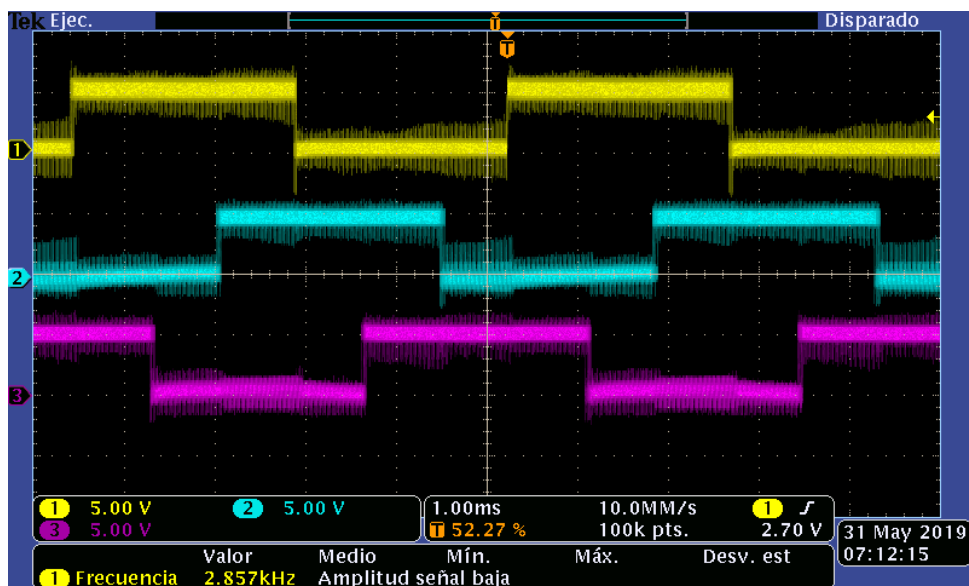


FIGURA 3.7: Señales de efecto Hall para las fases a, b, y c.

3.5. Formas de onda

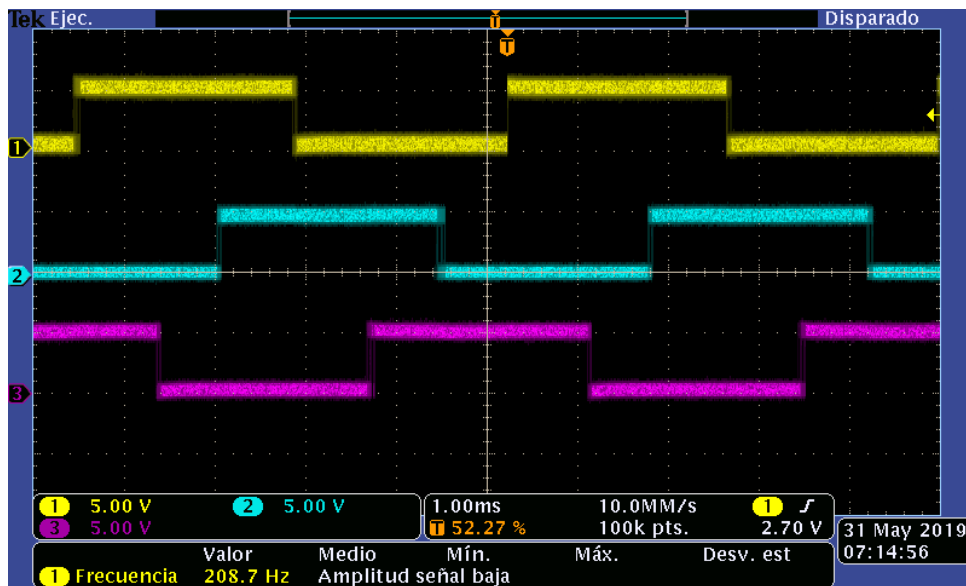


FIGURA 3.8: Señales de BEMF de sus respectivas fases a, b, y c acondicionadas.

