

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Diseño e implementación de un inversor trifásico
para un motor BLCD**

TRABAJO RECEPCIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADOS EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTAN

**SAÚL RÍOS GONZÁLEZ
RICARDO ALBERTO SOLÍS ESTRADA**

Director del trabajo recepcional

M. en I. Amaranto de Jesús Dávila Jáuregui

Ciudad de México, diciembre de 2016.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos

Agradecemos ampliamente a la UACM por abrirnos sus puertas y formar parte de la misma, darnos la oportunidad de crecer como personas al hacer nuestras mentes más críticas y analíticas, asimismo, más profesionales. Esta institución nos ha dotado de conocimiento para beneficio de nuestro país y poder aportar soluciones desde otro enfoque. Gracias a la UACM recibimos el apoyo para la impresión y empastado de nuestra tesis.

Gracias a nuestro director Amaranto Dávila Jáuregui de tesis que estuvo apoyando y gestionando directamente nuestro trabajo.

Gracias al laboratorio de Innovación y Desarrollo Tecnológico del plantel San Lorenzo Tezonco por proporcionarnos las herramientas electrónicas y mecánicas para la realización de este proyecto.

A mis profesores Ing. Manuel Alberto Soriano Ávila, MI. Christian Vázquez Villanueva, MI. Fermi Vázquez Villanueva, MI. Agustín Ortiz Castro por formar parte de la lectura y corrección de nuestro trabajo.

Agradezco al destino por darme la oportunidad de formar parte de la UACM, conocer un horizonte nuevo y el poder de ver al mundo desde otro vértice.

A mis padres, esposa y familia, que me apoyaron todo este tiempo, gracias a su cariño, consejos y comprensión he logrado una meta más en mí vida.

A mí profesor y amigo Ing. Amaranto de Jesús Dávila Jáuregui que me apoyo con las cosas básicas e indispensables para la realización de este trabajo.

A mí compañero y amigo Ricardo A. Solís Estrada por formar parte de esta gran aventura y por su comprensión.

A la familia Calleja por el diseño y construcción del simulador de carga que forma parte de este proyecto.

Finalmente agradezco a mis amigos en especial a los que formaron parte del laboratorio (B114) y profesores por los mejores momentos de mi vida en esta universidad, aprendimos juntos que “nada humano nos es ajeno” y que podemos tomar de este mundo lo que deseamos con esfuerzo y dedicación.

Atte.: Saúl Ríos González

Dedico este trabajo a mis padres Ing. Genaro Solís Carbajal y Lourdes Eugenia Estrada Gómez que gracias a su paciencia, comprensión, amor y apoyo he logrado concluir mi carrera profesional, gracias a sus consejos sigo esforzándome por seguir creciendo en lo personal y profesional. Les agradezco infinitamente por su amor y cariño, los amo.

A mis hermanos que en todo momento me escucharon y apoyaron para concluir mi carrera profesional.

A mi compañero de tesis Saúl Ríos González que en todo momento tuve su apoyo para la finalización este proyecto.

Agradezco a mi director de tesis Amaranto de Jesús Dávila Jáuregui, por su orientación, esfuerzo, dedicación y ayuda que me brindo para la realización de este trabajo.

A mis compañeros del aula B-114 que siempre estuvieron presentes con risas, aventuras y apoyo haciendo ameno el tiempo.

A todos mis compañeros de la universidad que estuvieron a mi lado en este proceso, que me dejaron muchas cosas buenas. Gracias a todos.

A mis profesores de la licenciatura de ingeniería en sistemas electrónicos industriales, que día a día me compartían sus conocimientos.

Atte. Ricardo Alberto Solís Estrada

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un inversor trifásico mediante una técnica experimental, para un motor sin escobillas de corriente directa BLCD (Brushless Direct Current), marca SUNRISE, modelo 70BLS3A60, (fotografías del motor en el apéndice 1) con las siguientes características:

Voltaje: 24 Volts in-runner
Par: 0.5Nm
Corriente nominal: 8.8A
Velocidad: 3000RPM
Sensores tipo Hall
Encoder incremental: 1000CPR

Datos Nominales del motor BLCD.

El motor BLCD es una máquina eléctrica síncrona de conmutación electrónica ya que como su nombre lo indica no tiene las escobillas que se utilizan en motores de corriente directa convencionales, para reemplazar a éstas se utiliza un inversor trifásico el cual garantiza la alimentación a los bobinados del motor, tomando como dato primario la posición angular del rotor en todo momento.

El inversor trifásico es un sistema integral compuesto por tres bloques, el primero de ellos lee posición angular rotórica del BLCD, que es proporcionada por sensores de efecto Hall, los datos obtenidos son enviados al segundo bloque que procesa la información para generar señales PWM, éstas señales excitan al tercer bloque de electrónica de potencia, el cual produce la señal trifásica con la potencia necesaria para alimentar al BLCD.

Los motores BLCD se utilizan en diversos sectores industriales debido a que su arquitectura es ideal para aplicaciones robustas, ya que requiere un mínimo mantenimiento al no tener escobillas, tienen prolongada vida útil y una buena disipación de calor, además alcanza una eficiencia del 90% en el aprovechamiento de la energía eléctrica y su conversión en potencia mecánica generando menos calor (maxonmotor.es, 2007). Algunas áreas de aplicación de los motores BLCD las podemos encontrar en industrias como la medicina, aeromodelismo, construcción, automotriz, así como, equipos de automatización e instrumentación, entre otros.

3.3.1	Sensores tipo Hall y sus rangos de sensado.....	24
3.3.2	Generación de campo magnético en una bobina.....	25
3.3.3	Desarrollo de los seis pasos de la técnica trapezoidal.....	26
4	DISEÑO DEL INVERSOR TRIFASICO.....	35
4.1	Microcontrolador.....	36
4.1.1	software de activación.....	39
4.2	Etapas de excitación.....	41
4.3	Puente Trifásico.....	44
4.4	Costo del proyecto.....	46
5	PRUEBAS DEL SISTEMA.....	47
5.1	Adquisición de datos y Resultados de las pruebas aplicadas al inversor trifásico para el motor BLCD.....	47
5.2	Respuesta del motor BLCD ante una entrada escalón.....	53
6	CONCLUSIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	Apéndice I TABLAS Y DIARAMAS.....	63
	Apéndice II Programa del dsPIC30F4011 en C.....	70

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Gracias a que los generadores de corriente directa (CD) son máquinas eléctricas reversibles se abrió paso a la fabricación de motores de corriente directa (CD) y a la sustitución de sistemas mecánicos por sistemas electromecánicos, con este descubrimiento se revolucionó la industria y la manufactura.

Una vez conocido el principio de reversibilidad de los generadores de CD la aplicación de los motores eléctricos se dio en diversas áreas industriales y de tracción, el motor de CD evolucionó con la llegada del motor de corriente alterna (CA) bajo el principio del campo magnético giratorio. Los motores de CA fueron desplazando con el tiempo a los motores de CD en algunos sectores industriales gracias a su fácil aplicación y ventajas como bajo mantenimiento y costo de fabricación.

Lo que permitió que los motores de CD siguieran vigentes fue su facilidad de diseño y simplicidad en la implementación de controladores de velocidad y posición. Los motores de CD convencionales generan más calor debido a que existe rozamiento de las escobillas y el conmutador, provocando fricción y arcos de corriente entre estas partes, así como, desgaste en el conmutador y en las delgas, lo que lleva a tener un calendario de mantenimiento más riguroso. Buscando una solución a esto, surgieron los motores BLCD (Brushless Direct Current), los cuales no presentan estos problemas ya que son de *conmutación electrónica*.

Los motores BLCD ofrecen múltiples ventajas sobre otros motores eléctricos, tales como la inexistente caída de tensión (pérdida de energía) entre las escobillas y el conmutador, bajo ruido mecánico, mayor tiempo de duración y mejor eficiencia.

La conmutación electrónica consiste en reemplazar el sistema mecánico conmutador-escobillas por la conexión y desconexión de transistores de potencia bajo el control de señales generalmente de tipo digital o analógicas de baja potencia. El inversor trifásico es el que realiza la conmutación electrónica para energizar los bobinados del motor y convertir así la energía eléctrica en mecánica, en éste el procesamiento de señales mediante electrónica analógica y digital de baja potencia se utiliza para cumplir con los objetivos de control y conversión deseados, y la electrónica de potencia que se define como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica, activa los bobinados del motor con la corriente necesaria para finalmente transformar la energía eléctrica en mecánica.

La potencia de procesamiento que han alcanzado actualmente los sistemas digitales basados en microprocesadores como los microcontroladores, controladores digitales de señales, procesadores digitales de señales, etc. y la adición a éstos de módulos especializados para la adquisición y generación de señales para el control de motores hacen una perfecta combinación con la electrónica de potencia para diseñar controladores para motores de elevada potencia. Haciendo una analogía y comparativa con el cuerpo humano se podría decir que la electrónica de potencia que utiliza semiconductores de potencia puede compararse con el músculo, y la electrónica digital que utiliza semiconductores lógicos de baja potencia tiene el poder y la inteligencia del cerebro.

El motor BLCD es una máquina eléctrica síncrona de conmutación electrónica carente del sistema colector-escobillas de campo magnético permanente generalmente compuesto de imanes Neodimio instalados en el rotor y el bobinado en el estator, existen dos tipos de motor BLCD, los in-runner (**Figura 1.2**) y los out-runner (**Figura 1.1**). En los out-runner el rotor queda expuesto generalmente en una carcasa y los in-runner el rotor es una flecha interna como en los motores convencionales.

En la figura 1.1 se muestra de manera simplificada las partes de un motor BLCD out-runner de izquierda a derecha se tienen los imanes de Neodimio (Nd) en la carcasa o rotor, este motor contiene 6 polos, que se puede verificar contando el número de pares de Neodimio

(Nd) y 9 bobinas en el estator.

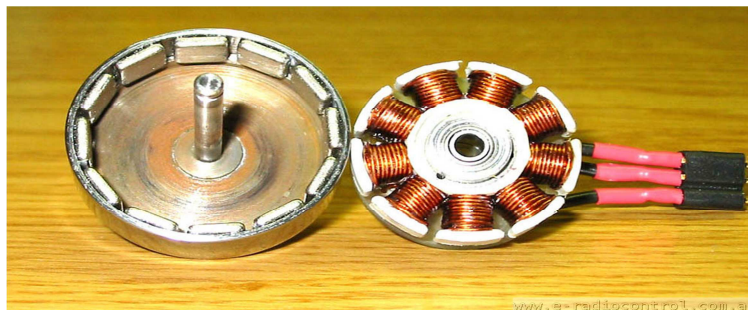


Figura 1.1 Partes de un motor BLCD out-runner (Quadrino, 2016)

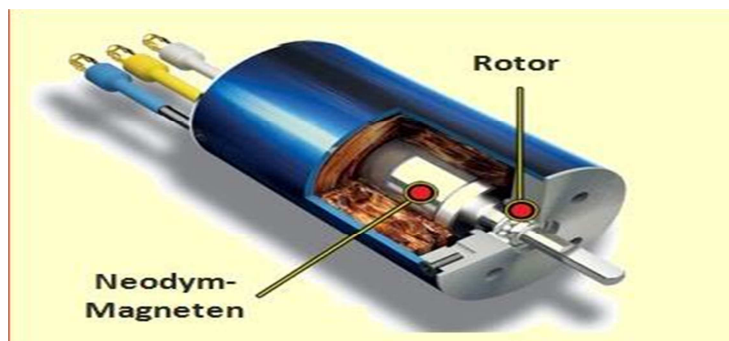


Figura 1.2 Motor BLCD in-runner.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad los altos costos en la generación de energía y la búsqueda de tecnologías limpias promueve el uso de motores eléctricos con mayor eficiencia que sean rentables para las industrias, sobre todo los motores utilizados para aplicaciones móviles alimentados por baterías, como es el caso de los motores de vehículos eléctricos. El motor BLCD es una alternativa con características superiores en cuanto a eficiencia y desempeño comparado

con un motor de corriente directa convencional, pues ofrece las prestaciones de un motor trifásico pero alimentado por CD, lo cual lo hace ideal para su uso en sistemas móviles, ya que se puede utilizar como fuente de energía un banco de baterías.

Debido a la tendencia cada vez más creciente en el uso de este tipo de motores en toda clase de productos industriales y de consumo es imperativo que en México se lleven a cabo investigaciones y desarrollos que permitan conocer el funcionamiento y control de los motores BLCD ya que es una tecnología que estará presente cada vez más en nuestra vida diaria y no podemos quedar relegados y depender tecnológicamente de economías extranjeras.

1.2 Objetivo.

Diseñar e implementar un inversor trifásico con arquitectura abierta para la experimentación y desarrollo de distintas técnicas de activación de motores BLCD.

1.2.1 Objetivos Particulares.

- Identificar la arquitectura y funcionamiento de los motores Brushless.
- Diseñar un inversor trifásico experimental que se adapte a las necesidades del BLCD.
- Identificar y aplicar la técnica de activación trapezoidal.
- Diseñar y construir un simulador de carga aplicada al motor.
- Experimentar con el diseño obtenido para observar variables como corriente, torque y velocidad, con ayuda de un simulador de carga.

1.3 Justificación

Los motores más comunes en las industrias móviles son los que funcionan con CD, a pasos, con escobillas (Brushsed) y sin escobillas (Brushless). Cada motor requiere de cierto tipo de alimentación para producir movimiento angular en sus rotores *“Transformar la energía eléctrica en energía mecánica”*. El control de un motor conlleva transformar la energía de la fuente de alimentación para controlar la variable deseada, variables angulares como el posicionamiento, velocidad, aceleración y desaceleración. La mayoría de los motores son

operados durante circunstancias transitorias, las herramientas de control de motores se tienen que adaptar a cargas y condiciones dinámicas diferentes, lo cual requiere de un procesamiento complejo de algoritmos de control e información del sistema mecánico.

Como se mencionó anteriormente en la actualidad los elevados índices de contaminación y costos de combustible han orillado a la industria automotriz y del transporte a buscar energías limpias y menos costosas, es por esto que aumenta la sustitución de motores de combustión interna por motores eléctricos en automóviles, motocicletas, bicicletas, direcciones automotrices asistidas y aeronaves de uso personal. El equipamiento de este tipo de sistemas móviles requiere que tenga las prestaciones de un motor trifásico alimentado con corriente directa (CD), ya que el mantenimiento de estas máquinas electricas es menor que uno de CD convencional, lo cual es una tarea perfecta para los motores BLCD. El estudio sobre el principio de operación del motor BLCD y el desarrollo de su inversor, permitirá tener un primer acercamiento a esta tecnología que en un futuro próximo sera muy común encontrar, lo que nos dará un primer acercamiento y una ventaja competitiva en el desarrollo de este tipo de sistemas.

1.4 Metodología

En este proyecto se utiliza la experimentación para describir el funcionamiento de los motores BLCD y así poder diseñar un inversor trifásico, el cual incluye un puente trifásico y un sistema embebido basado en un controlador digital de señales dsPIC, que implementa la técnica de activación trapezoidal.

Se realizaran las siguientes tareas.

- Investigación de los motores BLCD, su aplicación y funcionamiento.
- Experimentación con la estructura interna del motor BLCD para describir y verificar su principio de operación.
- Investigación sobre las diferentes técnicas de activación, para la puesta en marcha de motores BLCD.
- Desarrollo del inversor trifásico para la activación del motor BLCD, esto conlleva a la investigación de los dispositivos de potencia, acondicionamiento de señales, su funcionamiento y excitación.

- La investigación sobre microcontroladores especializados para el control de motores para implementar el software de activación.
- El diseño de un sistema de aplicación de torque al rotor del BLCD para experimentar y observar el desempeño del motor con el inversor trifásico.

1.5 Alcances y limitaciones

El objetivo de este trabajo de tesis es la adquisición de conocimiento y experiencia en cuanto al funcionamiento de un motor BLCD mediante la experimentación. Existen tres técnicas de control; senoidal, vectorial y trapezoidal, las cuales se comentaran brevemente las dos primeras y se desarrollará la tercera. Se realizará un inversor trifásico que genere la señal trifásica trapezoidal, por medio de un algoritmo de control en lenguaje C y programado en un DsPIC.

El inversor realizará la adquisición de las señales digitales de posición, generara las señales PWM, y estas excitaran al puente trifásico que alimentará al BLCD. Se propone un diseño de arquitectura abierta que permita modificar variables importantes como velocidad, cambiar el sentido de giro, frenado, etc., asimismo, ahondar en la experimentación de controladores y evaluación del comportamiento de los motores.

Capítulo 2

ANTECEDENTES DEL MOTOR BLCD

2.1 Reseña histórica

“El motor eléctrico surge en el siglo XIX con el concepto de **máquina eléctrica** de corriente continua (CC), desde entonces ha ido evolucionando con el desarrollo de las **nuevas tecnologías**, permitiendo adaptar su uso a las necesidades de tiempos actuales. Su empleo ha incrementado debido al interés en la implementación de tecnologías limpias, que no contaminen el medio ambiente, factor de suma importancia en la actualidad. La evolución del motor de CC fue el motor de corriente alterna (CA)” (Basanta, A. N. 2002). Los motores de corriente alterna se dividen en tres clases, de inducción, síncronos y universales (CD devanados serie), la característica principal de estos motores se encuentra en el devanado de armadura y que su inducido se encuentra en el estator, también llamado devanado estático. Un motor de CA no resulta viable en la aplicación de sistemas donde se requiera que la toma de energía sea transportable, asimismo, sistemas donde se exigen estrechas dimensiones, entre otros, es por ello que se buscan alternativas como el motor BLCD. Fue

gracias a la Company's thyristor devices, quienes lo presentaron en 1962 cuando T.G Wilson y P.H Trickey lo dieron a conocer como “una máquina de corriente continua con conmutación de estado sólido”, un elemento clave de los motores BLCD es que no tienen escobillas (Brushless) como los motores de CD convencionales.

2.1.1 Desarrollo

En este capítulo se explica brevemente la naturaleza y funcionamiento de tres máquinas eléctricas que integran el concepto del motor BLCD, esto con ayuda de dos tipos de motor BLCD, que incrementa la idea que hasta aquí se tiene del mismo.

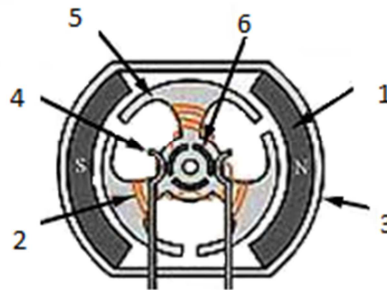


Figura 2.1 Partes de un motor de CD de imanes permanentes.

La **Figura 2.1** se presentan las partes relevantes de una maquina eléctrica así como su descripción.

1. Campo o inductor: consta de imanes permanentes o electroimanes que inducen un campo magnético constante desde el estator a las espiras del rotor ocasionado el principio de atracción y repulsión magnética entre rotor y estator, generando un movimiento angular en el rotor.

2.- Armadura o inducido: este se encuentra en el rotor el cual contiene un laminado dentado donde están instaladas las espiras, estas son alimentadas por el conmutador o delgas para el principio de atracción y repulsión magnética.

3.- Carcasa: o housing (alojamiento) del motor donde se alojan todas las partes del estátor.

4.- Escobillas: son las responsables de transmitir la energía eléctrica entre el inductor (imanes permanentes) e inducido (espiras).

5.- Rotor: es el componente en el cual se aprecia la producción de movimiento angular mecánico apoyado en cada extremo de la carcasa por rodamientos y está compuesta de los puntos 2 y 6.

6.- Conmutador o delgas: es un anillo compuesto de láminas de cobre montadas en un extremo del rotor el cual coincide eléctrica y geoméricamente en todo momento angular con las escobillas que se encuentran montadas a un extremo de la carcasa del motor.

2.2 Motor de corriente directa de imanes permanentes

La característica principal del motor de CD de imán permanente es que el campo magnético del estator es producido por imanes permanentes no por electroimanes, lo cual facilita su construcción y ofrece algunos beneficios como reducción de tamaño, su construcción puede ser más económica que su contraparte, el motor de devanado (motor de CD de rotor devanado), y no requiere de un sistema de disipación de calor y excitación externa.

Esto imanes corren el riesgo de desmagnetización debido a las altas corrientes en el devanado del rotor, en otras palabras, el sobrecalentamiento desmagnetiza al imán. Además están limitados en cuanto a la densidad de flujo magnético que pueden producir dichos imanes. Sin embargo, se han desarrollado nuevos materiales como el neodimio (Nd) y sumario-cobalto, dichos materiales han aumentado la potencia y prestaciones de estos motores.