Durante las pruebas se observó que la distorsión en las señales de efecto Hall, aumentan a medida que la velocidad del motor incrementa, lo cual repercute en menor medida en las señales de la BEMF. Esto se puede observar en las figuras 3.9 y en 3.10 , en donde las frecuencias son 339 Hz y 540 Hz respectivamente.

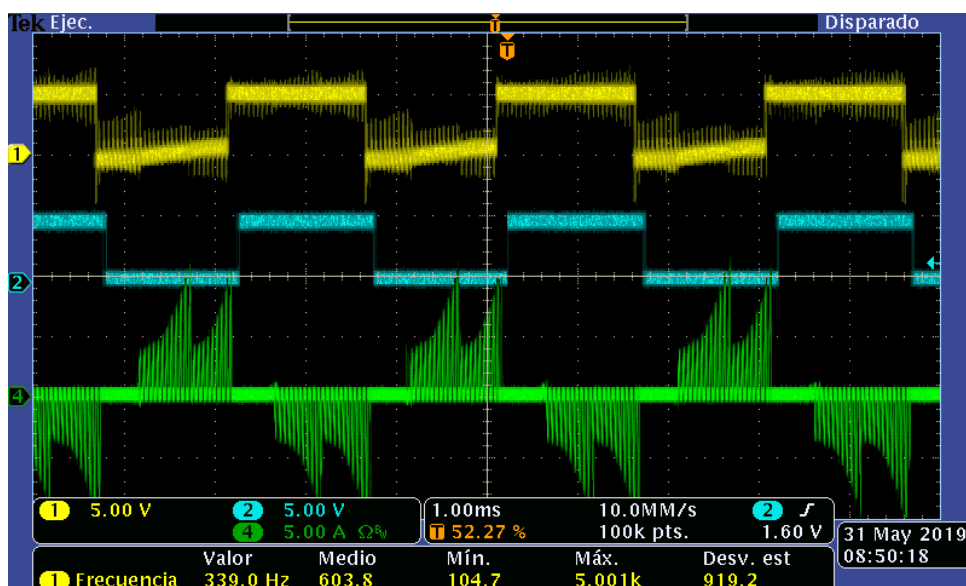


FIGURA 3.9: Señales de la fase C: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente.

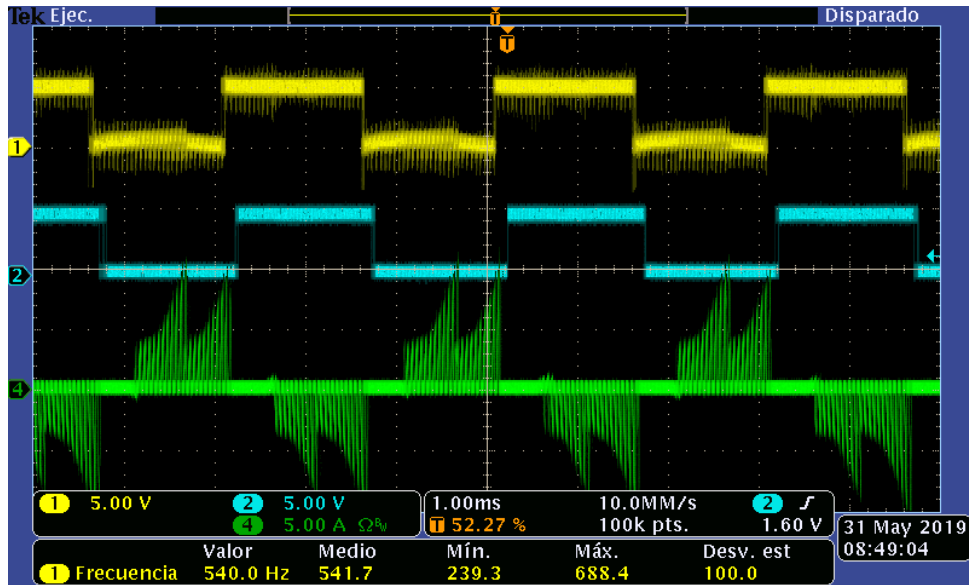


FIGURA 3.10: Señales de la fase b: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente.

Por otra parte, el tiempo de retraso presentada en la señal de BEMF con respecto a la señal de efecto Hall, se visualiza en la figura 3.11 y es de 132 μs . Este efecto se debe al filtro de primer orden que contribuye con ello.

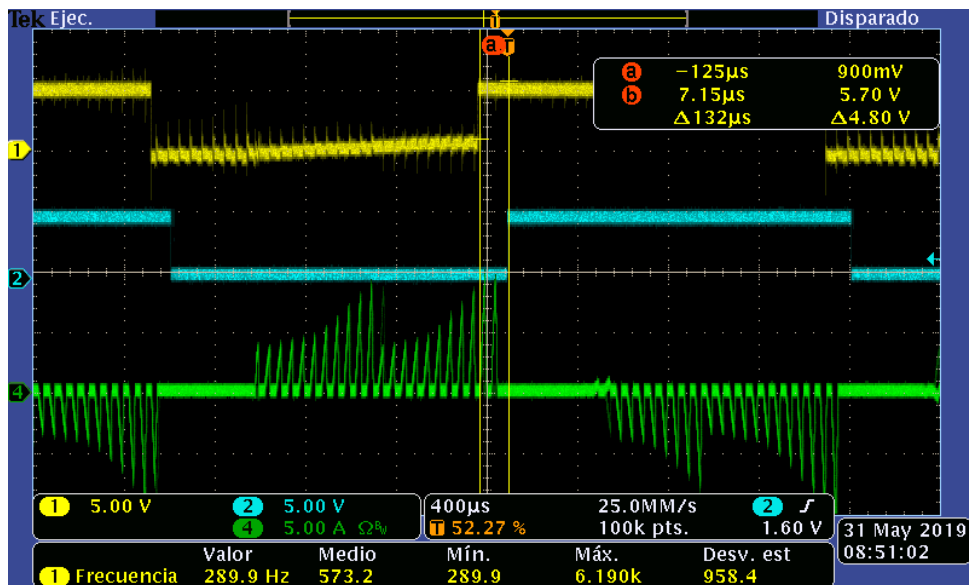


FIGURA 3.11: Señales de la fase c: (1) Efecto Hall, (2) BEMF y (4) corriente.

3.5. Formas de onda

Debe tomarse en cuenta el retraso que tiene la señal de BEMF con respecto a la señal de sensor de efecto Hall, debido a que está relacionado con el consumo del motor y se manifiesta en forma de picos de corriente que afectan la sincronía, la cual repercute en vibraciones asíncronas del mismo. Esto se puede compensar con el módulo de detección de posición con las interrupciones generadas por las entradas IC1, IC2 e IC3 respectivamente. A partir de éstas, se genera un retraso mediante un temporizador que se actualiza constantemente y que permite sincronizar nuevamente la activación de los transistores del inversor de manera correcta.