La **Figura 2.1** muestra una vista de un motor de CD de imán permanente en el cual se aprecia los imanes permanentes que forman parte del estator o carcasa y en el rotor se encuentran las espiras colocadas en los laminados con su respectivo conmutador.

El comportamiento del motor de CD de imanes permanentes es descrito por la siguiente ecuación 2.1 y apoyado de la **Figura 2.2**:

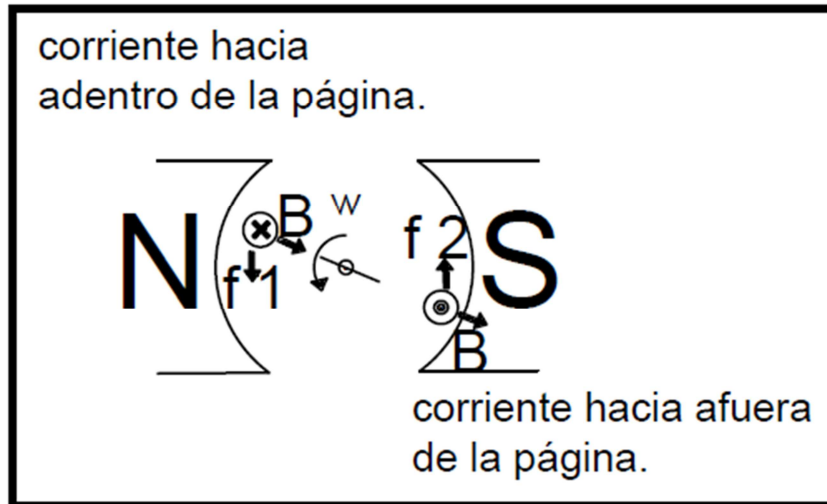


Figura 2.2 Espira vista de frente, la cual muestra las fuerzas resultantes F1 y F2 al circular corriente por ella y estar sumergida en un campo magnético B.

$$F = i(lxB) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde:

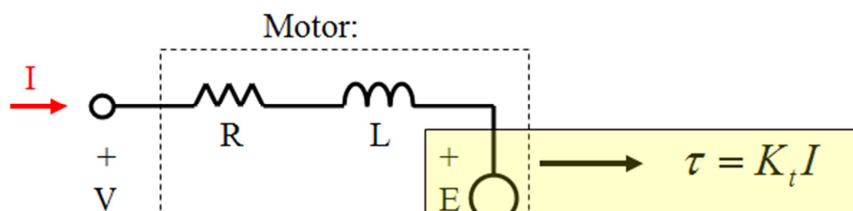
i: es la corriente que circula en la espira.

l: es la longitud del segmento de la espira.

B: es el flujo magnético.

La velocidad de estas máquinas está relacionada con su alimentación de voltaje, comportamiento asociado con la **Ecuación 2.1**, la cual muestra que la fuerza F depende de la intensidad de corriente que circula por sus espiras , ya que el campo magnético B es constante. Por otro lado la velocidad y torque de estas máquinas está relacionada por su alimentación de voltaje y una constante de proporcionalidad K_t , la cual está dada en torque por unidad de corriente y es otorgada por el fabricante, como podemos observar el torque que puede otorgar esta máquina depende mucho de K_t . El modelado electromecánico de esta máquina

observar en



se puede
la **Figura 2.3**.

Figura 2.3 Modelo electromecánico de un motor de CD con imanes permanentes, contiene un transformador ideal con un resistor y un inductor en serie. (Colton, 2010)

Donde:

τ : es el torque que produce la máquina.

ω : es velocidad angular.

E : es el voltaje.

R : resistencia de la máquina.

L : inductancia de la máquina. V : voltaje de alimentación

2.3 Motor de CD con rotor devanado

La característica principal de este motor se encuentra en que el rotor y el estator contienen devanados en su construcción, concluyendo que no existen imanes permanentes en dicha arquitectura y que es necesario alimentar al bobinado del estator (**Figura 2.4 y 2.5**). Requiere de un sistema de enfriamiento para disipar el calor producido por el flujo de corriente en los bobinados del estator, con la desventaja que son voluminosos, en algunas ocasiones su construcción no es económica. Al no tener imanes permanentes no corre riesgo desmagnetización ya que estos son remplazados por bobinados.

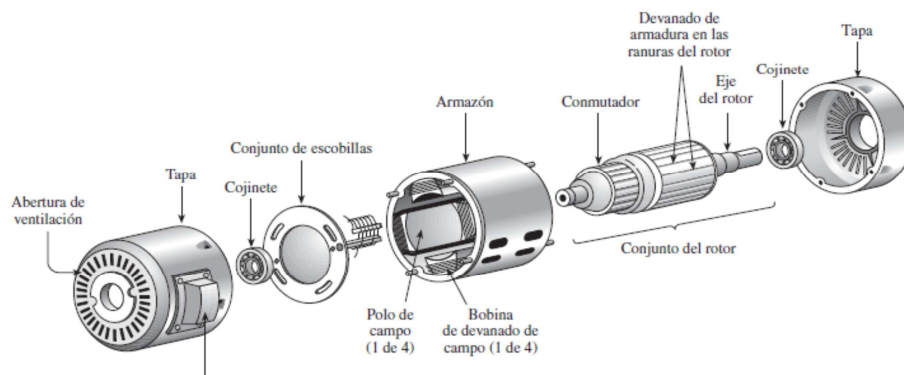


Figura 2.4 Partes esenciales de CD con rotor devanado (Maloney, 2006)

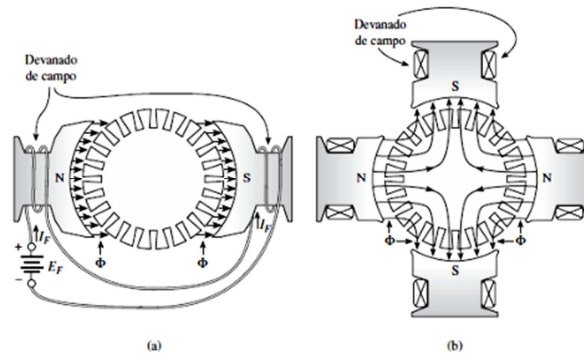


Figura 2.5 En esta imagen se muestran las distribuciones del flujo electromagnético en dos y cuatro polos a y b respectivamente (Maloney, 2006)

El comportamiento del motor de CD de imanes permanentes es descrito por las **Ecuaciones 2.2 y 2.3** apoyado de las **Figuras 2.4 y 2.5**:

$$F = i_R(l_R \times B_E) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.2}$$

Donde B_E del estator es producido por un electroimán descrito por:

$$B_E = \frac{m i_E N}{L_E} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- i_R : es la corriente que circula en la espira del rotor.
- l_R : es la longitud del segmento de la espira del rotor.
- i_E : es la corriente que circula en la espira del estator.
- L_E : es la longitud del segmento de la espira del estator.

2.4 Motor síncrono de CA

La característica principal de la máquina de corriente alterna síncrona es que la velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia y tensión de la alimentación, así como también, del número de pares de polos del motor, siendo esto conocido como “velocidad de

sincronismo”. Estos motores se encuentran en aplicaciones industriales en las que se exige velocidad constante trabajando bajo el principio de campo magnético giratorio pero ahora con imanes permanentes en el rotor.

La razón por la cual se llama motor síncrono es porque los imanes del rotor giran a una velocidad constante síncrona con la rotación eléctrica del campo magnético. Una desventaja es cuando la carga del motor se incrementa exponencialmente y el motor pierde sincronía, en otras palabras, queda fuera de sincronización.

Por otro lado la diferencia entre el motor BLCD y el motor de CA consiste sólo en la definición pensando en que el primero necesita el inversor, ya que el sistema que produce torque en ambos es el mismo, sólo podría variar ligeramente en potencia promedio e instantánea, con un ligero rizado de torque.

2.5 Motor BLCD inrunner y outrunner

Identificando los motores de CD y CA en los puntos anteriores se realiza un análisis del motor BLCD y sus analogías dependiendo de su arquitectura ya sea inrunner u outrunner.

Los inrunner desarrollan su torque a velocidades muy altas, en este tipo de motores su elemento móvil angular es el eje de rotación, sobre el cual se encuentran instalados los imanes permanentes, para hacer una analogía de este motor con uno de CD de devanados hay que tener en cuenta que la producción de campo magnético “B” es realizada por bobinas, lo cual se asemeja al motor BLCD inrunner, porque este tiene el bobinado en la carcasa. Si al motor de CD de devanados se modifica cambiando el rotor de bobinados por un rotor de imanes permanentes y anulando el sistema mecánico de cepillado, se puede obtener un motor un BLCD inrunner. Teniendo en cuenta que esta modificación sigue siendo una maquina síncrona.

Los outrunner (**Figura 1.1**) son motores BLCD que desarrollan su torque máximo a velocidades más bajas a diferencia del motor inrunner. En estos los imanes permanentes están instalados en la carcasa externa del motor como en los motores de CD de imanes permanentes. Si modificamos este motor invirtiendo el concepto de rotor y estator, en otras palabras, ahora el estator sería el rotor y el rotor sería el estator, asimismo, eliminando el

sistema de cepillado tendríamos un motor BLCD outrunner, tomando en cuenta que esta modificación sigue siendo una maquina síncrona.

Es necesario mencionar que las máquinas de CD y CA son similares, ya que en ambas en su interior circula CA, por otro lado las máquinas de CD tienen solo alimentación de CD en el exterior ya que el colector o conmutación electrónica convierte la CD en CA.

Por otro lado la diferencia entre el motor BLCD y el motor de CA consiste sólo en la definición, pensando en que el primero necesita el inversor, ya que el sistema que produce torque en ambos es el mismo, sólo podría variar ligeramente en potencia promedio e instantánea, con un ligero rizado de torque, por lo tanto, el modelo electromecánico de estas dos máquinas es el mismo **(Figura 2.6)**.

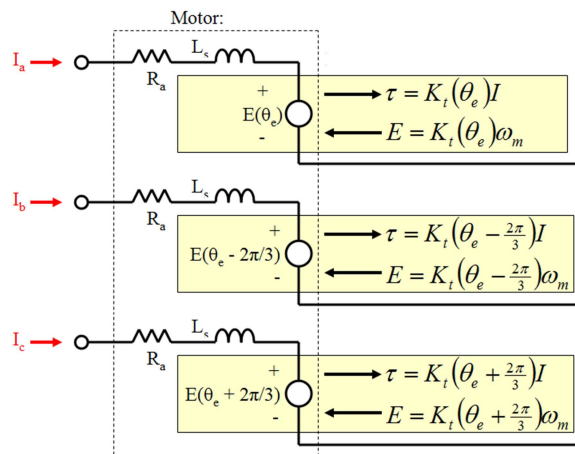


Figura 2.6 Modelo electromecánico de los motores de CA síncrono y BLCD

T: es el torque que produce la máquina.

ω : es velocidad angular.

E : es el voltaje.

R: resistencia de la máquina.

L: inductancia de la máquina.

V: voltaje de alimentación.

θ_e : grados eléctricos.

Capítulo 3

ACTIVACIÓN DE MOTORES BLCD

Existen tres técnicas de activación para un motor BLCD: senoidal, vectorial y trapezoidal. En este capítulo se describe y se desarrolla ampliamente la técnica trapezoidal, la cual es implementada en este proyecto. Se incluye una explicación detallada que consta de tres diagramas, los cuales muestran los rangos rotóricos de activación para cada par de bobinas y un cuarto diagrama de los rangos de los sensores Hall. La técnica de activación trapezoidal (six step mode) es una de las más usadas por ser la más económica y rápida de implementar, las dos técnicas restantes utilizan para su funcionamiento sensores de corriente, un Encoder que sustituye los sensores Hall y un software complejo que maneja mayor cantidad de variables, en el apéndice 1 se encuentra una tabla comparativa de los tres métodos.

3.1 Técnica de activación senoidal.

La técnica de activación senoidal es más avanzada y exacta que la trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente. Esta continuidad se consigue aplicando simultáneamente tres corrientes senoidales desfasadas 120° a los tres bobinados del motor, en las fases de estas corrientes se escoge que la forma del vector de corriente resultante siempre esté en cuadratura con la orientación del rotor y tenga un valor constante, como consecuencia de este procedimiento se obtiene un par más preciso y sin el rizado típico de la conmutación trapezoidal, no obstante, para poder generar dicha modulación senoidal es necesaria una medida precisa de la posición del rotor. Debido a que

los sensores de efecto Hall sólo proporcionan una posición aproximada, es necesario el uso de otro dispositivo que aporte mayor precisión angular, como puede ser un Encoder. (Brown, 2002) La **Figura 3.1** muestra un diagrama de bloques típico de un control de activación senoidal.

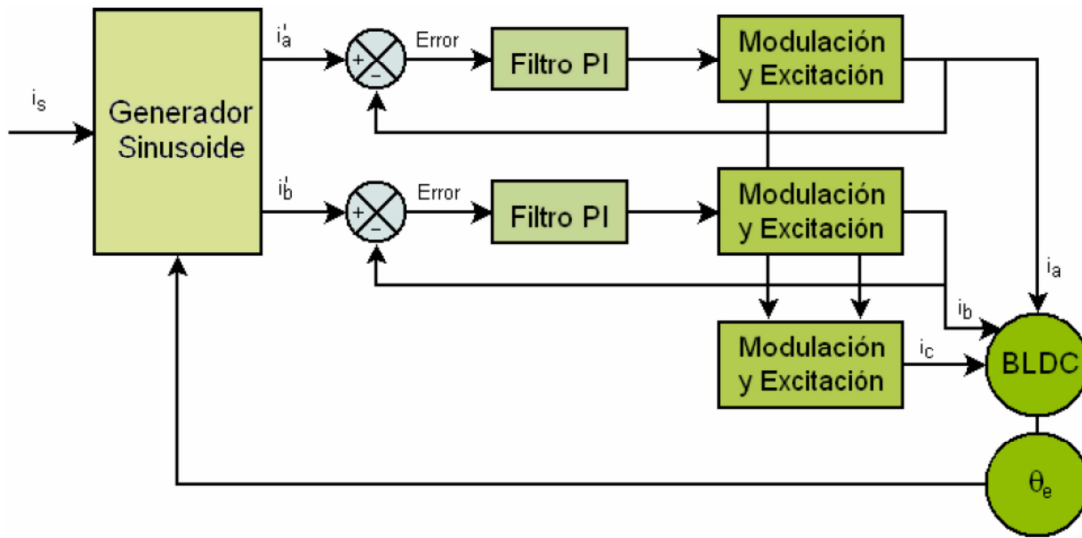


Figura 3.1 Diagrama de bloques para un control senoidal. (Brown, 2002)

Según la ley de Kirchoff, la suma de las tres corrientes entrantes a un nodo es igual al valor negativo de la tercera, o lo que es lo mismo, la tercera corriente no puede ser controlada de forma independiente, lo cual se representa en las siguientes ecuaciones:

$$i_a = i_s x \sin(\theta_c) \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$i_b = i_s x \sin(\theta_c - 120^\circ) \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.2}$$

$$i_c = i_s x \sin(\theta_c - 240^\circ) = -(i_a + i_b) \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.3}$$

Con la información de la posición del rotor proporcionada por el Encoder, se sintetizan las dos señales senoidales deseadas, estas son comparadas con las medidas de las corrientes que circulan por el motor y el error resultante aplicado a dos filtros PI que intentan corregir las desviaciones. La activación senoidal soluciona los problemas de eficiencia que presenta la activación trapezoidal. Sin embargo, presenta problemas a altas velocidades de rotación del motor debido a la limitación frecuencial del bucle de corriente (Filtro PI). A mayor velocidad de rotación, mayor error, por lo tanto, mayor la desalineación entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura del rotor, este hecho provoca una progresiva disminución de par del motor, para mantener el par constante se necesita aumentar la corriente que circula por el motor provocando una disminución de la eficiencia, el deterioro de la eficiencia aumenta al incrementar la velocidad hasta llegar a un punto en el que el desfase entre el vector de corriente y la dirección de cuadratura puede llegar a 90° , produciendo un par para el motor completamente nulo. (Brown, 2002)

3.2 Técnica de activación vectorial

La técnica de activación vectorial es la más compleja, ya que requiere mayor potencia de cálculo comparada con la técnica de activación senoidal y trapezoidal. El problema principal que presenta la activación senoidal es que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo al aumentar la velocidad del motor, por tanto en la frecuencia de corrientes empiezan a aparecer problemas [como sonidos y problemas de giro en el eje del motor]. La técnica vectorial soluciona el problema controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q. Dicho espacio de referencia está normalmente alineado con el rotor de forma que permite que el control de flujo y el par del motor se realicen de forma independiente. (Brown, 2002)

La componente directa permite controlar el flujo y la componente en cuadratura del par. Debido a que el vector de corrientes en el espacio de referencia D-Q es

estático los filtros PI trabajan con corriente continua y se eliminan por lo tanto los problemas frecuenciales de la activación senoidal. Para poder realizar este control es necesario transformar matemáticamente las medidas de las tres corrientes referidas al espacio estático de las bobinas del motor al espacio rotacional D-Q. Aunque esta transformación puede implementarse en un único paso educacionalmente se divide en dos transformaciones llamadas transformada de Clarke y transformada de Park. (Brown, 2002)

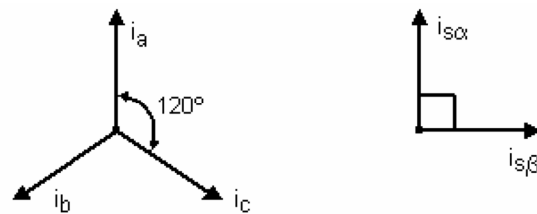


Figura 3.2 Transformada de Clarke- Transformación de un sistema de tres fases equiespaciados (a, b, c) trasladando a uno de dos fases ortogonales (α, β)

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\varphi & \cos 2\theta_c \\ 0 & \sin\varphi & \cos\theta_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.4}$$

Transformada de *Park* – Transformación de un sistema ortogonal estacionario (α, β) a uno rotacional trasladado en (d, q).

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.5}$$

“Igual que en la activación senoidal, es importante conocer la posición del rotor con exactitud. Un error en la estimación de posición provocará que la componente directa (CD) y la componente cuadratura (del par) no estén totalmente desacopladas. Una vez aplicadas las dos transformaciones el control del motor se simplifica considerablemente. Dos filtros PI son utilizados para controlar la componente directa (CD), y la cuadratura de forma independiente. La componente en cuadratura es la única que proporciona par útil, por tanto, la referencia de la componente directa suele fijarse a cero. De esta forma se fuerza al vector de corrientes a situarse en la

dirección de la componente de cuadratura, maximizando la eficiencia del sistema". (Brown, 2002)

Posteriormente se realizan las transformaciones inversas para regresar al espacio estacionario de las bobinas y se aplica la excitación correspondiente a cada una de las fases mediante modulación [para generar las señales adecuadas]. Se muestra un diagrama de bloques del control vectorial (**Figura 3.2**).

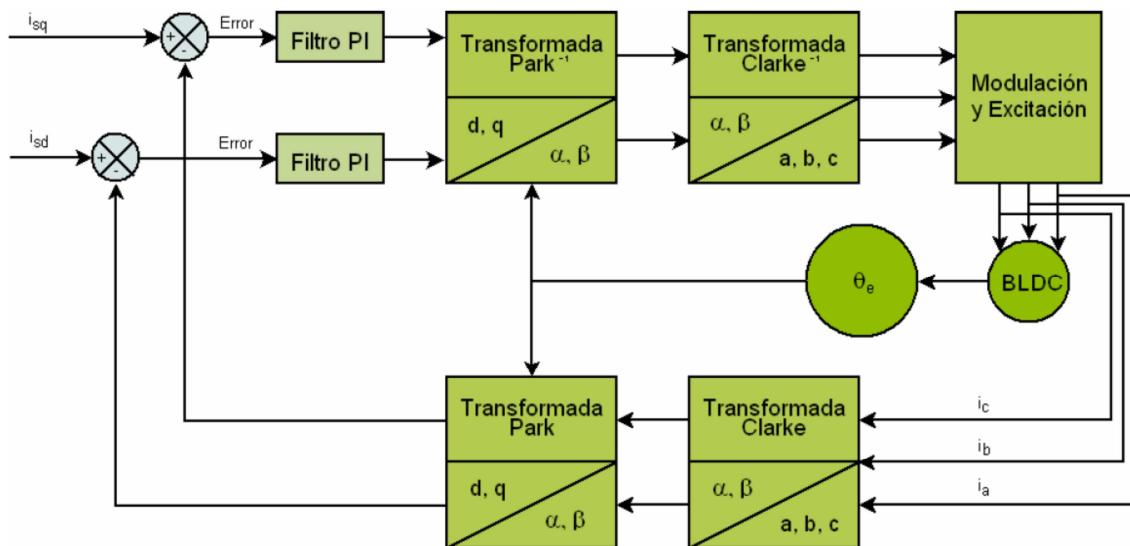


Figura 3.2 Diagrama de bloques para el control vectorial (Brown, 2002)

El control vectorial mantiene las mismas características de par que la conmutación senoidal pero eliminando la limitación frecuencial [que causa distorsiones en el giro del rotor del motor]. (Brown, 2002)

3.3 Técnica de activación trapezoidal

Uno de los métodos más simples de activación es la **activación trapezoidal** o seis modos de paso. En este esquema se controla la corriente que circula por las terminales del motor, excitando un par de bobinas y manteniendo la tercera bobina desconectada, sucesivamente se va alternando el par de bobinas a excitar hasta completar las seis combinaciones posibles. Para llegar al desarrollo de esta técnica se describe el funcionamiento y generación de señales Hall y cómo se genera el campo magnético en una espira, en dicho motor.

3.3.1 Sensores tipo Hall y sus rangos de sensado.

Los sensores tipo Hall (inductivos, denominados así por Edwin Herbert Hall) sirven para la medición de campos magnéticos.

Si una corriente “ I ” fluye en un conductor (o semiconductor) y se aplica un campo magnético “ B ” perpendicular a dicha corriente, entonces la combinación de corriente y campo magnético genera un voltaje perpendicular a ambos “ V_H ”, este fenómeno se denomina efecto Hall. El flujo de corriente en el semiconductor se debe al movimiento de electrones a través del material, los electrones entran en la terminal positiva y se muevan hacia la negativa generando una diferencia de potencial como se muestra en la figura 3.3 El efecto Hall se usa para hacer sensores de posición lineal o angular. (Tolrá, 2003))

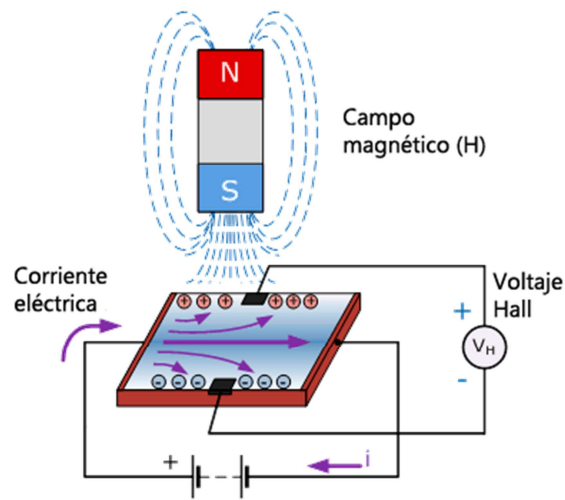


Figura 3.3 Principio del funcionamiento del sensor Hall (www.luisllamas.es, 2015)

Este principio es utilizado para sensar la posición rotórica del motor BLCD. Para esto existen tres sensores Hall distanciados 120° grados eléctricos entre sí, instalados en el estator del motor acoplados de tal forma que sensan el campo magnético cambiante del rotor cuando éste está en movimiento angular, dicha posición se transforma en una señal digital de 3 bits con seis combinaciones 001, 101, 010, 100, 110, 011 con los rangos de posición rotórica $0-15^\circ$, $15-30^\circ$, $30-45^\circ$, $45-60^\circ$, $60-75^\circ$, $75-90^\circ$ respectivamente (figura 3.4). Los rangos de activación de las bobinas y los de posición varían según el número de polos del motor BLCD que en éste caso es de 8 polos, esto se detallará más adelante. Las señales de posición rotórica ayudan al software a

conocer la posición angular del rotor y con ello desarrollar el método trapezoidal (six step mode).

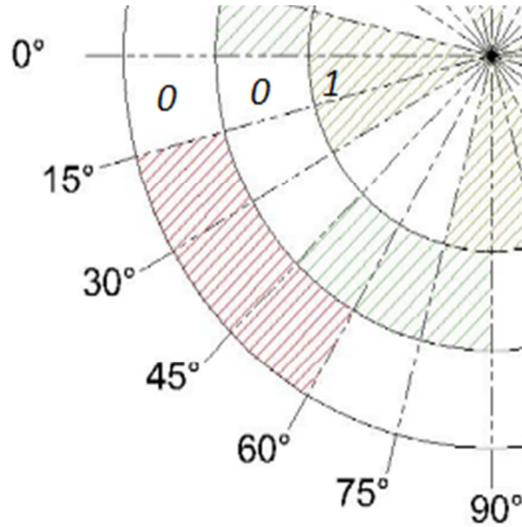


Figura 3.4 Rangos de posición rotórica de los sensores hall, 6 rangos de posición rotórica de un motor de 8 polos con un paso polar de 45°

3.3.2 Generación de campo magnético en una bobina

Para generar el campo magnético “B” en una bobina, descrita en la ecuación 3.1, la cual indica que cuando existe un flujo de corriente en sus espiras produce un campo magnético B multiplicado por un factor de permeabilidad, y que la magnitud de éste depende del número de espiras y del segmento que ocupa dicha bobina (**Figura 3.5**).

$$B = \frac{\mu Ni}{L} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.6}$$

El campo magnético “B” se compone de dos polos norte “N” y sur “S”, el polo norte se genera en el terminal positivo de la bobina y el polo sur en el terminal negativo. En la Figura 3.5 se tomó en cuenta el sentido de flujo de electrones (los electrones fluyen de un potencial eléctrico menor a uno de mayor potencial).

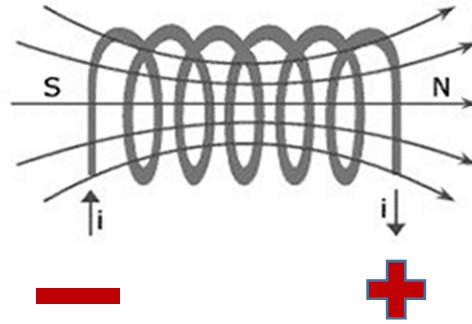


Figura 3.5 Líneas de campo magnético en una bobina EL campo magnético en cada una de sus bobinas interactúa con los imanes permanentes del motor BLCD, por el principio de atracción y repulsión magnética generando el movimiento angular por medio de la conmutación electrónica.

3.3.3 Desarrollo de los seis pasos de la técnica trapezoidal

En la Figura 3.6 se muestra un motor BLCD de dos polos y seis bobinas con su respectivo diagrama en estrella, las 6 flechas representan el sentido del flujo de corriente en cada bobina para realizar los 6 pasos, de los cuales se compone el método de activación trapezoidal. Las cuentas binarias que se encuentran en el exterior del estator corresponden a los grados de posición rotórica de los sensores Hall, así tenemos que las cuentas 100, 110, 010, 011, 001, 101 corresponden a 0-60°, 60-120°, 120-180°, 180-240°, 240-300, 300-360° respectivamente. Cabe mencionar que este motor es sólo para explicar la técnica trapezoidal ya que contiene los elementos mínimos para hacer más fácil la comprensión de dicha técnica.

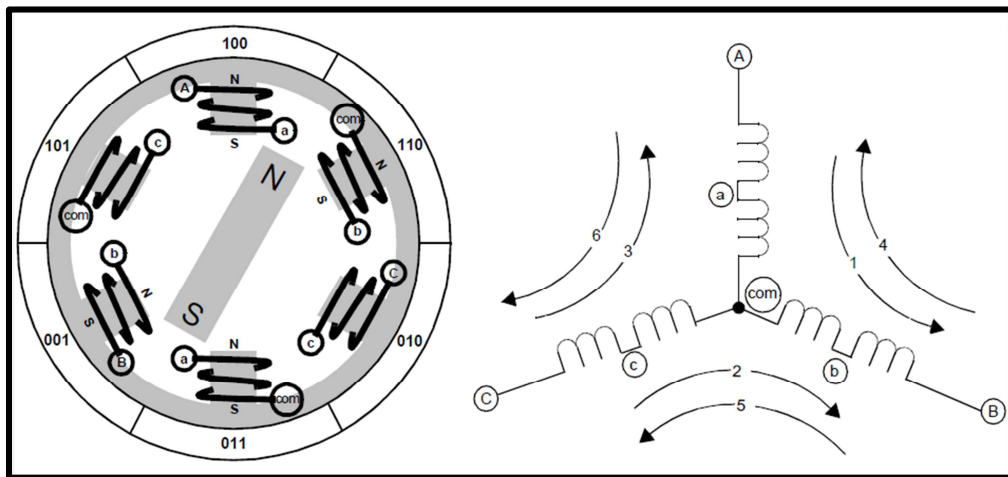


Figura 3.6 A la izquierda se muestra un diagrama de un motor BLCD de dos polos y seis bobinas con un paso fraccionado de 60° mecánicos y a la derecha se encuentran

sus bobinas con los flujos de corriente.(Brown, 2002)

Paso uno 0°60°

La Figura 3.7 corresponde al paso 1 que previamente la señal de efecto Hall marco 100 digital, la cual indica que hay que activar el terminal “A” en positivo y la terminal “B” en negativo (A||B), provocando nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

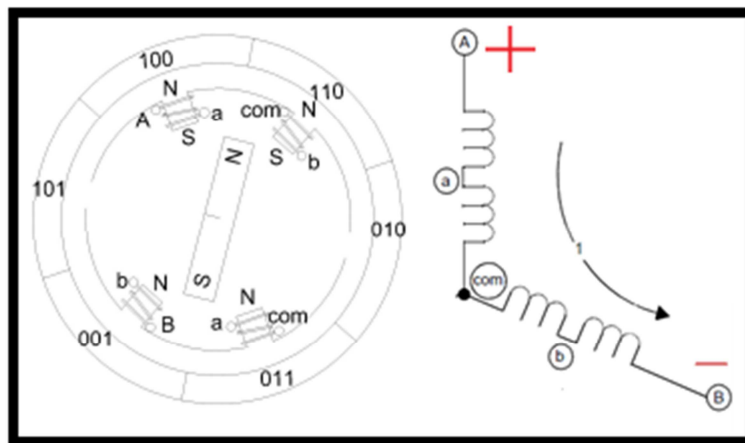


Figura 3.7 Flujo de corriente en las bobinas A || B

Paso dos 60-120°

La Figura 3.8 corresponde al paso 2 que previamente la señal de efecto Hall marco 110 digital la cual indica que hay que activar el terminal “C” en positivo y la terminal “B” en negativo (C||B), provocando nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

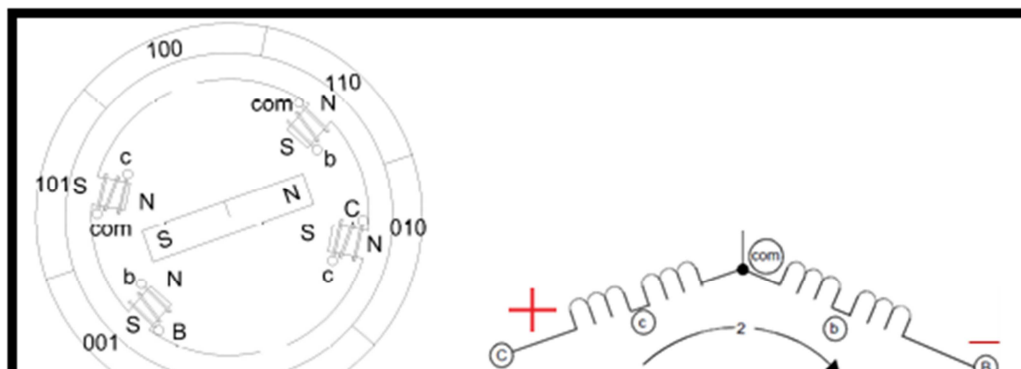


Figura 3.8 Flujo de corriente en las bobinas C || B

Paso tres 120-180°

La figura 3.9 corresponde al paso 1 que previamente la señal de efecto Hall marco 010 digital la cual indica que hay que activar el terminal "C" en positivo y la terminal "A" en negativo (C||A), provocando nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

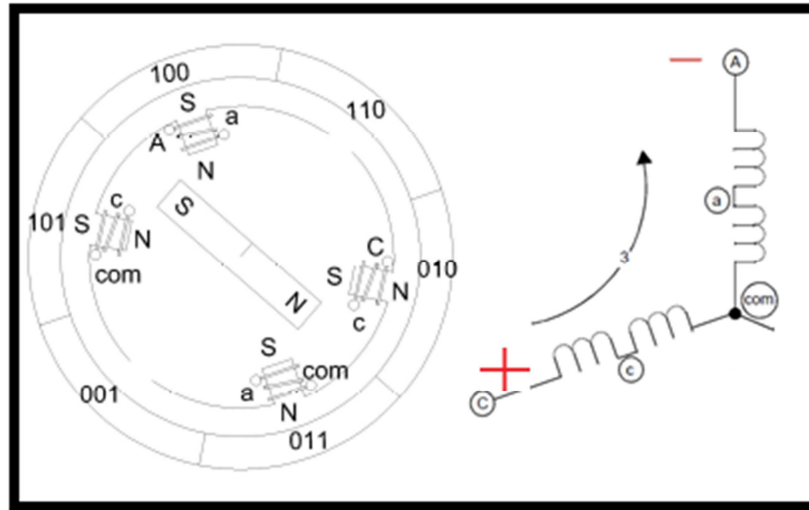


Figura 3.9 Flujo de corriente en las bobinas C || A

Paso cuatro 180-240°

La figura 3.10 corresponde al paso 1 que previamente la señal de efecto Hall marco 011 digital la cual indica que hay que activar el terminal "B" en positivo y la terminal "A" en negativo (B||A), provocando nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

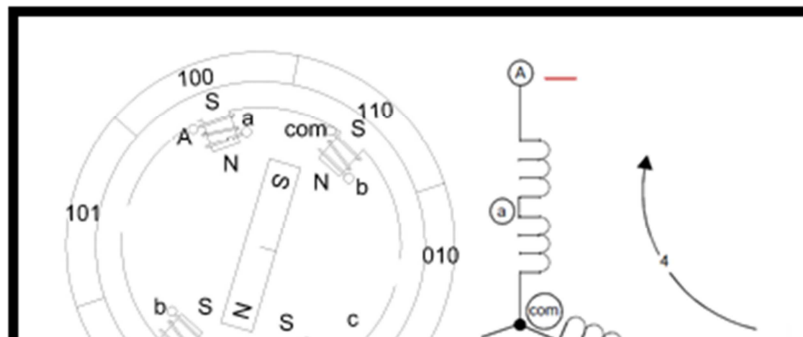


Figura 3.10 Flujo de corriente en las bobinas B || A

Paso cinco 240-300°

La figura 3.11 corresponde al paso 1 que previamente la señal de efecto Hall marco 001 digital la cual indica que hay que activar el terminal “B” en positivo y la terminal “C” en negativo (B||C), provocando nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

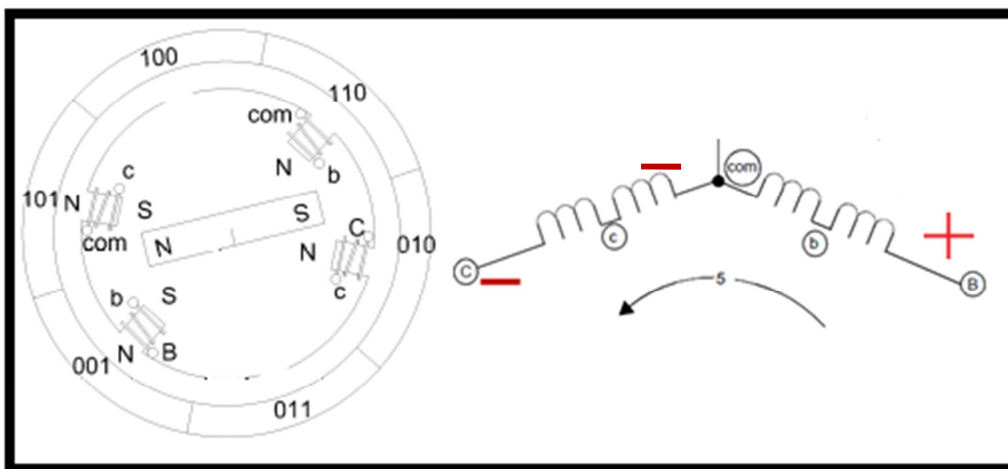


Figura 3.11 Flujo de corriente en las bobinas B || C

Paso seis 300-360°

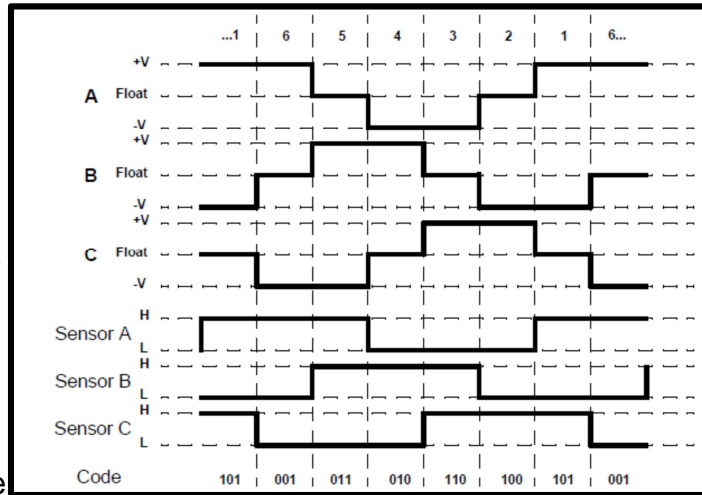
La figura 3.12 corresponde al paso 1 que previamente la señal de efecto Hall marco 101 digital la cual indica que hay que activar el terminal “A” en positivo y la terminal “C” en negativo (A||C), provocando

nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.



nortes N y sures S en las bobinas como lo muestra la imagen.

Figura 3.12 Flujo de
bobinas A || C



corriente en las

En la **Figura 3.13** se muestran los seis pasos de la técnica de activación trapezoidal, en la parte superior se indica el número de paso, en la parte inferior el código binario de los sensores Hall y los niveles de voltaje en cada bobina.

Figura 3.13 Gráfica de sensores tipo Hall contra las señales de voltaje de las bobinas.
(Brown, 2002)

Para realizar la gráfica de los sensores Hall contra las señales de las bobinas son necesarios los datos técnicos de la construcción del motor, como número de polos y el

paso fraccionado, con la finalidad de conocer la relación que existe entre ángulos mecánicos y eléctricos, cabe mencionar que dicha relación está en función del número de polos.

El motor BLCD cuenta con ocho polos, con la siguiente ecuación se puede obtener el número de bobinas en el estator para motores in-runer.

$$N_p = \frac{1}{3} \times \text{númerodebobina} \dots \dots \dots \textbf{Ecuación 3.7}$$

De esta manera se puede calcular que el motor BLCD cuenta con 24 bobinas y ocho polos. Sí el bobinado del estator coincide con los pasos mecánicos, se dice que es de paso completo, y sí el bobinado pasa por un ángulo menor que el paso polar se dice que es de paso fraccionado. De esta manera el paso fraccionado Pf del motor BLCD está en función del número de bobinas, tenemos que:

$$Pf = \frac{360^\circ}{\text{numerodebobinas}} = \frac{360^\circ}{3N_p} \dots \dots \dots \textbf{Ecuación3.8}$$

De la ecuación anterior tenemos que el Pf para el motor BLCD (un paso de seis de los que componen la técnica trapezoidal) de 8 polos es de 15° , este coincide con la gráfica trapezoidal que se muestra en la **Figura 3.13**.

El paso polar (P_p) es la distancia angular entre dos polos adyacentes en una máquina, entonces tenemos que:

$$P_p = \frac{360^\circ}{N_p} \dots \dots \dots \textbf{Ecuación 3.9}$$

Donde P_p está dado en grados mecánicos y N_p es el número de polos del motor. Así tenemos que para el motor BLCD de 8 polos tenemos 45° grados mecánicos. Para los grados eléctricos se tiene la ecuación siguiente:

$$\theta_e = \frac{N_p}{2} \theta_m \dots \dots \dots \textbf{Ecuacion 3.10}$$

Dónde:

θ_e está dada en grados eléctricos.