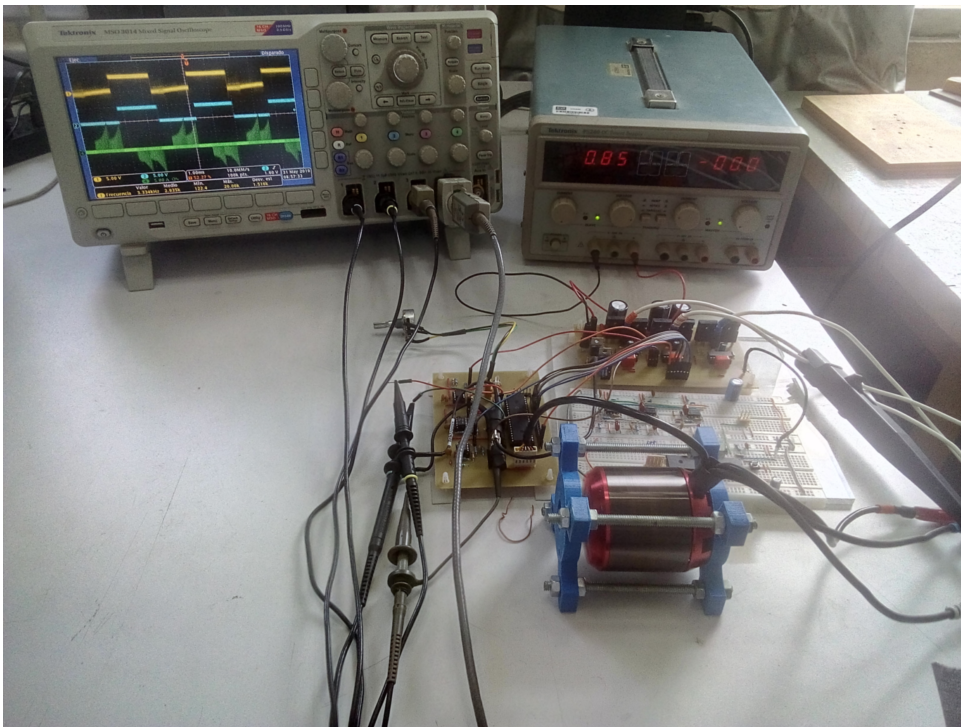


FIGURA 3.12: Tarjeta prototipo en funcionamiento

Capítulo 4

Conclusiones

En el trabajo se detalla el proceso e implementación de un arreglo modular para realizar las pruebas necesarias de la detección sin sensores de la posición del rotor de un motor de corriente directa sin escobillas. El motor empleado cuenta con sensores de efecto Hall, que permiten validar la posición inicial en la ausencia de la fuerza contra-electromotriz.

La lectura errónea repercute en la secuencia de giro del motor y éste en el consumo energético. Se hace un énfasis en la distorsión presentada en las señales de efecto Hall por defectos de fabricación o de montaje de los sensores, ésto se acentúa cuando la rapidez del motor aumenta, lo cual no ocurre en las señales obtenidas por el circuito de detección de BEMF. En los resultados obtenidos se muestra una baja distorsión cuando la velocidad ha superado la cota mínima para la correcta detección de la contra FEM.

El circuito de detección también tiene la ventaja de disminuir el ruido debido a la conmutación de las señales de PWM que se inducen en los sensores de efecto Hall, debido a que la topología usada incluye en su configuración filtros pasivos de primer orden. Cabe resaltar que el tránsito a motores sin sensores de posición ha ido cobrando un auge mayor debido a que, desde el punto de vista de manufactura, el ahorro es substancial. Se debe tomar en cuenta que muchos de estos motores se embobinan a mano, lo cual es usual en empresas asiáticas.

Las posibles mejoras que se pueden realizar en este trabajo son:

- Si bien existe un ahorro en la manufactura de motores Bruhsless sin sensores, es necesario mencionar que se requiere de un algoritmo de arranque debido a que la contra-FEM al ser una variable en función de la velocidad, su valor es reducido o nulo para bajas velocidades. El desarrollo de este algoritmo es el siguiente paso es la contuindad del presente proyecto.
- Otra mejora consiste en implementar filtros digitales y utilizar dispositivos que cuenten con comparadores internos, lo cual reduciría el tiempo de retardo y el tamaño de la tarjeta modular. Además de esto, se reduce el empleo de la electrónica analógica, que es más sensible a variaciones de temperatura, ruido y la repetibilidad de su implementación.
- Cambiar la arquitectura del procesamiento con herramientas más poderosas como son microcontroladores de 32 bits o controladores de señales digitales, DSC por sus siglas en inglés (Digital Signal Controllers), frecuentemente usados para algoritmos de control más sofisticados, entre los cuales se puede mencionar la implementación de algoritmos como el Field Oriented Control, también denominado control vectorial.