N_p : número de polos.

θ_m : está dada en grados mecánicos.

Para un giro de 90° mecánicos se desarrollan 360° eléctricos de la señal trifásica y en este rango angular habitan los 6 pasos de la señal trapezoidal, por consiguiente, para obtener 360° mecánicos es necesario 24 pasos de la técnica de activación trapezoidal.

Los diagramas 3.14, 3.15 y 3.16 muestran los rangos de activación de cada par de bobinas, estos muestran que el rango de activación es igual al paso polar de 45° mecánicos, las flechas exteriores muestran la activación en sentido de las manecillas del reloj y las interiores la activación en sentido contrario. La posición del rotor es crítica ya que con la misma activación se pueden dar ambos sentidos de giro, si el rotor se encuentra después del límite de activación gira en sentido de las manecillas del reloj, pero si el rotor se encuentra antes del límite de activación se producirá un giro en sentido contrario a las manecillas del reloj. Superponiendo los tres diagramas (3.14, 3.15, 3.16) con la **Figura 3.17** obtenemos los empalmes de activación de las bobinas y las señales de posición rotóricas de los sensores Hall. Estos diagramas ayudan a visualizar la construcción interna del motor. **Revisar apéndice 1.**

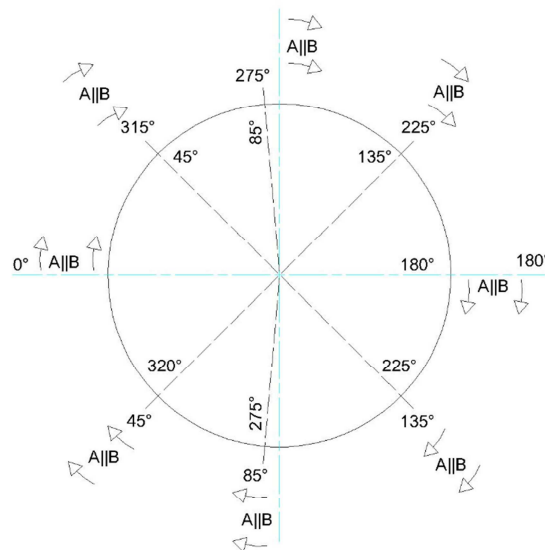


Figura 3.14 Diagrama de ángulos de activación de las bobinas A y B

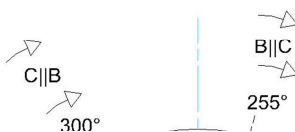


Figura 3.15 Diagrama de ángulos de activación de las bobinas C y B

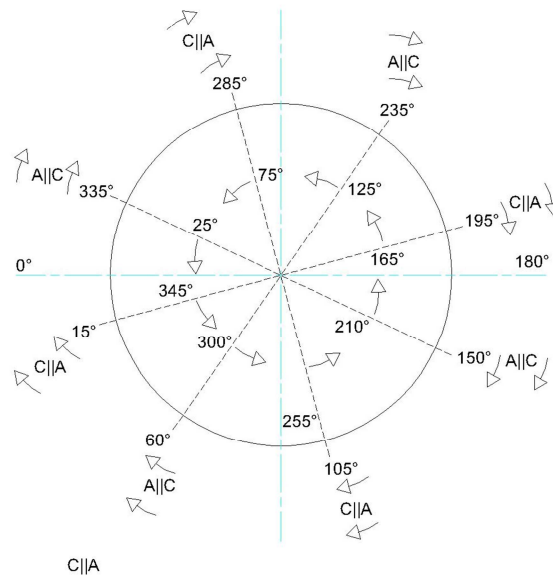


Figura 3.16 Diagrama de ángulos de activación de las bobinas C y A

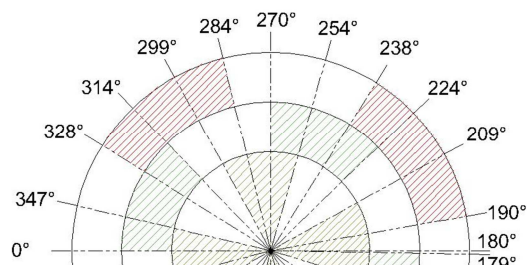


Figura 3.17 Diagrama de los sensores Hall para cada ángulo mecánico

La **Figura 3.18** muestra las activaciones de las bobinas, un cuarto de revolución corresponde a 360° eléctricos como se comentó anteriormente. Ésta gráfica es utilizada para desarrollar el programa en lenguaje C que generara las señales PWM para excitar el puente trifásico puesto que muestra de manera clara y resumida los seis pasos de la técnica de activación trapezoidal.

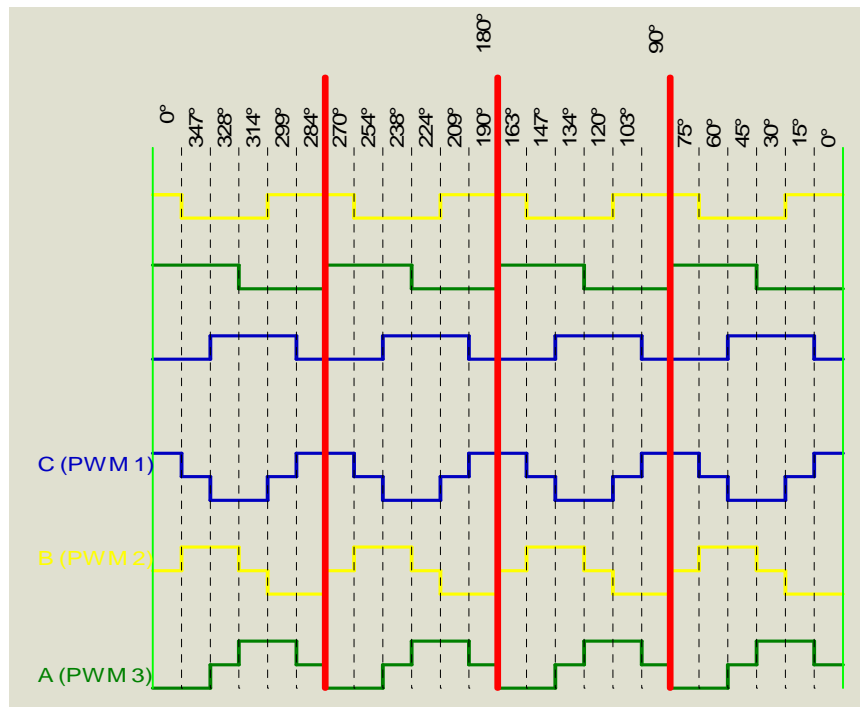


Figura 3.18 Gráfica de sensores tipo Hall contra las señales de voltaje en las bobinas en un motor de 8 polos.

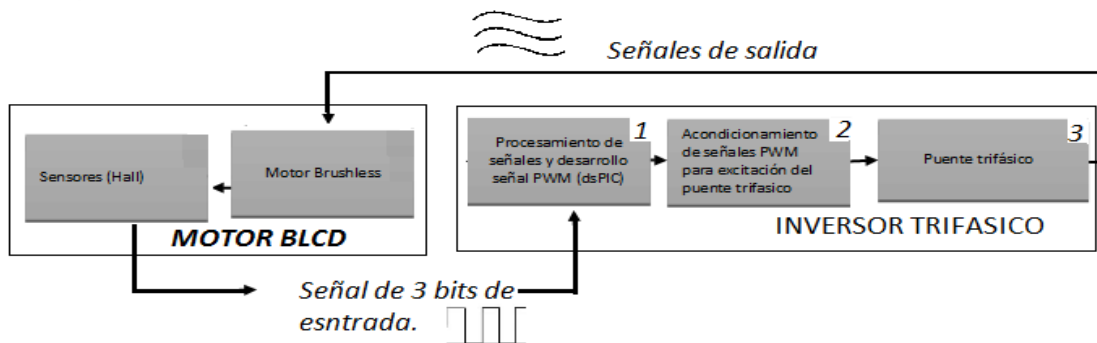
Capítulo 4

DISEÑO DEL INVERSOR TRIFÁSICO

En este capítulo se describe la arquitectura de inversor trifásico para la activación del motor BLCD y el diagrama de flujo que describe la lógica del programa en lenguaje C. El inversor está compuesto en tres bloques: procesamiento, acondicionamiento y potencia (**Figura 4.1**). La función que realiza un inversor es cambiar el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna.

Como el motor BLCD es una máquina Sincrónica (el campo magnético generado por el estator y el rotor giran a la misma frecuencia), la señal trifásica de alimentación está en sincronía con la señal de posición rotórica, el responsable de este efecto es el bloque

de procesamiento y generación de señales, este sistema sustituye al sistema mecánico de cepillado el cual armoniza el movimiento angular del rotor con la alimentación de sus espiras. Sin dicha sincronía electrónica el motor presentaría un deslizamiento entre la frecuencia angular del rotor y la energización de las bobinas,



provocando severos daños en el motor y el inversor.

Figura 4.1 Diagrama de bloques del sistema motor-inversor trifásico

Los requerimientos de los 3 bloques que componen al inversor trifásico se describen a continuación:

Bloque 1, responsable de leer posición rotórica con una señal digital de 3 bits y convertirla en un sistema de 6 señales PWM, compuesto básicamente por los siguientes dispositivos:

- DsPic30f4011
- hd74ls244p
- potenciómetro 1kohm

Bloque 2, responsable de amplificar y acondicionar las señales PWM emitidas por el bloque 1, compuesto básicamente por los siguientes dispositivos:

- 3 IRF2110
- hd74ls244p
- 6 B0505s
- Fuente de alimentación de 24 a 10v regulada.

Bloque3, responsable de realizar la conducción bidireccional de corriente en las bobinas del motor BLCD, activados previamente por el bloque 2, compuesto básicamente por los siguientes dispositivos:

- 9 Mosfet STP80NF70
- Resistencias de varios valores

4.1 Microcontrolador

El microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene los componentes necesarios para controlar una tarea determinada como, operaciones matemáticas, control de motores y procesamiento de señales, entre otros. Un sistema con microcontrolador pic debe de almacenar en su memoria el programa destinado a gobernar una aplicación establecida, una vez programado y configurado sólo sirve para realizar la tarea determinada.

El microcontrolador digital de señales utilizado es de la familia dsPIC30F dedicada al control de motores con las siguientes características:

- Memoria Flash programable de 48 KBYTES.
- Memoria RAM para datos de 2048 KBYTES.
- Memoria EEPROM para datos 1024 KBYTES.
- 5 temporizadores de 16 Bites (TIMER).
- 3 módulos PWM doble canal para control de motores.
- Convertidor A/D de 10 bits con una velocidad de 500 KBPS (CAD).
- Interfaz para codificador de cuadratura QEI.
- Módulo UART con 2 canales Rx y Tx.
- Módulo I²C.

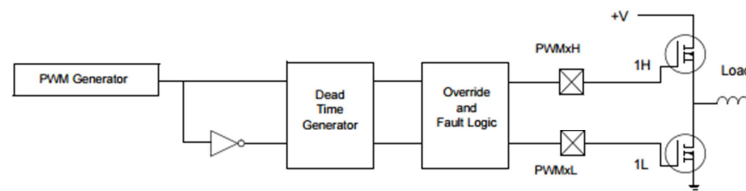
La implementación de un dsPIC30F4011 es ideal y se adapta a los requerimientos de las tres técnicas de activación de los motores BLCD ya que este contiene un módulo indispensable para el control de los motores trifásicos como los BLCD que es: “control de motores con PWM (Motor Control PWM Module) “, modulo que requieren las tres técnicas.

El módulo control de motor (Motor Control PWM Module) tiene 3 canales PWM(PWM1H, PWM1L, PWM2H, PWM2L, PWM3H, PWM3L) cada canal se compone de su parte alta(PWMXH) y su parte baja(PWMXL), los canales se activan con el registro PWMCON1<7:0>, y pueden ser configurados como PWM independientes o complementados con el registro PWMCON1<10:8>. En modo complementado tiene la finalidad de activar los Mosfet en configuración totem-pole (**Figura 4.2 a**), excluyendo toda posibilidad de que se active simultáneamente la parte alta y baja de un canal para no provocar un corto circuito. Para activar el modo complementario es necesario asignarle al registro PWMCON1<10:8> un valor de 0x00hexadecimal.

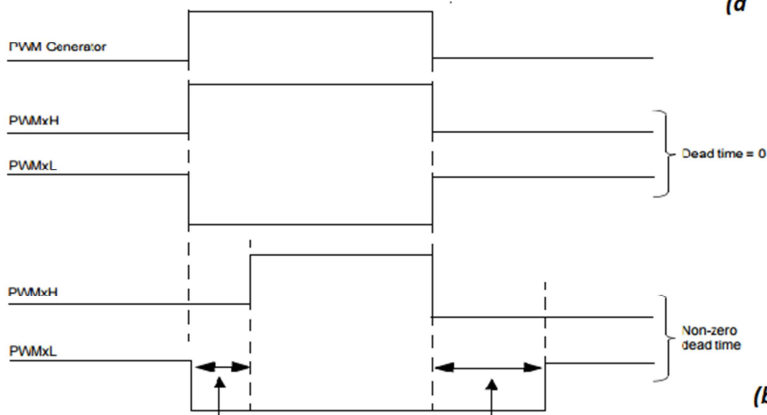
El PWM configurado en el inversor está en modo complementario y es generado con la técnica de “centro alineado”, ésta se configura cargando al registro PTMOD<1:0> con un 2 hexadecimal y están relacionados los siguientes registros (**Figura 4.3**):

- PTMR de 15 bits dedicado a llevar la cuenta de en ciclos de reloj con prescala de 1:1.
- PTPER de 15 bits solo para lectura y establece el periodo de cuenta del PTMR.
- PDC1 y PDC2 de 15 bits dedicados a establecer el ancho de pulso de PWMXH y PWMXL, respectivamente. Ambos registros son comparados con el PTMR.El dsPIC tiene un módulo de generación de tiempo muerto (Dead Time Generator) programable con el registro de tiempo DTCONX (**Figura 4.2b**), que ocasiona un retardo

entre la activación de la parte alta y baja.



(a)



(b)

Figura 4.2 a) Diagrama de bloques PWM del modo complementado y un par de mosfet en configuración Totem-Pole, b) Generación de PWM con una señal sin tiempo muerto y otra con tiempo muerto(dead time)

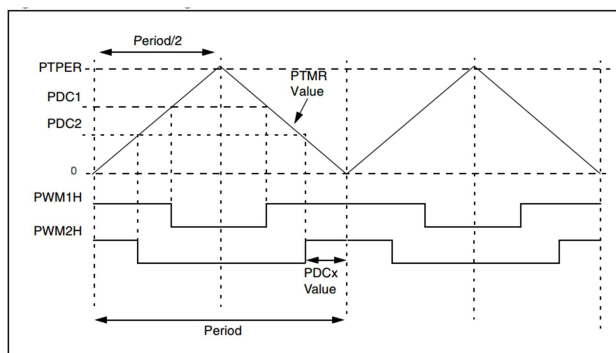


Figura 4.3 Generación PWM con la técnica de centro alineado

La técnica de activación trapezoidal sólo requiere del Módulo PWM para Control de Motores y el convertidor analógico digital "A/D" para variar la velocidad del motor, adicionalmente un puerto dedicado a la lectura de los sensores Hall.

La modulación por ancho de pulso (PWM) a 2.5Khz es aplicada para controlar la cantidad de energía en un tiempo determinado que circula en el puente trifásico. El ancho de pulso es controlado con los tres registros PDC1, PDC2, PDC3 que configuran el ciclo de trabajo de PWM1, PWM2, PWM3 respectivamente.

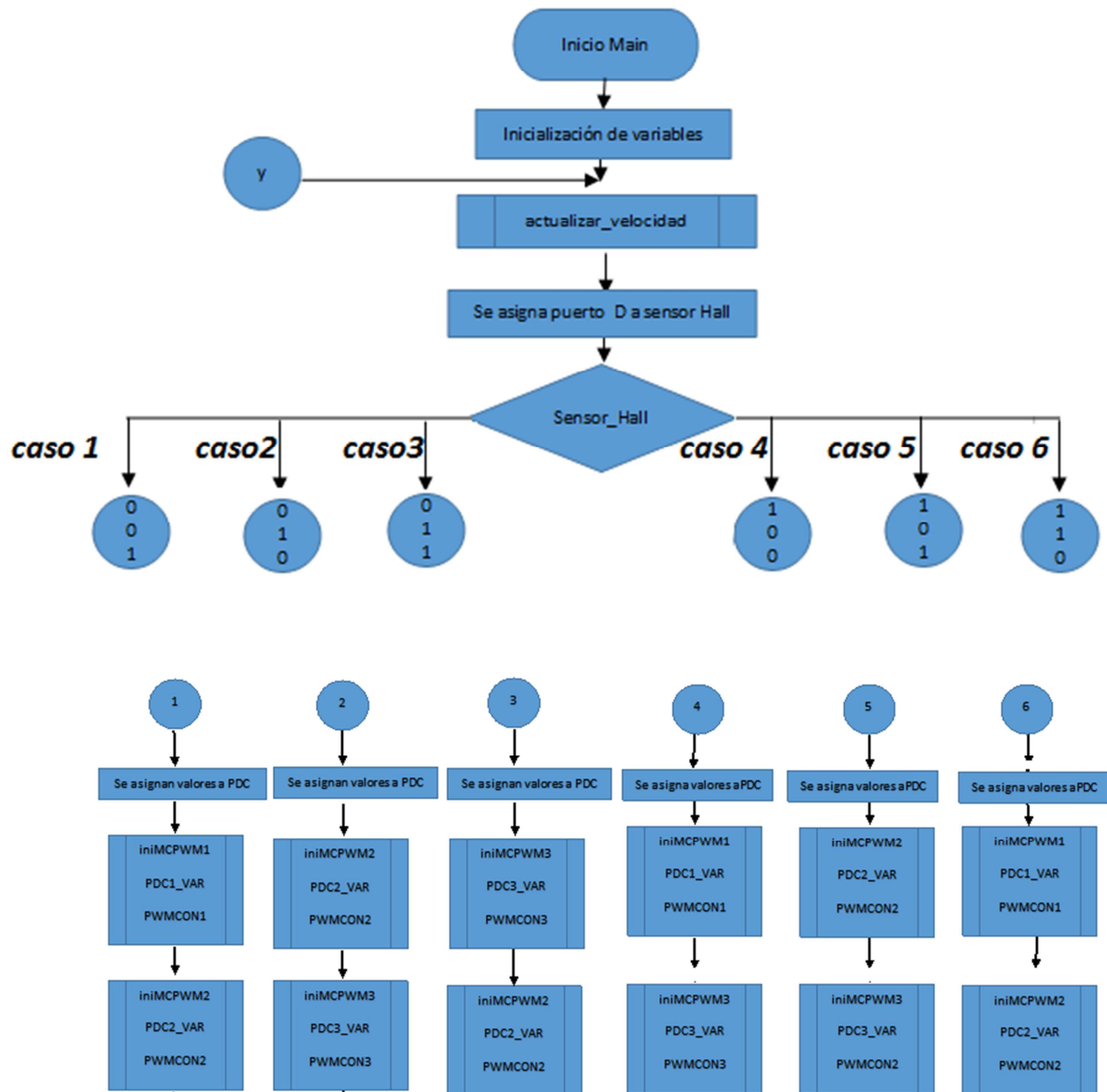
El convertidor analógico digital A/D de 10 bits y cuatro canales permite leer la señal analógica de un potenciómetro en el canal 1(SH1), señal que puede tener valores de 0 a 5v, el valor de esta es procesado y enviado a los 3 registros PDCX. .

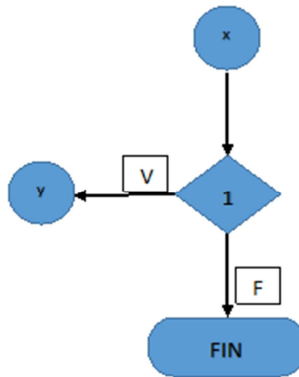
La técnica senoidal y vectorial requiere explotar más el dsPIC utilizando los siguientes periféricos: (Motor Control PWM Module), módulo de lectura de encoder (Quadrature Encoder Interface Module) para conocer con mayor exactitud la posición rotórica y tres

canales del módulo “A/D” para leer la intensidad de corriente que circulan por dos de sus fases.

4.1.1 software de activación.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del código en C instalado en el dsPIC que realiza la técnica de activación trapezoidal y más adelante se desarrolla una leve descripción del funcionamiento, el código utilizado se anexa en el apéndice 2 de este documento.





Después de inicializar las variables y configurar los puertos del micro, este lee en el pin 0 del puerto B (RB0 del convertidor A/D en el CH0) la señal de referencia para variar el ancho de pulso del PWM, esto con la función “actualizar_velocidad”. Por medio del puerto D (pines RD0 al RD2) el micro realiza la lectura de posición rotórica y guarda este dato en la variable “Sensor_Hall”, con este dato se selecciona uno de los seis pasos de la técnica trapezoidal por medio de una sentencia switch de seis casos.

La sentencia switch en cualquiera de sus seis casos consta de llamar a tres funciones (initMCPWM1, initMCPWM2, initMCPWM3) las cuales configuran a los 3 canales PWM (PWM1H, PWM1L, PWM2H, PWM2L, PWM3H, PWM3L) respectivamente, por medio de las variables PDCX y PWMCONX. La variable PWMCONX configura el registro PWMCON1<7:0>, activando directamente los seis canales PWM (PWM1H, PWM1L, PWM2H, PWM2L, PWM3H, PWM3L). La variable PDCX configura los registros PDC1, PDC2 Y PDC3 para variar el ancho de pulso de sus señales PWM correspondientes, cabe mencionar que estas tres variables son modificadas directamente por la función “actualizar_velocidad”.

4.2 Etapa de excitación

Entre el microcontrolador y la etapa de potencia se requiere un interfaz electrónica de acondicionamiento, responsable del acoplamiento de impedancias entre la etapa de potencia y de control.

Para lograr corriente bidireccional en las bobinas del motor BLCD es necesario utilizar un puente trifásico constituido por 9 mosfet del cual se hablará más adelante, la arquitectura básica son dos Mosfet en configuración Totem-Pole, figura 4.1a. Para activar la parte alta (H) y baja (L) es empleado un driver dedicado especialmente a dicha tarea IR2110. El driver amplifica la señal PWM de 5 a 10v para la saturación de los mosfet, la señal PWM del dsPIC es previamente acoplada con un búfer triestado HD74LS244.

El IRF2110 requiere de un circuito Bootstrap para activar el mosfet alto (H) o la parte alta del puente. Para activar un Mosfet es necesario referenciar la señal de excitación de la compuerta (Vg) con su fuente (Vs), el problema radica en que la fuente del mosfet alto no está a tierra o 0v del circuito, se encuentra en el drenador del mosfet bajo (L) o Vs

Figura 4.4. El circuito Bootstrap instalado en las terminales Vb y Vs del drive, resuelve este problema y se compone de una resistencia en serie con un diodo y un capacitor **Figura 4.4**, el cálculo del capacitor bootstrap (Cboot) está descrito por la siguiente ecuación:

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

f: frecuencia de operación del PWM.

Iqbs: corriente que circula por el Cbot

Vcc: fuente de voltaje de 5v.

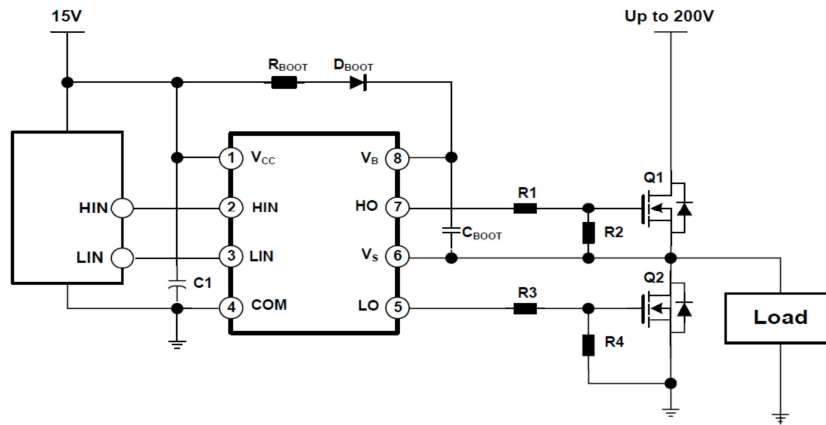
Vf: caída de voltaje del diodo bootstrap

Qg: la carga de electrones del lado algo en la compuerta.

Vmin: voltaje mínimo entre Vb y Vs.

Qls: Nivel de carga requerido por ciclo

V_{is}: voltaje
 mosfet bajo
 I_{cb}s:
 fuga del



de caída del
 (L).
 corriente de
 Cboot.

Figura 4.4 Driver IR2110 y circuito Bootstrap. (Rectifier, 2005)

El IR2110 está restringido frecuentemente por la carga y descarga del Cboot, imposibilita experimentar en dicho sistema y puede presentar serios problemas con los voltajes negativos del Cboot. Para solucionar el problema se instaló un convertidor de Cd a Cd en lugar del Cboot, el convertidor B0512 de 10 a 10vdc se puede representar como un transformador, sustituyendo el voltaje del secundario por el voltaje del Cboot. La **Figura 4.5** se muestra un esquemático del acondicionamiento.

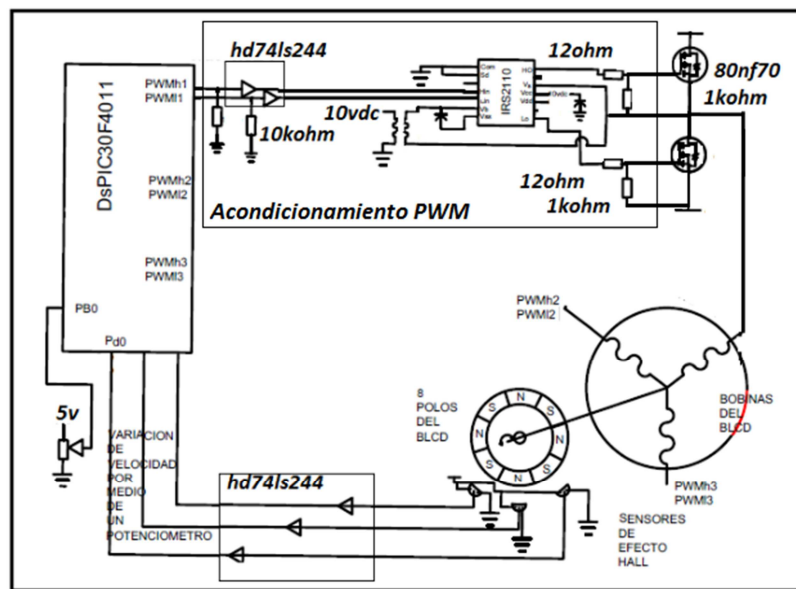


Figura 4.5 Acondicionamiento de la señal PWM para un medio puente de 3

4.3 Puente Trifásico

El puente trifásico construido con Mosfet protagoniza el bloque de potencia en el inversor trifásico **Figura 4.1** y encargado de hacer llegar corriente bidireccional a las bobinas del motor BLCD con la técnica de activación trapezoidal.

El mosfet es un dispositivo semiconductor de corriente controlado por voltaje, tiene prestaciones como: alta impedancia de entrada, alta capacidad de corriente en el drenador y altas frecuencias de operación, ideal para las técnicas de activación de los motores BLCD. El STP80NF70 es utilizado en este puente operándolo en las regiones de corte y saturación, la corriente máxima que puede circular por el drenador es de 98A a 60Vdc y una resistencia menor de 0.0098 ohm de fuente a drenador, si el IR2110 activa a los mosfets con $V_{gs}=10$ estamos garantizando la saturación del mismo según su ficha técnica **Figura 4.6**, controlando la potencia de los puentes con el PWM.

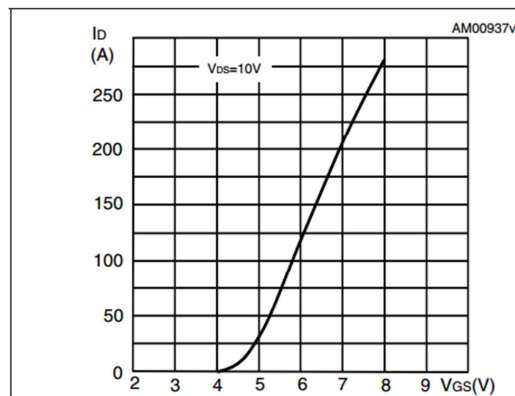


Figura 4.6 Gráfica de transconductancia del STP80NF70

La configuración utilizada en este puente es canal N en ambos lados (alto H y bajo L) ya que nos permite manejar mayor potencia con voltajes arriba de 40v y corrientes de hasta 100A, a diferencia de la configuración P- N (mosfet alto de canal P y mosfet bajo de canal N). En la parte inferior del puente se colocó un par de mosfet en paralelo para dividir la potencia, debido a que al implementar la técnica senoidal y vectorial existe un momento en el que circula el doble de potencia en esta parte. Para lograr estabilidad de

evitación en el puente y evitar corrientes parásitas en la compuerta, es necesaria una resistencia de 1Kohm entre la compuerta y la fuente de cada mosfet. En la **Figura 4.7** se muestra el inversor trifásico.

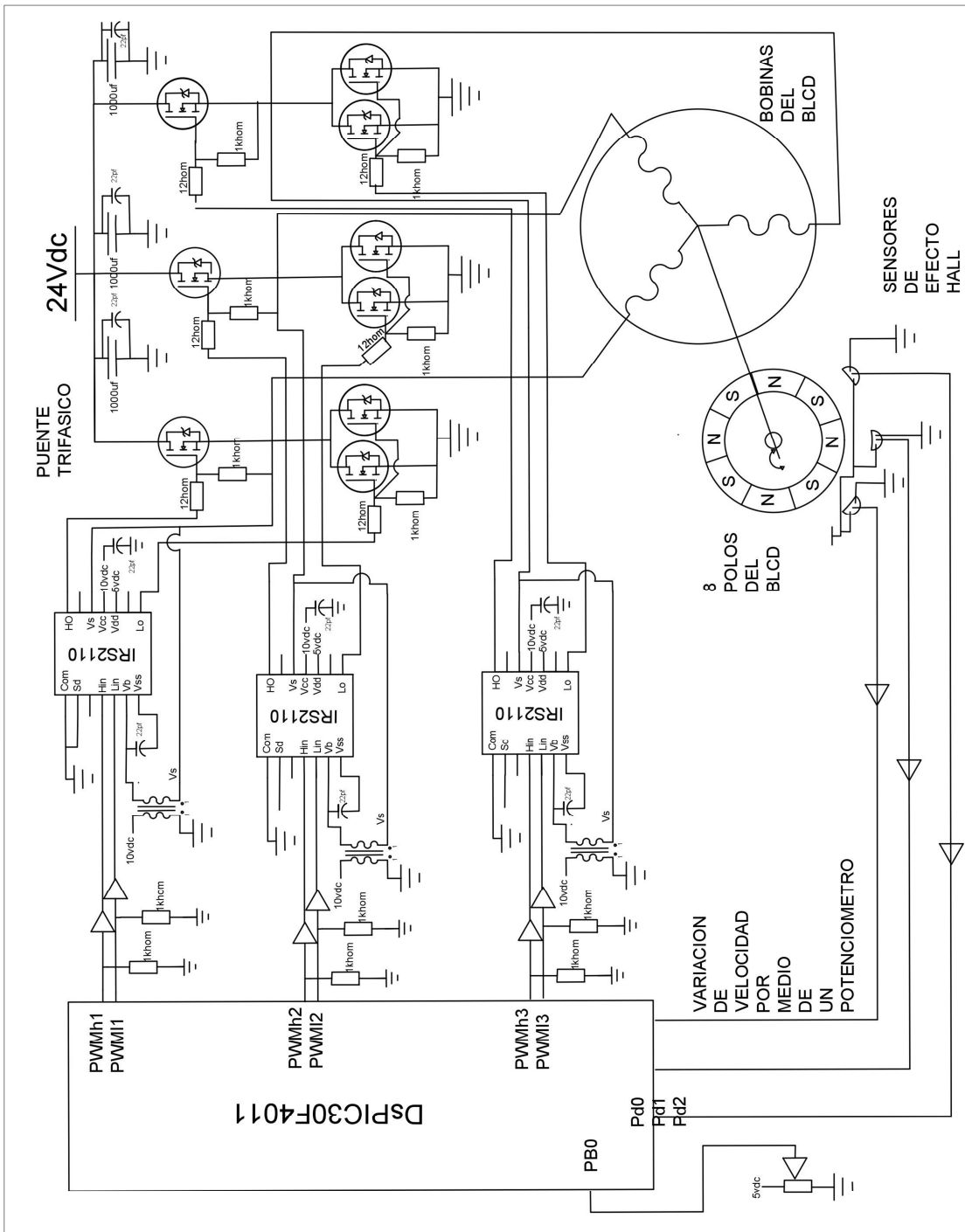


Figura 4.7 Inversor trifásico.

4.4 Costo del proyecto

A continuación se tiene el costo del proyecto en moneda nacional.

Pieza	Numero de pieza	Costo
Motor brushless 70BLS3A60	1	1500XMN
Resistencias varios valores	varios	\$50XMN
MOSFET STP80NFZ0	10	\$580XMN
Capacitores varios valores	varios	\$250XMN
Placa Fenólica para PCB de 30 x 30 cm	1	\$80XMN
IR2110	3	\$70XMN
HD74LS244P	2	\$20XMN
Reguladores de voltaje de 5Vdc	1	\$5XMN
B0505S - 1W (Fixed input isolated & unregulated single output miniature sip/dip package)	3	\$40
Cable plano	1	\$30XMN
Baterías marca YUAZA de 12Vdc @ 7.0 Ah recargables.	2	\$200XMN
Mecanismo de carga	1	1500MXN
Regulador Convertidor de DC-DC con entrada de 3.2 a 40 V	2	\$37XMN
DSPIC30F4011	1	\$205XMN
Otros (borneras, solución férrea, cable para protoboard, insumos para realización de PCB, porta microcontrolador, etc)	varios	\$150XMN

Costo del inversor trifásico: \$3197

Costo total del proyecto: \$4697

Las imágenes de las 3 tarjetas que corresponden a cada módulo son realizadas en Proteus y se pueden observar en el apéndice 1 de este documento.

Capítulo 5

PRUEBAS DEL SISTEMA

En este capítulo se mostrará las gráficas de activación trapezoidal desde un osciloscopio, respuesta del sistema a una entrada escalón con y sin carga aplicada. También se describe un sistema simulador de carga realizado para observar el sistema con distintos niveles de carga y la calibración del sistema (motorBLCD-simulador de carga).

5.1 Adquisición de datos y Resultados de las pruebas aplicadas al inversor trifásico para el motor BLCD

El torque nominal del motor es de 0.5Nm y el máximo 1.5Nm. Para verificar el desempeño se utilizó un simulador de carga que consiste en ejercer fuerza en el rotor del motor por medio de dos rodamientos A y B (**Figura 5.1**), donde el rodamiento B es la flecha del motor y el A es sólo un rodamiento loco que ejerce torque al rotor cuyos perímetros se encuentran en contacto directo, haciendo transmitir el movimiento angular del rodamiento B al rodamiento A. Se puede variar la carga aplicada al motor ajustando el rodamiento A, por medio del ajustador de torque, el ajustador de torque es básicamente un brazo ajustado por una tuerca. Si el brazo de ajuste baja hay mayor

fuerza aplicada al rodamiento B y por consiguiente el motor requiere de mayor potencia para romper el torque aplicado del rodamiento A. El brazo de ajuste está graduado y con ello se obtuvo la relación cm-torque aplicado. La **Tabla 5.1** presenta la tabla calibración del sistema.

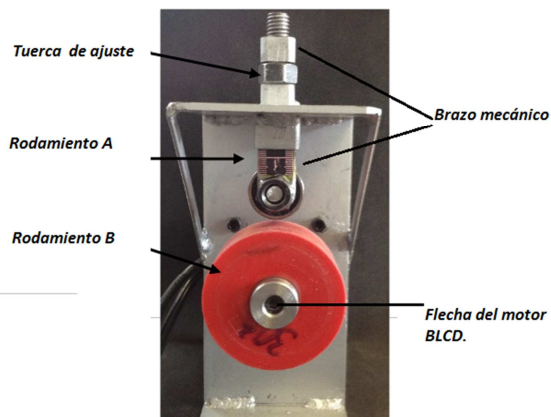


Figura 5.1 Simulador de carga para aplicación de torque, aplicación de torque (Rueda A), rotor (Rueda B), ajustador de torque aplicado (tuerca ajustable) y graduación del torque (brazo mecánico)

Distancia (cm)	Corriente I (A)	Torque τ (Nm)	Ciclo de trabajo (%)	
			Pwm Mosfet Low	Pwm Mosfet High
1.6	0.8	0.03	20%	87.5%
1.7	4.6	0.06	20%	92.5%
1.8	9.5	0.28	70%	95%
1.9	16.6	0.48	60%	95%
2	19	0.89	55%	95%

Tabla 5.1 Valores obtenidos de las pruebas de desempeño del motor BLCD al someterse a la prueba del simulador de carga

El simulador de carga fue calibrado tomando como referencia la segunda ley de Newton para sistemas rotativos, (**Ecuación 5.1**). Una llave Allen como palanca de longitud $l=0.063$ mts colocada en el centro del rodamiento A perpendicular a su eje de giro, ejerce un torque al rotor del motor BLCD, donde la fuerza aplicada a dicha palanca es ejercida por una botella de PET que pende del otro extremo, la botella tiene una

capacidad de 1800 ml(gradúa de 50ml hasta 1700ml) (**Figura 5.3**), la botella ejerce una fuerza causante del torque (momento de torsión) según la masa que contenga. La variación de masa en la botella se logra al agregar agua tomando en cuenta que “*densidad de agua = 1gr/cm*”, con ello simulamos el torque que desempeña el motor BLCD.

Inicialmente la palanca se encuentra en reposo perpendicular al extremo del rotor en un ángulo de 0°con forme la horizontal, al incrementar se la masa(agua) se ejerce un torque creciente al rotor hasta romper la fricción seca que existe entre los rodamientos, en ese momento el torque aplicado por el simulador de carga(T rodamiento A) es menor que el torque que ejerce el rotor(T rodamiento B), de ésta manera se adquirieron 10 muestras a distinta distancia del brazo mecánico para realizar la gráfica de calibración del simulador de carga(**Figura 5.3**).