Apéndice A

Anexos

A.1. Placa de circuito impreso de detección de BEMF

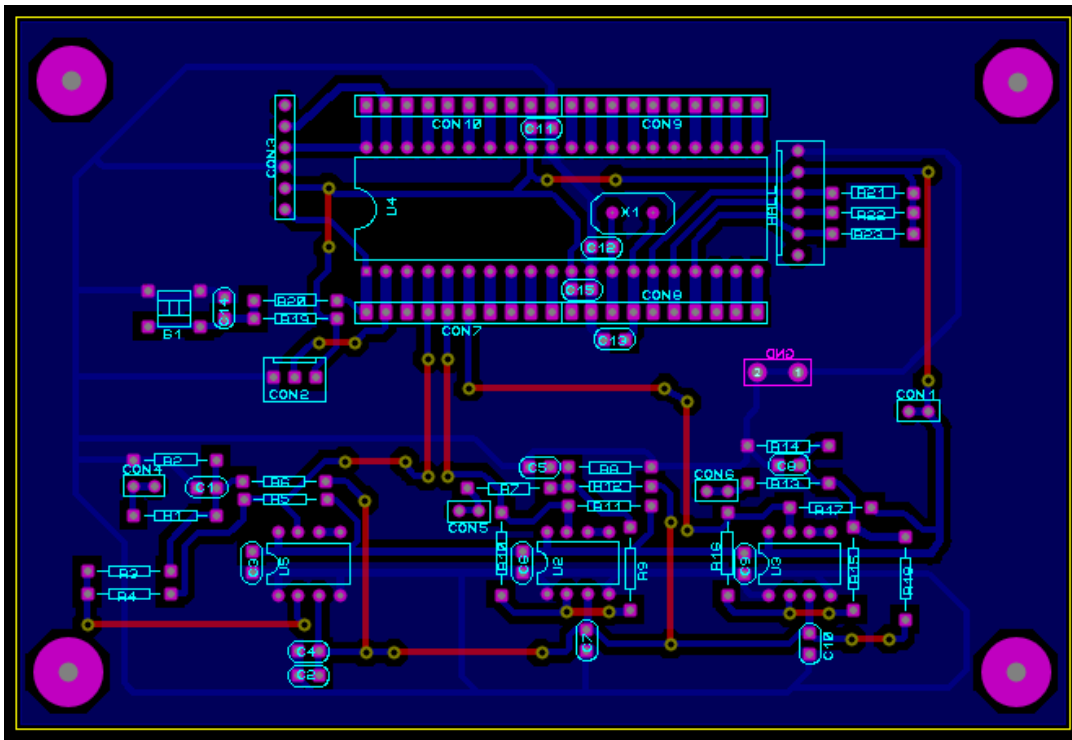


FIGURA A.1: Pistas del circuito impreso para detectar la BEMF

A.2. Placa de circuito impreso del driver para motor BLDC

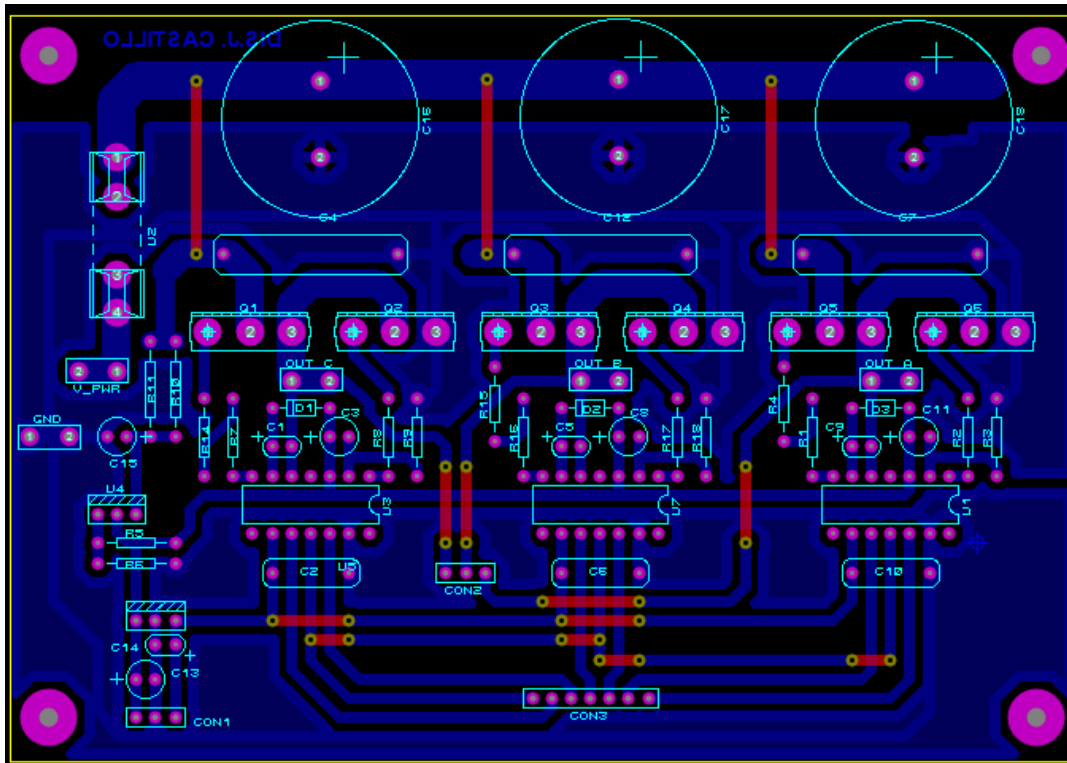


FIGURA A.2: Pistas del circuito impreso del inversor

A.3. Circuito esquemático de BEMF

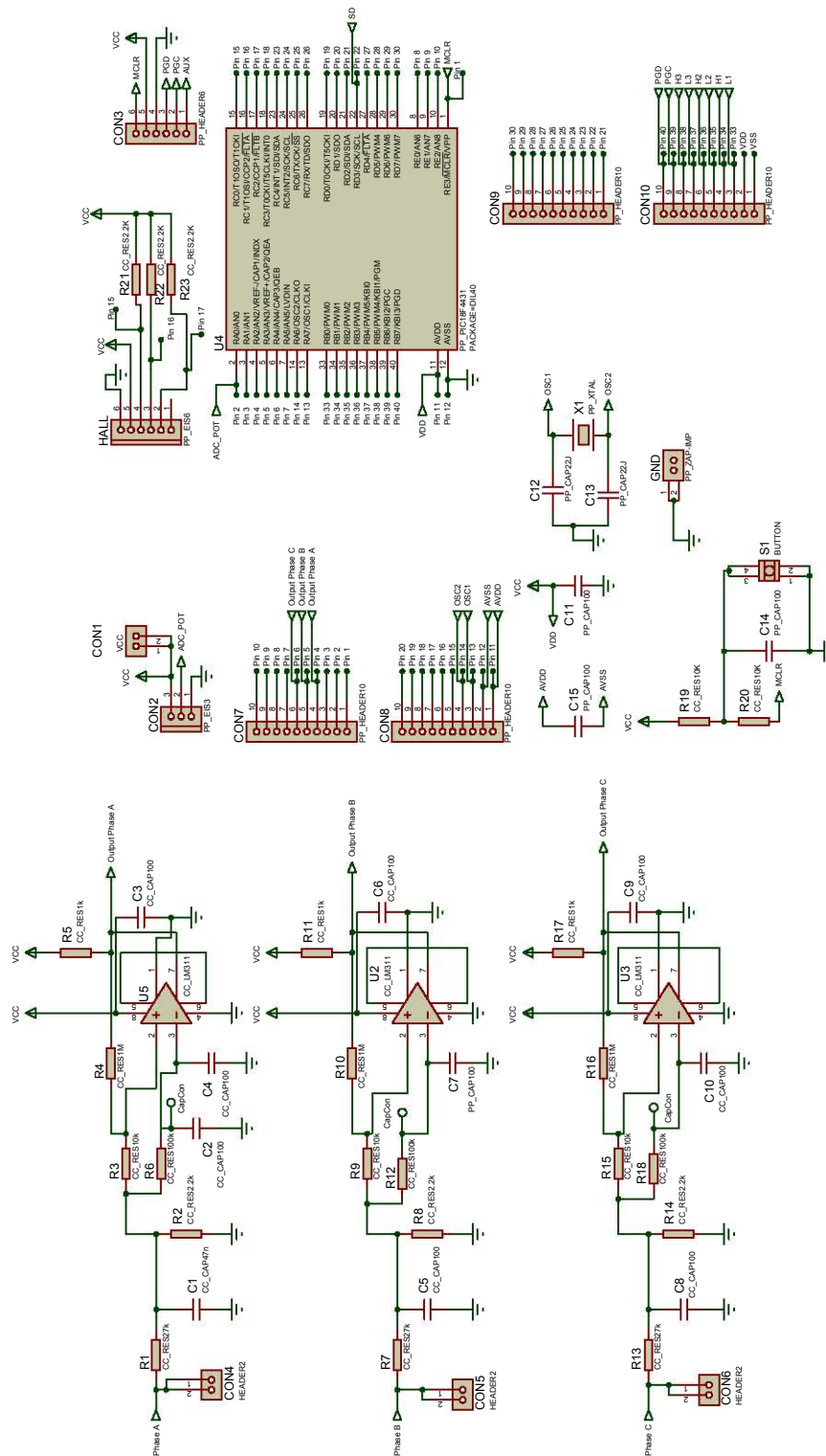


FIGURA A.3: Circuito esquemático de la detección de BEMF con el microcontrolador PIC18F4431.

A.4. Código en lenguaje C

```
#include <18F4431.h>