En la **Tabla 5.1** hay 5 de las 10 muestras, en las cuales se observa que la corriente requerida en las bobinas del motor BLCD aumenta si la carga aplicada al motor aumenta, en las últimas dos columnas se muestra el porcentaje de ciclo de trabajo aplicado por el dsPIC en los mosfets altos y bajos del puente trifásico, para una mayor carga el inversor aplica un 55% en la parte baja y un 92%en la alta, recordemos que la variacion de PWM está ligada directamente con el valor analógico que proporciona el potenciómetro.

$$\tau = l * m * g \dots\dots\dots \text{Ecuación (5.1)}$$

Donde:

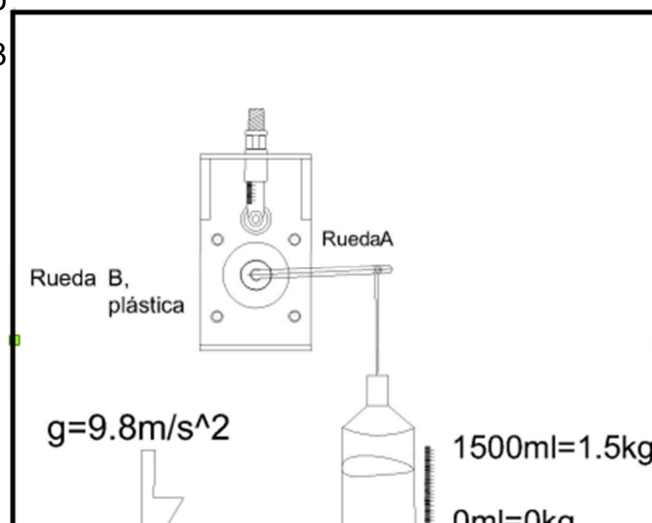
d: es la distancia de la palanca (m).

m: masa del objeto

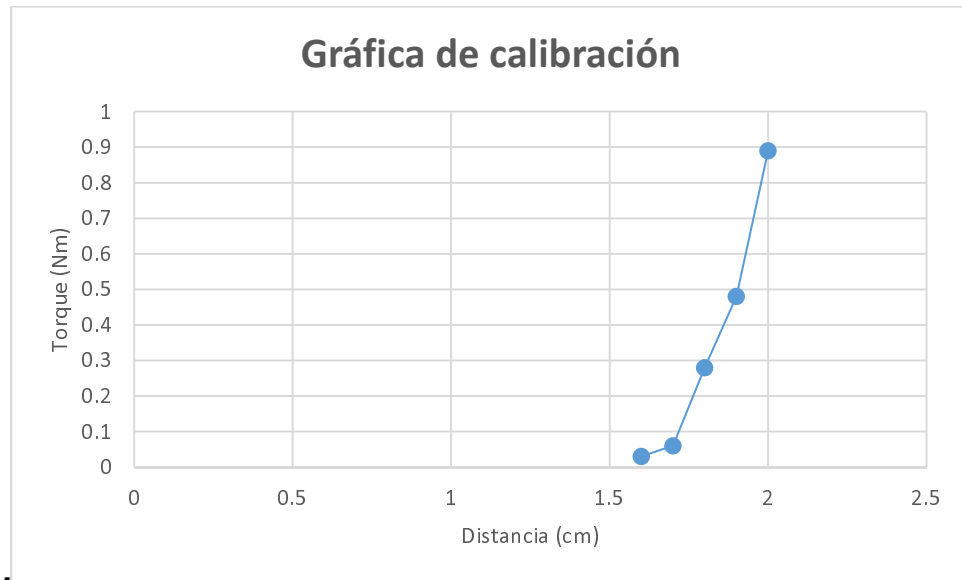
(Kg).

g: gravedad (9.8

m/s²).



a)



b)

Figura 5.3 .a) Calibración del simulador de carga, **b)** Calibración del sistema mecánico (aplicación de carga al rotor)

La **Figura 5.4** muestra la gráfica de corriente contra torque, se observa que para un velocidad de 75rpm (**Figura 5.4 y Figura 5.5**) el motor desarrolla un torque bajo y un consumo de corriente mínimo, conforme aumenta la velocidad el consumo de corriente también, por otro lado al aumentar la velocidad, el motor ofrece mayor torque (característica principal de los motores in-runer).

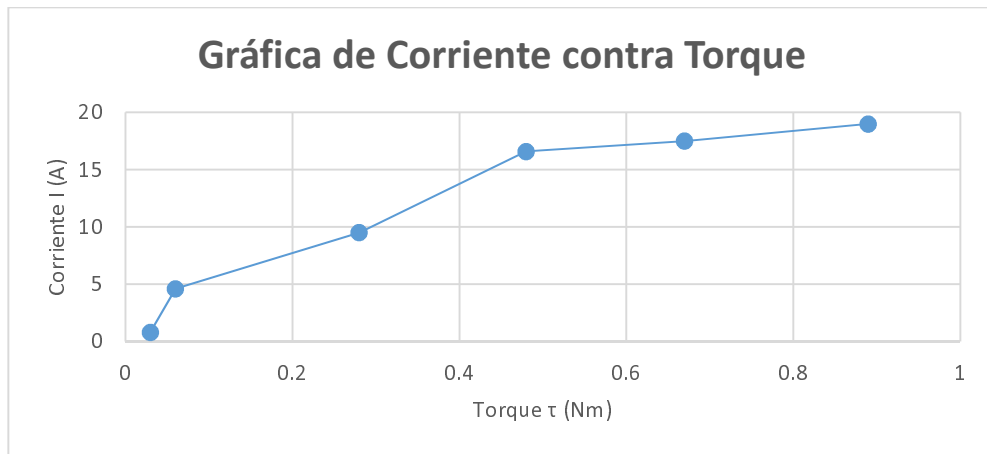


Figura 5.4 Gráfica de corriente contra torque

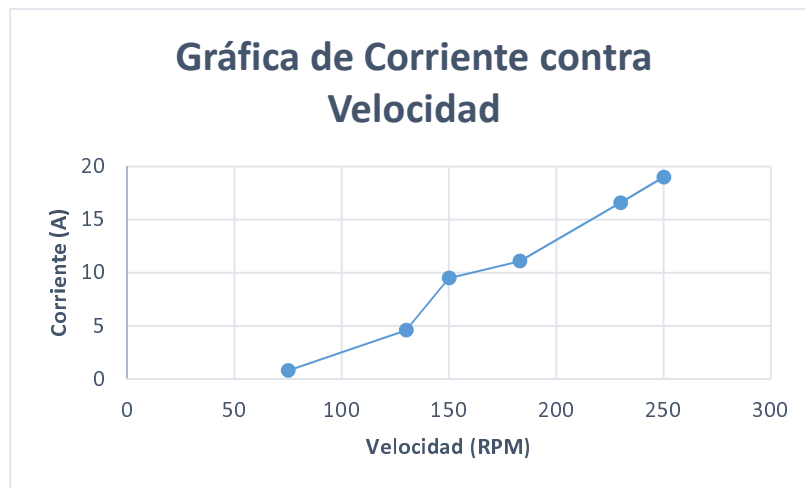


Figura 5.5 Gráfica de corriente contra velocidad

A continuación se muestra las tres señales de fase del inversor (**Figura 5.6**), se puede observar la activación y desactivación de las bobinas formando una señal trapezoidal que está a una frecuencia de 36hz, nótese que sólo se activan dos bobinas a la vez como lo indica la técnica trapezoidal.

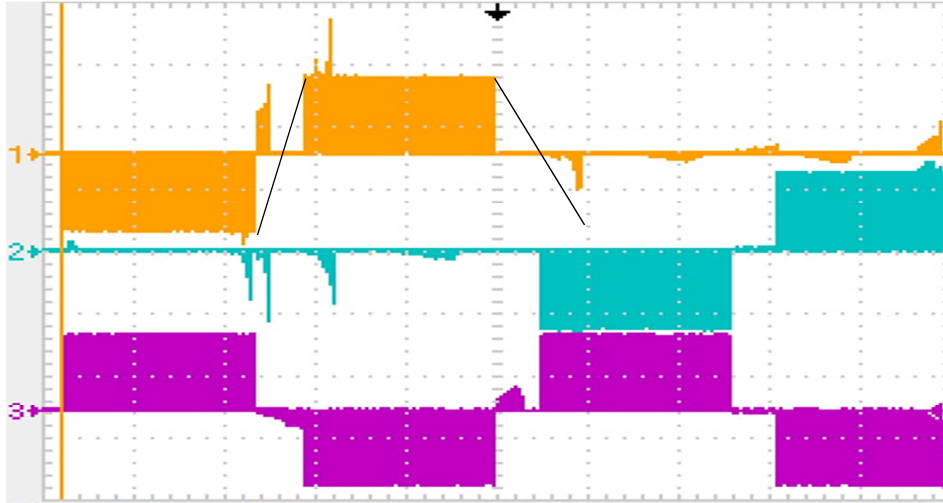


Figura 5.6 Señal trifásica del motor BLCD, donde la escala de tiempo y voltaje es 0.00554s y 5v por cuadro respectivamente

La **Figura 5.7** muestra una fase (señal morada) y el par de activaciones PWM (mosfet alto y bajo). La señal PWM azul corresponde a la activación alta de la fase y la señal PWM verde a la señal baja de fase. Esto quiere decir que por cada pulso PWM alto se genera un pulso positivo de fase, y que por cada pulso PWM bajo se genera un pulso negativo de fase.

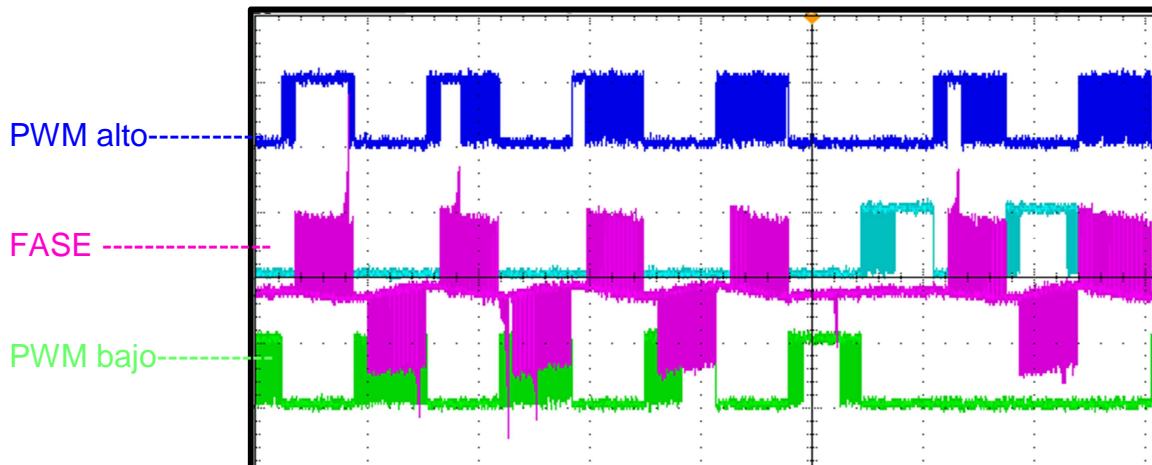


Figura 5.7 Señales PWM de MOSFET'S superiores e inferiores y una fase de tres (señal morada). Azul, verde y azul claro son las señales del PWM. Donde la escala de tiempo y voltaje es 0.0184s y 10v por cuadro respectivamente

5.2 Respuesta del motor BLCD ante una entrada escalón

En los sistemas la respuesta en el tiempo se compone de la respuesta transitoria y respeta de estado estable ante una señal de entrada, todos los sistemas estables presentan una respuesta transitoria antes de alcanzar su estado estable. Es usualmente es de interés evaluar las respuestas del sistema con respecto al tiempo ya que nos revela el desempeño de este. La respuesta transitoria, es la parte de la respuesta que tiende a cero, cuando el tiempo tiende a infinito y la respuesta en estado estable es la que permanece después de que la transitoria ha desaparecido. Para analizar la respuesta del sistema (motor BLCD e inversor trifásico) se usó una señal de entrada escalón de 24v, las respuestas del sistema se visualizaron por medio de una tarjeta de adquisición de datos (dSpace).

En la **tabla 5.2** se muestran los diferentes valores del potenciómetro que varía la velocidad para realizar las pruebas con la señal escalón. Los valores del ciclo de trabajo se muestran en porcentajes donde *CT es el ciclo de trabajo en porcentaje de la señal PWM en alto, cada prueba se realiza con carga distinta.



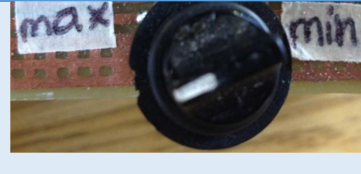
Potencia mínima	Potencia Media	Potencia Máxima
		
*CT: 87.5% (pwm High) – 20% (pwm Low)	*CT: 95% (pwm High) – 70% (pwm Low)	*CT: 95% (pwm high) – 55% (pwm low)

Tabla 5.2 Se muestran los diferentes valores del potenciómetro que se encuentran en el sistema físico para cada ciclo de trabajo

Las gráficas siguientes muestran la velocidad (RPM) contra el tiempo en segundos (s) del sistema en respuesta al escalón. En la **Figura 5.9** tenemos una potencia mínima sin carga. Se puede observar que el motor alcanza un velocidad de aproximadamente 500 RPM, presenta un transitorio de 0.7 hasta 2.5s aproximadamente, donde alcanza su estado estable a una velocidad de 250 RPM.

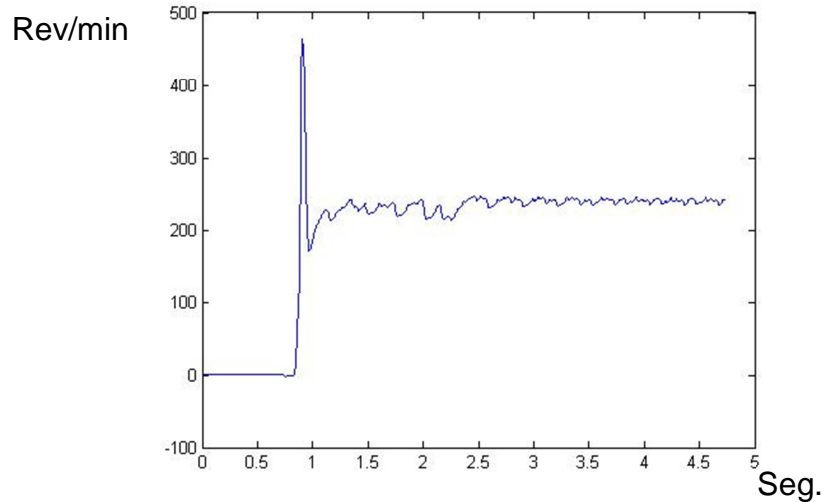


Figura 5.9 Respuesta al escalón del sin carga y potencia mínima

En la figura 5.10 se puede notar el sistema a un cuarto de potencia sin carga tiene un transitorio de 3 segundos aproximadamente, en el primer medio segundo se muestra una respuesta con cambios de giro que va de 600 a -400rpm, después de este tiempo se muestra inestabilidad en entre 200 y 400 rpm hasta su estado estable que es de 2500rpm.

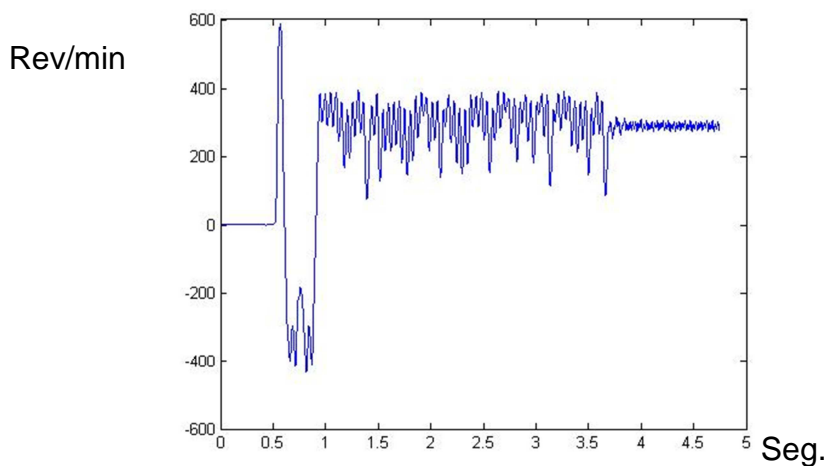
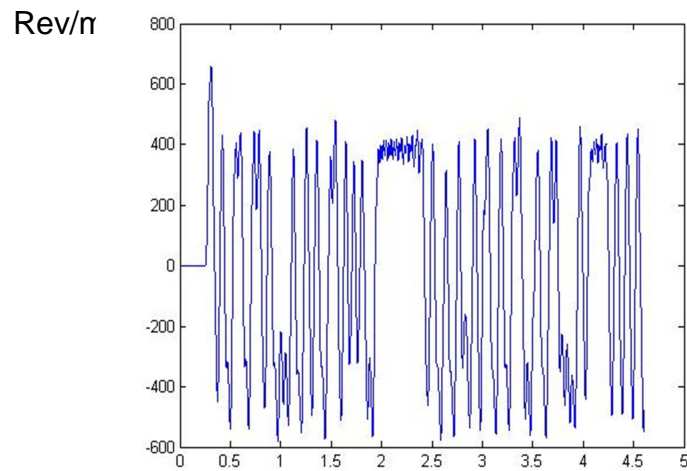


Figura 5.10 Respuesta al escalón sin carga y $\frac{1}{4}$ de potencia

Con la mitad de la potencia y a causa de la falta de carga se presenta un desequilibrio rotórico constante (**Figura 5.11**). El efecto que se observa es parecido al de la **Figura**

5.10 en el tiempo de 0.5s hasta 1s, su giro va de un sentido a otro sin llegar a un estado estable. Ahora sí aplicamos 0.5Nm de carga al rotor se estabiliza el sistema hasta llegar a un estado estable. Este efecto se puede ver en la **Figura 5.12** donde se tiene una potencia máxima, decimos que el motor BLCD tiene una velocidad de aproximadamente 250RPM.



eg.

Figura 5.11 Respuesta al escalón sin carga y ½ potencia

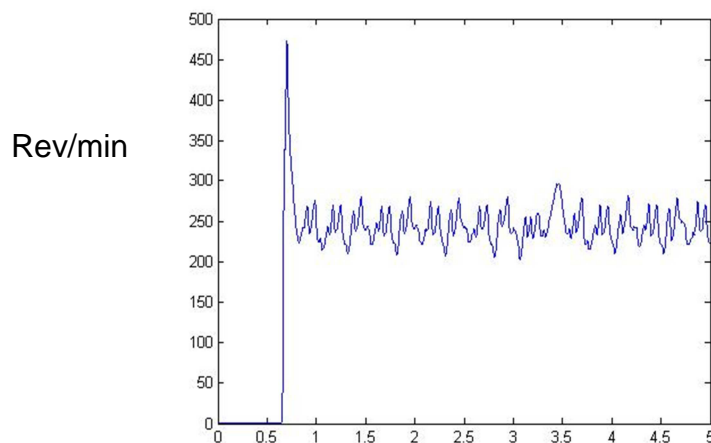


Figura 5.12 Respuesta al escalón con 0.5Nm de carga y potencia máxima

Capítulo 6

CONCLUSIONES

En la actualidad los motores BLCD han adquirido un auge en cuanto a eficiencia, por esa razón las industrias los han tratado de introducir cada vez más en diferentes aplicaciones. En México es complicado encontrar fabricantes de inversores para estos motores, entre más potente sea el sistema más complicado es adquirirlo.

En la industria del transporte los motores BLCD han sustituido algunos sistemas como a las bombas de presión clásicas en la dirección hidráulica, disminuyendo el consumo de combustible ya que anteriormente estas bombas aumentaban la carga al motor de combustión interna, esta sustitución queda dependiendo de la energía que suministra el acumulador. Al ser un sistema electrónico se vuelve un sistema controlable y se traduce en un mejor manejo del vehículo. Otro ejemplo es la nueva empresa ECONDUCE que pone en renta motocicletas (scooters eléctricos) impulsados por un motor BLCD. En estos dos ejemplos el inversor trifásico desarrollado puede sustituir las tarjetas de excitación con un bajo costo y servicios de mantenimiento en México.

Por otro lado el dsPIC30F demostró tener la capacidad de operar el sistema con la técnica de activación trapezoidal, es posible implementar las dos técnicas restantes y explotar al máximo las prestaciones de éste. Fue necesario el acople de impedancias tanto de entrada como de salida con un HD74LS244 y resistencias de pull down de 10k ohm en cada una de sus entradas, ya que las señales de efecto Hall, el Encoder y el módulo PWM presentaron variaciones de voltaje.

El acondicionamiento de la señal PWM hacia el puente trifásico mostró eficiencia, la clave de todo es el integrado IR2110, sin él la etapa de potencia (puente trifásico) no se activaría, además de ser un driver para medios puentes H funciona como acoplamiento de impedancias entre la parte de potencia y la parte de control. Se intentó sustituir dicho

driver y hacer el sistema más económico controlando la fuente flotante de 10Vdc bootstrap (V_{boot}) con un transistor, lo cual presento serios problemas en operación debido a la elevada frecuencia. Para sustituir el IR2110 es necesario mayor acondicionamiento.

El puente trifásico demostró la capacidad de soportar la operación del motor BLCD con diferentes niveles de carga, la operación máxima fue de 18A a 250rpm con una carga de 1Nm por 1 hora. Lo cual indica que está listo para la operación industrial. Este fue equipado con dos mosfet inferiores para implementar las técnicas de activación restantes, en estas existe un momento en que dos bobinas son alimentadas positivamente y como consecuencia en la tercera se aterriza el doble de potencia.

La técnica de activación utilizada presenta severos problemas cuando se aplica la potencia máxima al sistema sin carga, por lo tanto, es necesario sensor la corriente del motor para que el dsPIC30F no libere la potencia máxima. Esta parte depende de la aplicación que se le dé al motor, por ejemplo: los sistemas de tracción con este tipo de motores no liberan la potencia máxima si el sistema detecta que no hay carga. Por otro lado se puede suavizar las activaciones PWM (modulando el ancho de pulso en cada alto y bajo de la señal trapezoidal, mediante una señal PWM de 0 a 95%) logrando un movimiento más suave y con ello reducir el rizado de torque.