#include <device ADC = 10
#include <stdlib.h>
#include <Registers.h>
#include HS, NOWDT, NOPROTECT, NOPUT, NOBROWNOUT, NOLVP, NOCPD
#include delay(clock=40MHz, oscillator=10MHz)
#include fast_io(A)
#include fast_io(B)
#include fast_io(C)
#include fast_io(D)

long dataIC=0;
long v_adc=0;
int HallSensor = 0;
short x=0;
void Duty(void);
void init_pwm(void);
void init_adc(void);
void forward_sequence(void);
void init_ports(void);
void init_Timer1(void);
void ISR_PWMTB(void);
void ISR_ADC(void);
void timeIC1(void);
void timeIC2(void);
void timeIC3(void);
```

```
void Duty(void)
{
    PDC0H = (v_adc)>>8;
    PDC0L = (v_adc);
    PDC1H = (v_adc)>>8;
    PDC1L = (v_adc);
    PDC2H = (v_adc)>>8;
    PDC2L = (v_adc);
    PDC3H = (v_adc)>>8;
    PDC3L = (v_adc);
}

void init_pwm(void)
{
    PTEN=0;
    PTCON0 = 0b11110000;
    PWMCON0 = 0b01001111;
    PWMCON1 = 0b11110001;
    PTPERH = period_pwm>>8;
    PTPERL = period_pwm;
    SEVTCMPH = trigger_adc>>8;
    SEVTCMPL = trigger_adc;
    PDC0H = 0;
    PDC0L = 0;
    PDC1H = 0;
    PDC1L = 0;
    PDC2H = 0;
    PDC2L = 0;
    PDC3H = 0;
```