Con el inversor trifásico se puede realizar un desacelere del sistema mecánico y un frenado regenerativo, el primero consiste en utilizar la propiedad del rango de activación de las bobinas del motor BLCD, si dejamos activadas un par de bobinas el rotor ira al fin del rango de activación y allí permanecerá hasta que dicha alimentación sea cero, para hacer más explícitos se retomara la **gráfica 3.14** en la **Figura 6.1**.

Suponiendo que el rotor del motor BLCD es una flecha y lo montamos en los rangos de activación de las bobinas A y B (**Figura 6.1**). En un primer instante el rotor se encuentra girando libremente en sentido de las manecillas del reloj (**Figura 6.1 imagen a**), para detenerlo en el mismo sentido de giro tendremos que activar las bobina B+ y A- (B||A) que es la más próxima, con esto detenemos al motor y bloqueamos el libre giro en la flecha. En un segundo instante el rotor se bloqueará en el límite de activación de la bobina y así permanecerá hasta que no haya alimentación en el par de bobinas.

Utilizando esta propiedad podemos bloquear y desbloquear en los diferentes límites de rango al rotor hasta detenerlo, causando un desacelere en el sistema mecánico. Esto podría ser aplicado en los sistemas de tracción para hacer un frenado antiderrapante.

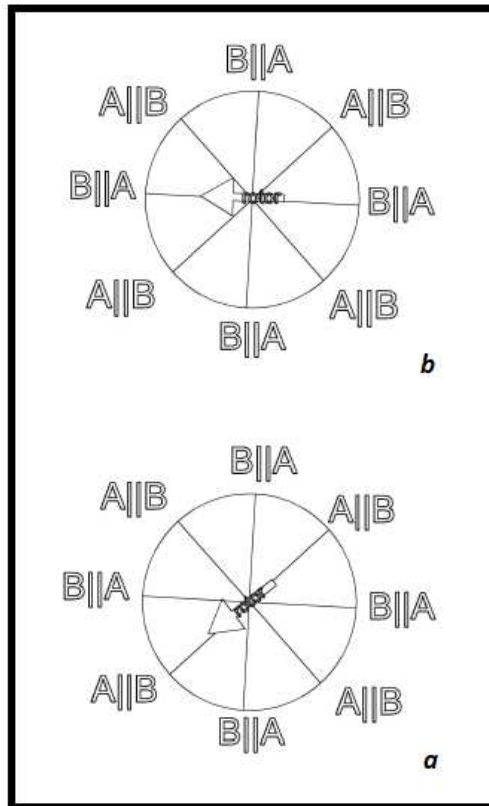


Figura 6.1 Frenado y bloqueo del rotor del BLCD

El frenado regenerativo consiste en recurrir al principio de reversibilidad de las maquinas eléctricas, utilizando al motor BLCD como generador, en lapsos donde se requiere utilizar la inercia del sistema mecánico cuando este no es impulsado por el motor BLCD, convirtiendo energía mecánica en eléctrica y realimentar el banco de baterías. Para lograr dicho frenado necesitamos agregar un rectificador trifásico de onda completa accionado con un sistema de switches por el dsPIC (**Figura 6.2**).

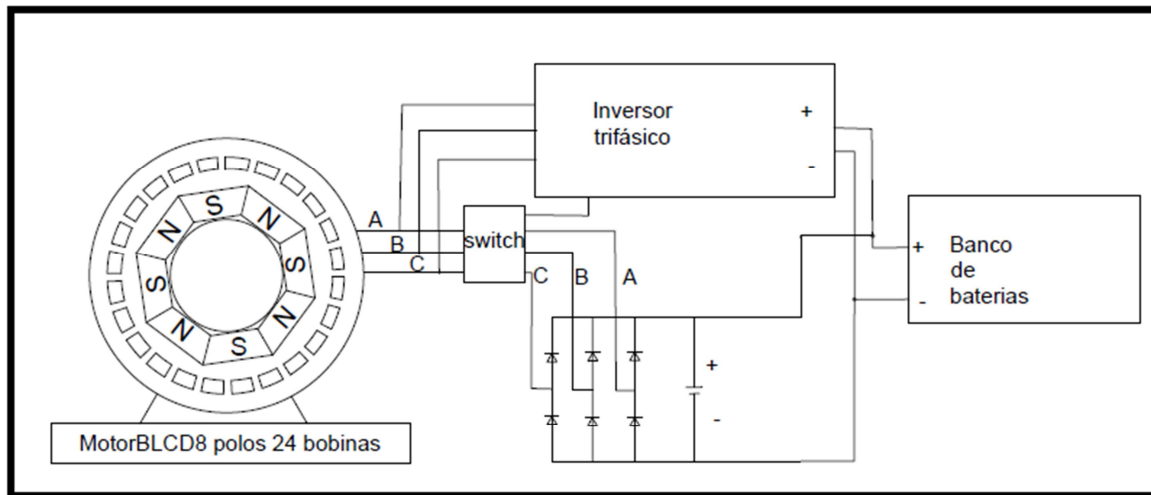


Figura 6.2 Motor BLCD, Inversor trifásico y rectificador de onda completa para frenado regenerativo.

Un rectificador trifásico tiene la propiedad de generar una tensión o corriente continua específica, a partir de una fuente de corriente alterna. Presentan mejores ventajas comparativas que los de media onda. Disminuye el rizado en las corrientes de salida en la barra de corriente continua y se obtiene un mayor valor de tensión y corriente continua.

Se puede concluir que el inversor diseñado con esta técnica de activación se encuentra listo para asignarle una aplicación y resolver problemas como los citados al inicio.

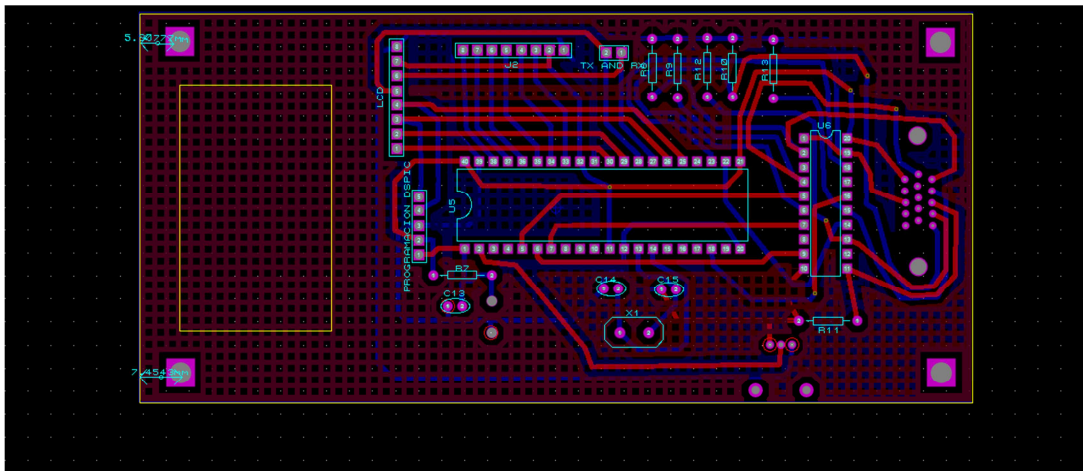
BIBLIOGRAFÍA

- Areny, R. P. (2004). Sensores y acondicionadores de señal. Marcambo.
- Chapman, S. J. & Roza Castillo, E. (2000). Máquinas Eléctricas.
- Brown, W. (2002). Brushless DC Motor Control Made Easy. Microchip Technology Inc.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. PEARSON Educacion.
- Basanta, A. N. (2002). Ventajas de los motores de flujo axial. Ingeniería Energética, 23 (1), 8-13.
- Colton, S. W. (2010). Design and prototyping methods for brushless motor and motor control (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Fiscapal, A. T. Algoritmos de modulación para motores brushless. Technical report, Ingenia-CAT Motion control departament, Barcelona Spain.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. U., Yescas Milanés, J., & Navarro Salas, R. (2004). Maquinas electricas.
- Fraden, J. (2004). Handbook of modern sensors: physics designs, and applications. Springer Science & Business Media.
- [Http://WWW.luisllamas.es](http://WWW.luisllamas.es) (2015) Recuperado el 10 de Octubre del 2016, de [Http://WWW.luisllamas.es/2015/06/detectar-campos.magneticos-con-arduino-y-sensor.hall-a3144/](http://WWW.luisllamas.es/2015/06/detectar-campos.magneticos-con-arduino-y-sensor.hall-a3144/)
- Lancaster, D. (2001). Steplocked Magic Sine Wave. CIRCUIT CELLAR, 60-65.
- Martín, J. C. (2012) Máquinas eléctricas. Editex.
- Mayné, J. (2003). Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. Silica an Avnet Division 2000-2007.
- Mitsubishi Electric Corporation. (2012). DIIPM – Application Note Bootstrap Circuit Design Manual.
- Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. Pearson Educacion.
- Ponce, P., & López, J. S. (2008). Máquinas eléctricas y técnicas modernas de control.

- Rashid, M. H., González, M. H. R. V., & Fernández, P. A. S. (2004). Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2006). Circuitos microelectrónicos. Oxford University Press.
- Sainz.Maza, A. J. M., Miñambres, J. F., Zorroua, M. A., Buigues, G., & Santiago, V. V. (2008). Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas. Pearson Prentice-Hall.
- Semiconductor, F. (2014) Design and application guide of bootstrap circuit for high-voltage gate-drive ic. Application note.
- STMicroelectronica, 2010.
- Tolrá R. J. (2003) Técnicas de control para motores brushless, comparativa entre conmutación trapezoidal, conmutacion sinusoidal y control vectorial. a) wm (b) id [18] PKF Khorrami and H. Melkote, Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors. Springer, 19.
- Maloney, T. J. (2006). Electrónica industrial moderna. Pearson Educación.

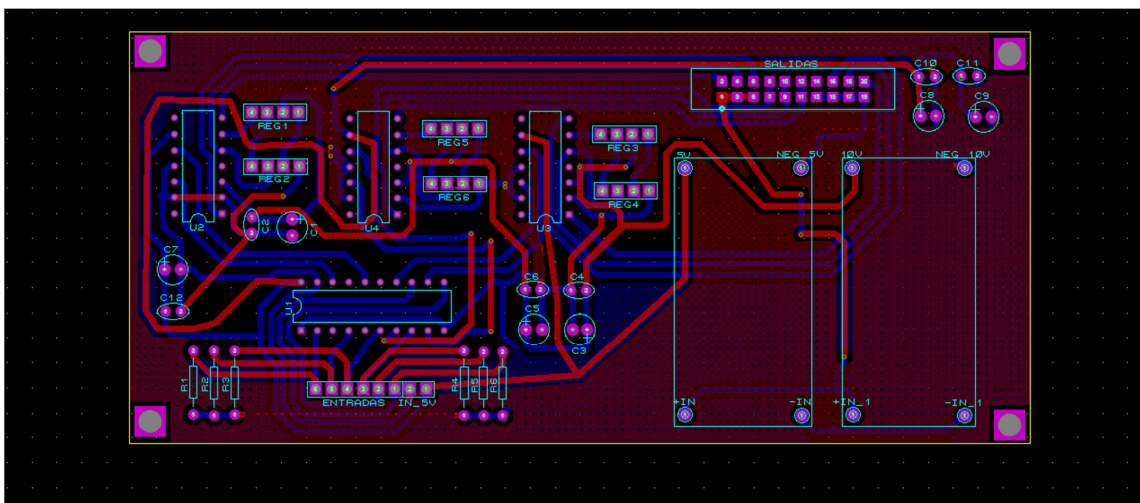
APÉNDICE 1. Tablas y diagramas

Diagrama 1 Placa A Cara A



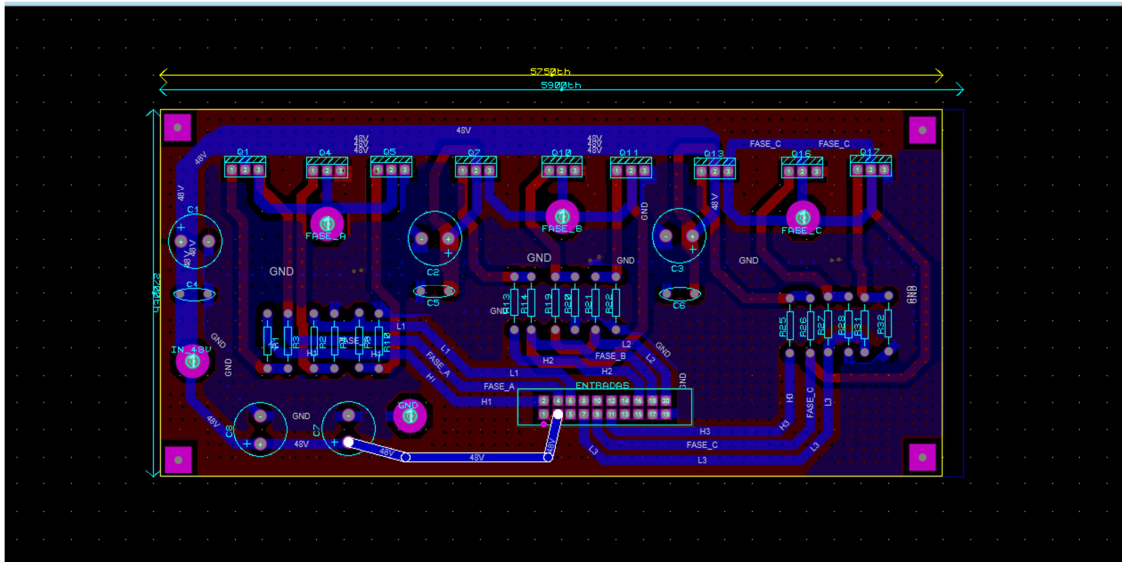
Placa PCB del microcontrolador dsPIC30F4011 realizada en PROTEUS a doble cara.

Placa B Cara A



Diseño del impreso a doble cara para el integrado irf2110

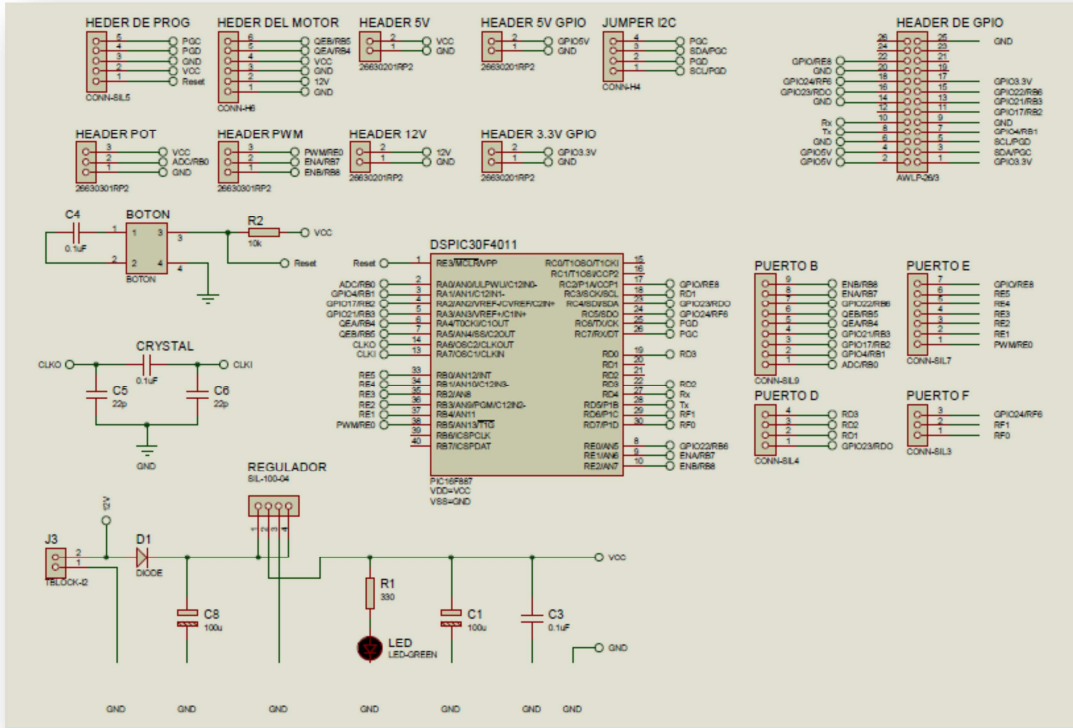
Placa C Cara A



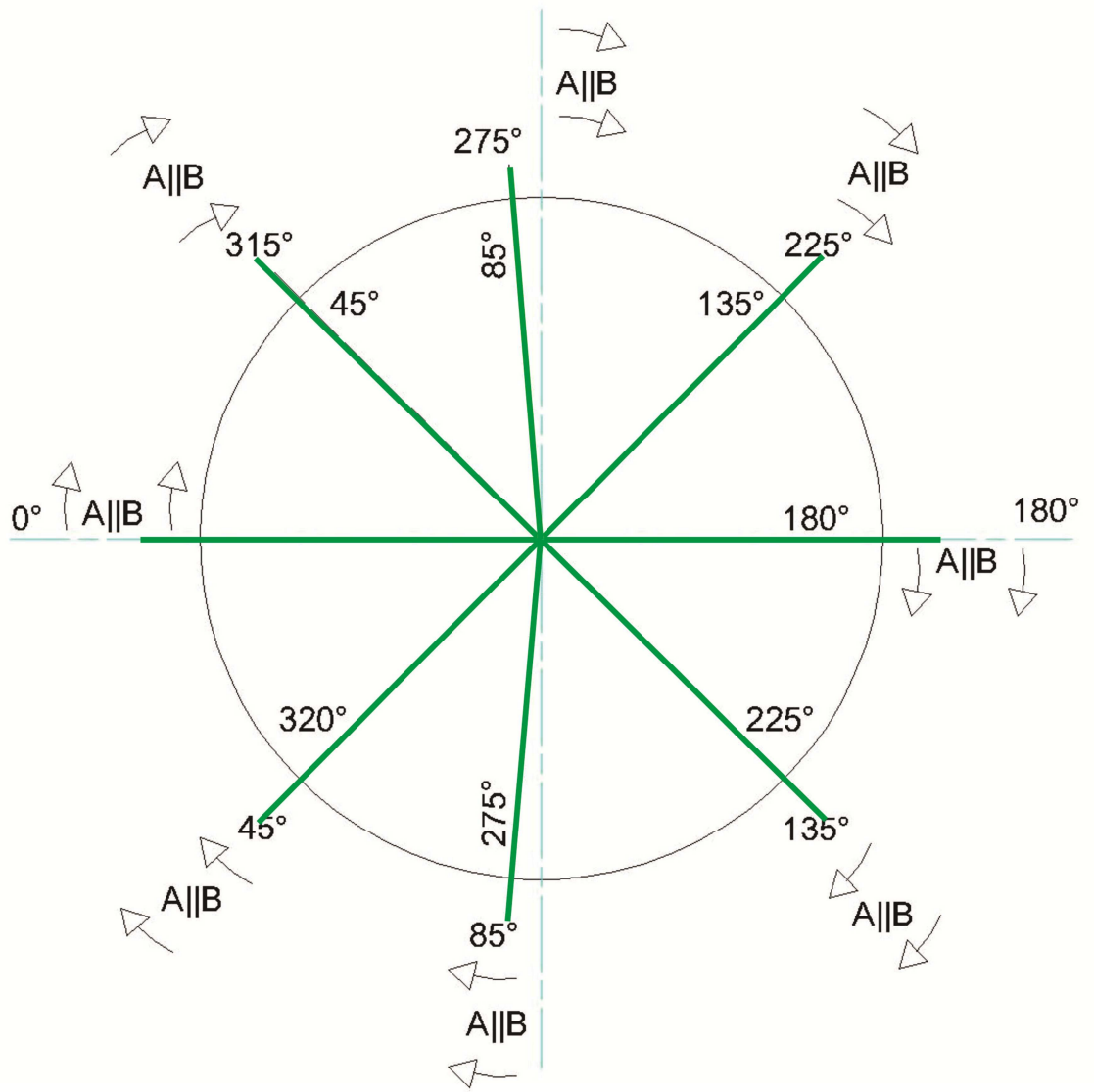
Diseño del impreso a doble cara para puente trifásico.