A.4. Código en lenguaje C

```
PDC3L = 0;
OVDCONS=0x00;
UDIS=0;
PTEN=1;
    output_low(PIN_D2);
}
void init_adc(void)
{
    ADCON0 = 0b00000011;
    ADCON1 = 0b00011100;
    ADCON2 = 0b10010110;
    ADCON3 = 0b11010000;
    delay_us(10);
    ADCHS = 0x00;
    ANSEL0 = 0x01;
    ANSEL1 = 0x00;
    v_adc = make16(ADRESH,ADRESL);
}
void forward_sequence(void)
{
    switch (HallSensor)
    {
        case 0:
            OVDCOND = 0b00010101;
            OVDCONS = 0b00010101;
            break;
        case 1:
            OVDCOND = 0b00100100;
```

```
    break;
        case 2:
            OVDCOND = 0b00001001;
            break;
        case 3:
            OVDCOND = 0b00100001;
            break;
        case 4:
            OVDCOND = 0b00010010;
            break;
        case 5:
            OVDCOND = 0b00000110;
            break;
        case 6:
            OVDCOND = 0b00011000;
            break;
        case 7:
            OVDCOND = 0b00010101;
            OVDCONS = 0b00010101;
            break;
        default:
            break;
    }
}

void init_Timer1(void)
{
    T1CON    = 0b11000001;
    CAP1CON  = 0b01001000;
```

A.4. Código en lenguaje C

```
    CAP2CON = 0b01001000;
    CAP3CON = 0b01001000;
    DFLTCON = 0b00111000;
}
void init_ports(void)
{
    set_tris_a(0xFF);
    set_tris_b(0x00);
    set_tris_c(0xFF);
    set_tris_d(0x00);
}
#INT_PWM_TB
void ISR_PWM_TB(void)
{
    Duty();
}
#INT_AD
void ISR_ADC(void)
{
    v_adc = make16(ADRESH,ADRESL);
}
#INT_TIMER1
void ISR_Timer1(void)
{
    forward_sequence();
    T1CON = 0b11000000;
}
```

```
void main(void)
{
    init_ports ();
    init_adc ();
    init_pwm ();
    init_Timer1 ();
    enable_interrupts (INT_AD);
    enable_interrupts (INT_PWMTB);
    enable_interrupts (INT_IC1);
    enable_interrupts (INT_IC2QEI);
    enable_interrupts (INT_IC3DR);
    enable_interrupts (INT_TIMER1);
    enable_interrupts (GLOBAL);
    HallSensor =(input_a()>>2)&0x07;
    while (1);
}
```

Referencias

- [1] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., S. Umans. *Electric Machinery*. 6.^a ed. Nueva York, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [2] ANSI/IEEE Std. 100-1984. *IEEE Standard Dictionary of Electrical Terms, ANSI/IEEE Std.* USA: John Wiley & Sons, 1984, pág. 107.
- [3] C. Chey, J. Parry. *Managing Transients in Control IC Driven Power Stages*. Inf. téc. DT 97-3. El Segundo, California: International Rectifier, 2003.
- [4] D. W. Hart. *Power Electronics*. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2011.
- [5] G. Tomasello. *Advanced BLDC Motor Drive and Control*. Disponible en https://www.st.com/content/dam/technology-tour-2017/session-2_track-6_advanced-bldc-motor-drive.pdf (11/06/2019). 2017.
- [6] International Rectifier. *HV Floating MOS-Gate Driver IC's*. Inf. téc. AN-978. El Segundo, California: International Rectifier, 2007.
- [7] J. Adams. *Bootstrap Component Selection For Control IC's*. Inf. téc. DT 98-2a. El Segundo, California: International Rectifier, 2001.
- [8] J. Shiao. «Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives». Tesis de maestría. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute y the State University, 2003.
- [9] Microchip. *PIC18F2331/PIC18F2431/PIC18F4331/PIC18F4431 Data Sheet*. Inf. téc. Microchip Technology Inc., 2010.
- [10] NEMA. *Motion/position Control Motors and Controls, MG7-1987*. USA: National Electrical Manufacturers Association, 1987.

- [11] P. C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 3.^a ed. Nueva York,USA: Wiley, 2014.
- [12] P. Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Inf. téc. AN885. Microchip Technology Inc., 2003.
- [13] R. Valentine. *Motor Control Electronic Handbook*. Nueva York,USA: McGraw-Hill, 1998.
- [14] R.W. Erickson, D. Maksimović. *Fundamentals of Power Electronics*. Springer US.
- [15] S. Franco. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*. Nueva York,USA: McGraw-Hill Education, 2015.