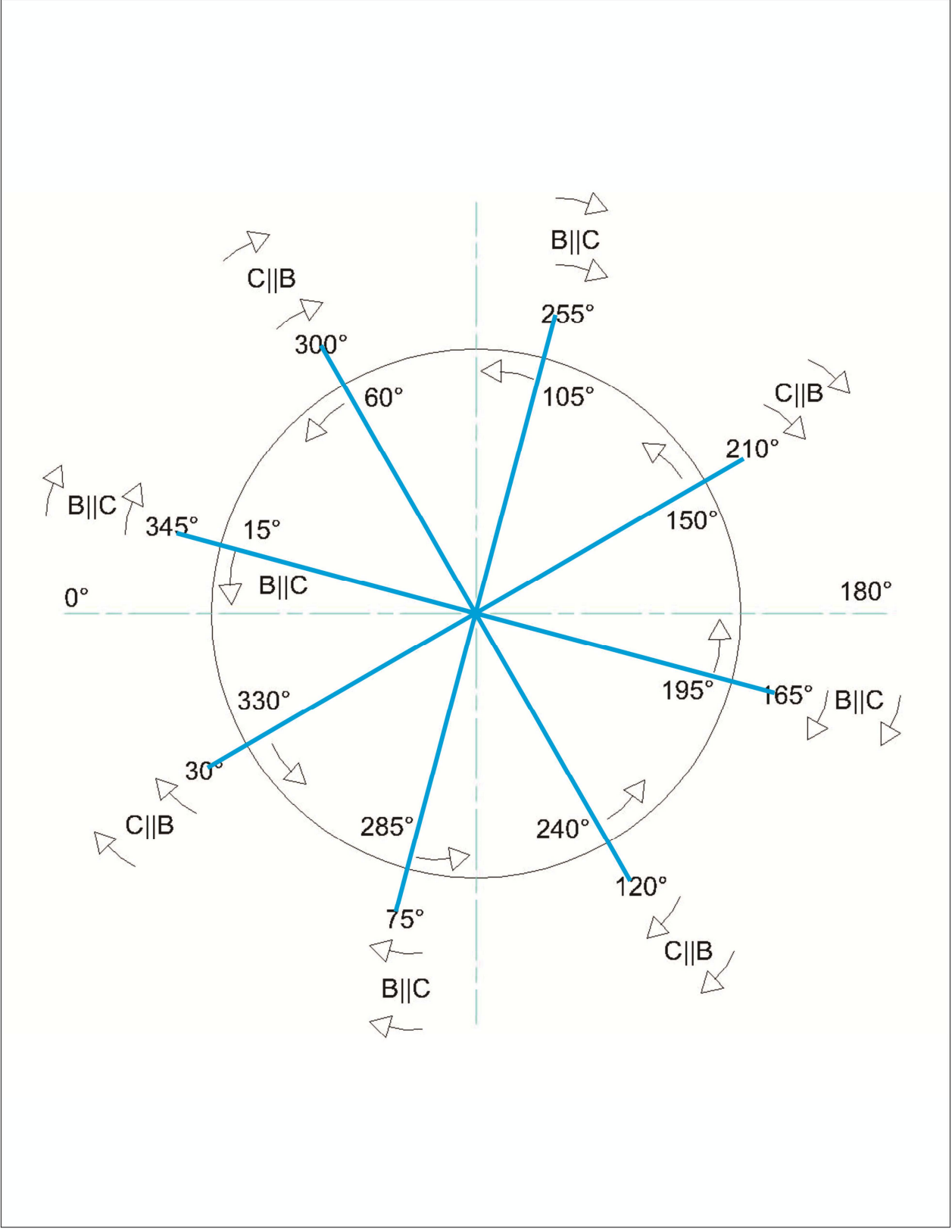
Diagrama de circuitos hecho en PROTEUS para puente trifásico.

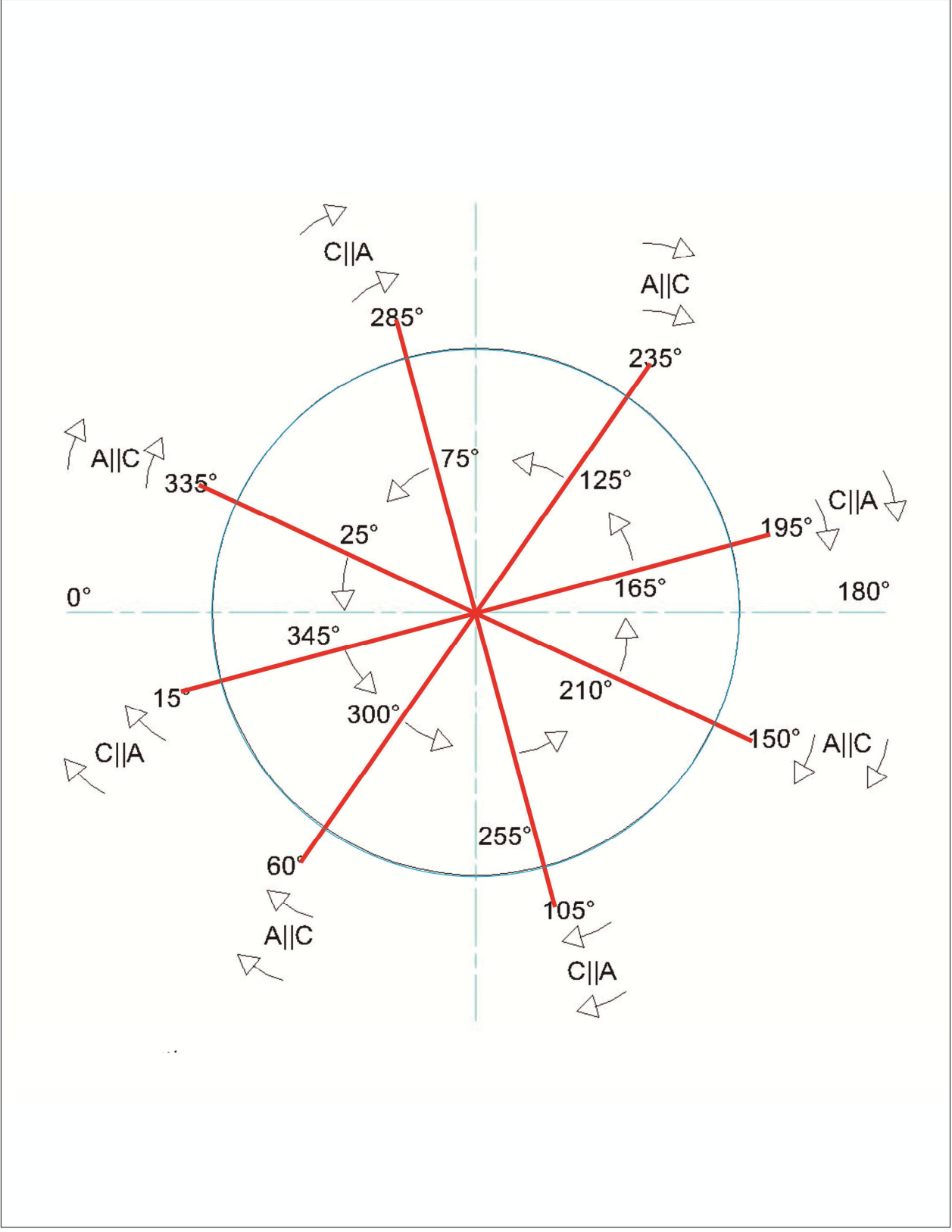
Diagrama 5

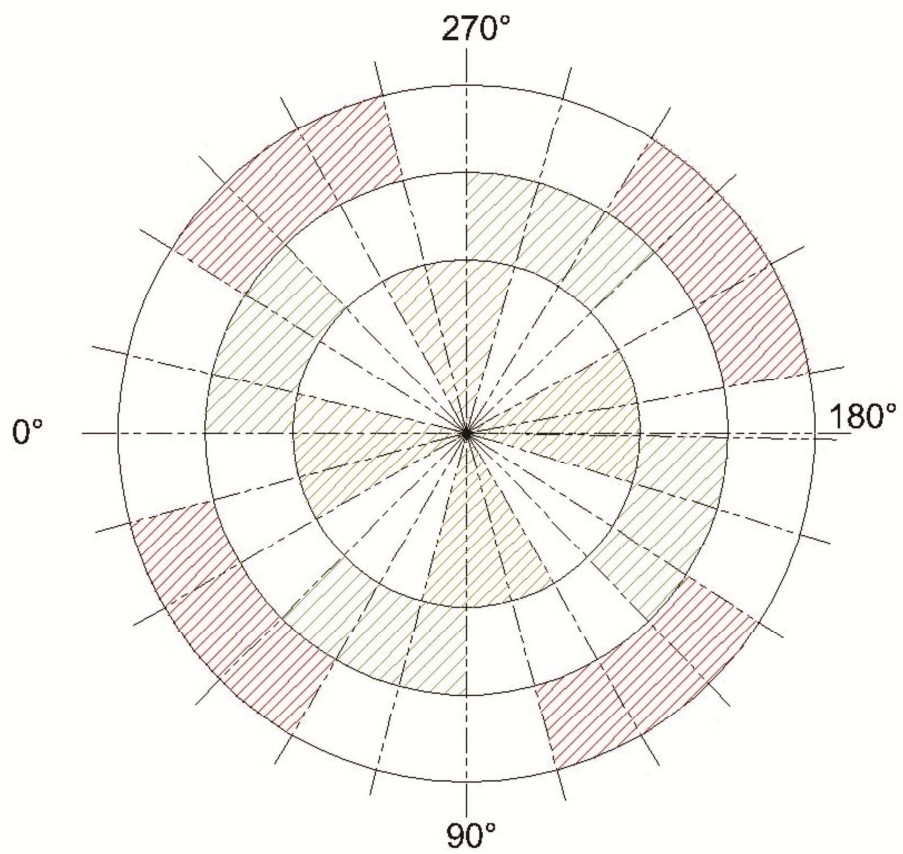


Esquemático de dispositivos y circuitos electrónicos del Dspic30F4011 realizado en PROTEUS









8 Polos
24 Bobinas

$$\text{Paso fraccionado} = \frac{360^\circ}{3 \# \text{ polos}}$$

$$= 15^\circ$$

Tabla 1

	Control Methods	MCU Requirements	Suggested Renesas MCU Solutions				
			RL78/ G13	RL78/ G14	RX111	RX220	RX62T RX63T
BLDC Motor Control	Trapezoidal Drive Control	Input Capture, Interrupt, PWM Timer for Three-Phase motor control	✓	✓			
	Sinusoidal Drive Control	Input Capture, Interrupt, PWM Timer for Three-Phase motor control			✓	✓	✓
	Simplified Vector Control	Input Capture, Interrupt, PWM Timer with Deadtime for Three-Phase motor control			✓	✓	✓
	Vector Control(FOC)	High Performance MCU+MAC, High-Speed A/D Converter, Input Capture, Interrupt, PWM Timer with Deadtime for Three-Phase motor control			✓	✓	✓
	Sensorless Trapezoidal Drive Control	Input Capture, High-Speed A/D Converter, Interrupt, PWM Timer for Three-Phase motor control		✓			
	Sensorless Vector Control	High Performance MCU+MAC, High-Speed A/D Converter, Interrupt, PWM Timer with Deadtime for Three-Phase motor control		✓	✓	✓	✓

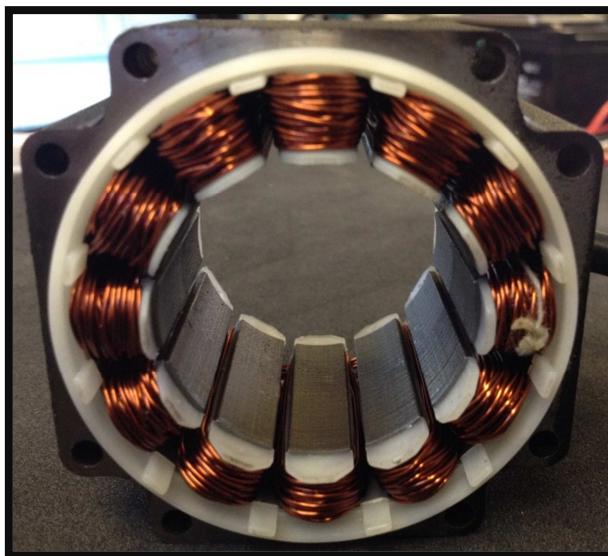
NOTAS DE APLICACIÓN.

Para el caso del microcontrolador se revisaron notas de aplicación que sirvieron como información para el desarrollo del proyecto.

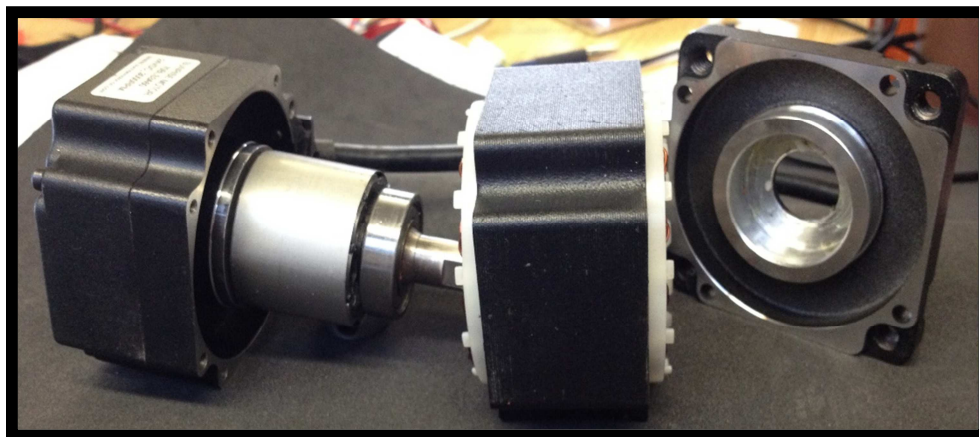
Tales como:

AN857, AN885, AN901, AN957, DS70046, GS002, AN-6076, HOJA DE DATOS DEL DSPIC30F4011.

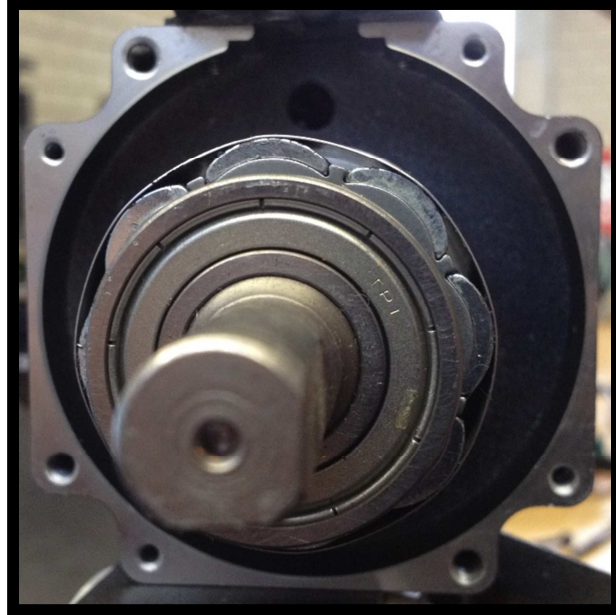
Diagrama 6



Estator del motor brushless (12 bobinados – tres fases).



Rotor y estator del motor brushless.



Rotor del motor brushless con sus respectivos imanes de neodimio (8 polos).

APÉNDICE 2. Programa del dsPIC30f4011 en C.

```
//declaración de funciones
void initMCPWM_1(int a1,int b1);
void initMCPWM_2(int a2,int b2);
void initMCPWM_3(int a3,int b3);
//declaración de variables
int pwmcon_var;

int main(void) {

int a=00;
int b=00;
int pwmcon_var1;
int pwmcon_var2;
int pwmcon_var3;
int pwmcon_var4;
int pwmcon_var5;
int pwmcon_var6;
int pdc_var1;
int pdc3_var;
int pdc2_var;
int sensorles;
ADPCFG = 0xFFFF;           // inicializar pines analogicos AN
TRISD = 0xFFFF;           //inicializar el puertos
TRISB = 0X0000;
TRISE = 0x0100;
PTPER=1000;
pwmcon_var1=0x012;
pwmcon_var2=0x024;        // secuencia de activacion completa de los enables del registro
```

PWMCON

pwmcon_var3=0x014;

pwmcon_var4=0x041;

pwmcon_var5=0x042;

pwmcon_var6=0x021;

pdv_var1=0x00;

pdv2_var=0x00;

pdv3_var=0x00;

a=-600;

b=780;

do{

sensorles = portD;

PORTB = sensorles;

switch (sensorles) {

 case 1:pdv_var1=PTPER+b,pdv2_var=PTPER-a,initMCPWM_1(
pwmcon_var1,pdv_var1),initMCPWM_2(pwmcon_var1,pdv2_var);
break;

 case2:pdv2_var=PTPER+b,pdv3_var=PTPER-a,initMCPWM_2(
pwmcon_var2,pdv2_var),initMCPWM_3(pwmcon_var2,pdv3_var);
break;

 case3:pdv_var1=PTPER+b,pdv3_var=PTPER-a,initMCPWM_1(
pwmcon_var3,pdv_var1),initMCPWM_3(pwmcon_var3,pdv3_var);
break;

 case4:pdv_var1=PTPER-a,pdv3_var=PTPER+b,initMCPWM_1(
pwmcon_var4,pdv_var1),initMCPWM_3(pwmcon_var4,pdv3_var);
break;

 case5:pdv2_var=PTPER-a, pdv3_var=PTPER+b,initMCPWM_2(
pwmcon_var5,pdv2_var),initMCPWM_3(pwmcon_var5,pdv3_var);
break;

 case6:pdv_var1=PTPER-a,pdv2_var=PTPER+b,initMCPWM_1(
pwmcon_var6,pdv_var1),initMCPWM_2(pwmcon_var6,pdv2_var);
break;

```

pwmcon_var6,pdc_var1),initMCPWM_2( pwmcon_var6,pdc2_var);
break;
default: PWMCON1=0x0000;
}
} while(1);
}
//funciones
void initMCPWM_1(int a1, int b1) // medio puente pwm 1
{
PDC1=b1;
PTCON=0x0002; //modo de la base tiempo como ascendente/desendente
PTCONbits.PTCKPS=0; // prescala 0-0
PTCONbits.PTOPS=0; // postcala 0-0
PWMCON1=a1; //pwm como salidas en modo complementario y enable de salida
PWMCON2=0x0000;
//DTCON1bits.DTAPS=0; //seleccion de la prescala para el tiempo muerto
DTCON1=0x0085; //valor del dead time y el tipo de preescala DE 4 TCY
FLTACON=0x0000; //registro de control de fallos e interrupciones
OVDCON=0x3F00; // para activarlo como modo pwm y no manual
PTCONbits.PTEN=1; //activar el MCPWM
Delay_ms(10);
return;
}
void initMCPWM_2(int a2,int b2) // medio puente pwm 2
{
//PTPER=PWM_periodo;
//PTPER=1000;
//OVDCON=0X0000;
PDC2=b2;
PTCON=0x0002; //modo de la base tiempo como ascendente/desendente
PTCONbits.PTCKPS=0; // prescala 0-0
PTCONbits.PTOPS=0; // postcala 0-0
PWMCON1=a2; //pwm como salidas en modo complementario y enables de salidas

```

```

PWMCON2=0x0000;
//DTCON1bits.DTAPS=0; //seleccion de la prescala para el tiempo muerto
DTCON1=0x0085; //valor del dead time y el tipo de preescala99
FLTACON=0x0000; //registro de control de fallos e interrupciones
OVDCON=0x3F00; // para activarlo como modo pwm y no manual
PTCONbits.PTEN=1; //activar el MCPWM
Delay_ms(10);
return;
}
void initMCPWM_3(int a3, int b3) // medio puente pwm 3
{
//PTPER=PWM_periodo;
//PTPER=1000;
//OVDCON=0X0000;
PDC3=b3;
PTCON=0x0002; //modo de la base tiempo como ascendente/desendente
PTCONbits.PTCKPS=0; // prescala 0-0
PTCONbits.PTOPS=0; // postcala 0-0
PWMCON1=a3; //pwm como salidas en modo complementario y enables de salidas
PWMCON2=0x0000;
//DTCON1bits.DTAPS=0; //selección de la prescala para el tiempo muerto
DTCON1=0x0085; //valor del dead time y el tipo de pre escala
FLTACON=0x0000; //registro de control de fallos e interrupciones
OVDCON=0x3F00; // para activarlo como modo pwm y no manual
PTCONbits.PTEN=1; //activar el MCPWM
Delay_ms(10);}

```

